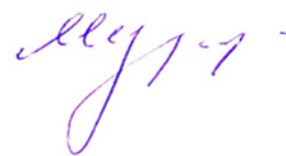


На правах рукописи



МУРЗИН Александр Владимирович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ МЕТАЛЛА
ПРИ ВЫПЛАВКЕ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПОЛУПРОДУКТА ДСП**

05.16.02 – Metallurgy of black, colored and rare metals

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена на кафедре металлургии железа и сплавов ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
БУРМАСОВ Сергей Петрович

Официальные оппоненты: **РОЩИН Василий Ефимович**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), и.о. заведующего кафедрой пирометаллургических процессов, г. Челябинск;

РОВНУШКИН Виктор Аркадьевич, кандидат технических наук, ОАО «Уральский институт металлов», исполнительный директор Научно-исследовательского центра металлургии стали и ферросплавов, г. Екатеринбург

Ведущая организация: ФГБУН Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Защита состоится «17» марта 2017 г. в 17:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?id=51&rid=264621>

Автореферат разослан «___» января 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сулицин Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

При переходе к современным высокоинтенсивным процессам в корне изменились технологические подходы к получению заданного содержания углерода в стали. Если ранее стремились к получению концентрации углерода на выпуске из плавильного агрегата в пределах целевого диапазона для заданной марки стали, то концепция современного высокоинтенсивного процесса в большинстве случаев предполагает получение стали из унифицированного низкоуглеродистого полупродукта путем науглероживания металла в ковше. Это не только сделало науглероживание неотъемлемым элементом современной технологии производства стали, но и привело к большому количеству вариантов его реализации с точки зрения степени науглероживания, типа используемых карбюризаторов, способа науглероживания, технологического этапа, где реализуется ввод углеродсодержащих материалов. При этом общепринятая научно обоснованная концепция науглероживания металла, учитывающая особенности качества стали и полупродукта, полученного высокоинтенсивными процессами, до настоящего времени полностью не сформировалась. Поэтому исследования, направленные на разработку технологии науглероживания металла при выплавке трубных сталей ответственного назначения с использованием полупродукта ДСП, несомненно, актуальны для теории и практики высокоинтенсивных процессов.

Степень разработанности темы исследования

Наиболее системные исследования науглероживания расплавов железа были выполнены применительно к условиям конвертерного и мартеновского процессов и касались, прежде всего, вопросов оптимизации усвоения углеродистых материалов, мало затрагивая проблему влияния науглероживания на качество стали, которая ставилась в соответствие с выравниванием химического состава по углероду.

Исследованиями А.М. Самарина, А.А. Вертмана, Б.А. Баума и ряда других отечественных ученых, направленными на изыскание резервов повышения качества металлических материалов, показано, что наиболее полно реализовать потенциальные возможности, заложенные химическим составом, в том числе по углероду, позволяет формирование перед кристаллизацией равновесных, микрооднородных структурных состояний расплавов железа. В связи с этим, время полного растворения науглероживателя корректно ставить в соответствие не выравниванию химического состава, а устранению микронеоднородности расплава. Завершённость этого процесса в прецизионных расплавах железа изучена недостаточно, а в промышленных расплавах современных высокоинтенсивных процессов практически не изучалась.

Цель работы

Разработка и промышленное внедрение эффективных технологий науглероживания высокоокисленного полупродукта ДСП при производстве качественных сталей трубного сортамента.

Задачи исследования:

1. Исследование влияния науглероживания металла на равновесность расплавов и качество стали.

2. Исследование особенностей формирования расплавов при науглероживании полупродукта ДСП.

3. Анализ возможностей повышения эффективности науглероживания за счет оптимизации окисленности полупродукта.

4. Исследование способов повышения эффективности науглероживания за счет комплексного решения задач раскисления и науглероживания.

5. Разработка технологии науглероживания металла при выплавке трубных сталей с использованием полупродукта ДСП.

6. Промышленное внедрение разработанной технологии и оценка ее эффективности.

Научная новизна

Впервые выполнены систематические исследования влияния параметров технологии науглероживания полупродукта на качество трубных сталей. Установлено, что науглероживание может являться одной из наиболее значимых причин появления дефектов литого и деформированного металла и снижения уровня свойств.

Впервые получены систематические данные о влиянии науглероживания на неравновесность расплавов и качество готовой стали.

Впервые изучены закономерности формирования равновесных расплавов при науглероживании железа в зависимости от примесного состава. Экспериментально показано отрицательное влияние кислорода и серы на формирование расплавов железа при науглероживании. Расширены представления о природе влияния окисленности металла, его раскисления и десульфурации на эффективность науглероживания.

Получены новые данные об уровне окисленности полупродукта ДСП и влиянии технологических параметров плавки на активность кислорода в расплаве.

Уточнены термодинамические и впервые получены кинетические и реологические закономерности взаимодействия карбида кремния с расплавами железа. Установлено отрицательное влияние кремния на макро- и микропроцессы усвоения углерода расплавом.

Теоретическая и практическая значимость работы

Обоснована возможность повышения качества литого и деформированного металла посредством оптимизации технологии науглероживания полупродукта ДСП.

Установлен оптимальный диапазон окисленности полупродукта современной сверхмощной ДСП при производстве трубных сталей. Показана возможность получения целевой окисленности за счет оптимизации режима продувки кислородом, технологии ввода антрацита в ДСП и шлакового режима.

Опираясь на результаты исследований, сформулированы общие принципы технологии науглероживания полупродукта при выплавке стали современными высокоинтенсивными процессами.

Доказана эффективность предложенных принципов путем разработки и внедрения комплексной технологии раскисления и науглероживания полупродукта при выплавке трубных сталей в ДСП на 100-процентной твердой завалке.

Обоснованы технологические принципы использования карбида кремния при выплавке трубных сталей современным высокоинтенсивным процессом, на основе которых разработан вариант комплексной технологии раскисления и науглероживания,

внедрение которого при выплавке трубных сталей в ДСП дало значительный экономический эффект.

Методология и методы исследования

Методология работы базируется на концепции совершенствования технологии сталеплавильных процессов на базе изучения структурных особенностей и закономерностей формирования расплавов на основе железа, заложенной в работах Б.А. Баума и его сотрудников. Для достижения поставленной цели и решения задач в рамках проведения диссертационной работы использовались следующие методы: вискозиметрии расплавов металлов (бесконтактный метод крутильных колебаний тигля с расплавом), металлографическая микроскопия, производственный эксперимент, статистические методы анализа и моделирования.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Экспериментально обоснованное положение о том, что науглероживание является одним из наиболее значимых источников неравновесности расплавов трубных сталей, существенно влияющих на качество литого и деформированного металла.

2. Установленное в результате исследований методом вискозиметрии отрицательное влияние кислорода и серы на продолжительность формирования микрооднородного, равновесного структурного состояния расплава после науглероживания железа.

3. Возможность сокращения продолжительности формирования расплава после науглероживания железа за счет повышения глубины раскисления и десульфурации металла.

4. Технологические принципы повышения эффективности науглероживания полупродукта ДСП:

- регламентация окисленности полупродукта;

- комплексное решение технологических задач раскисления, науглероживания и десульфурации с опережающим глубоким рафинированием металла от нежелательных примесей;

- применение в качестве основного карбюризатора искусственных графитов и электродного боя, исключив использование природных углеродсодержащих материалов;

- использование карбида кремния только для предварительного раскисления полупродукта;

- минимизация степени науглероживания в ходе внепечной обработки и смещение корректировок по углероду в случае их необходимости на начальные этапы обработки.

5. Возможность целенаправленного получения целевой окисленности полупродукта за счет согласованной оптимизации режима продувки кислородом, технологии использования в ДСП антрацита и шлакового режима.

6. Реализация разработанных принципов науглероживания в виде двух вариантов комплексной технологии раскисления и науглероживания полупродукта ДСП при производстве трубных сталей: без применения и с использованием карбидкремнийсодержащих материалов.

7. Экспериментальные и промышленные данные об эффективности разработанных вариантов комплексной технологии раскисления и науглероживания полупродукта при

производстве трубных сталей с использованием современной ДСП-135 на 100-процентной твердой завалке.

Степень достоверности результатов работы

Достоверность результатов определяется использованием в работе современных методов физико-химического исследования и статистического анализа процессов с использованием специализированных пакетов прикладных программ, а также промышленной реализацией технологических решений со значительным экономическим эффектом.

Личный вклад автора

Заключается в том, что автор принимал непосредственное участие в определении цели и задач исследований, проведении лабораторных и опытно-промышленных экспериментов, анализе и обработке полученных результатов, разработке технологического регламента науглероживания высокоокисленного полупродукта ДСП, его внедрении при производстве трубных сталей, подготовке рукописей статей в научные журналы.

Апробация работы

Материалы диссертации были доложены и обсуждены на 6 международных конференциях:

- XVI международная научно-практическая конференция «ТРУБЫ-2008», г. Челябинск, 2008г.
- X международный конгресс сталеплавильщиков, г. Магнитогорск, 2008г.;
- XI международный конгресс сталеплавильщиков, г. Нижний Тагил, 2010г.;
- XII международный конгресс сталеплавильщиков, г. Выкса, 2012г.;
- XIII международный конгресс сталеплавильщиков, г. Полевской, 2014г.;
- XIV международный конгресс сталеплавильщиков, г. Электросталь, 2016г.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 13 научных работ, из них в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ – четыре. Другие публикации – 9.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, приложений; изложена на 186 страницах, включает 67 рисунков, 19 таблиц, список литературы содержит 82 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, выбрано общее направление работы, сформулированы цель работы, ее научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, а так же приведены сведения об апробации работы.

Глава 1. Роль науглероживания металла в современной технологии производства стали

В первой главе проведен анализ литературных данных по теме исследования. Рассмотрены вопросы развития и современного состояния технологической схемы производства стали, технологические проблемы науглероживания, физико-химические

аспекты науглероживания, проблемы качества готовой стали, которые позволили сделать следующие заключения:

- в качестве основных критериев эффективности технологии науглероживания при производстве стали могут рассматриваться величина и стабильность усвоения углерода, влияние на качество расплава (на степень неравновесности структурного состояния), влияние на качество готовой стали. Именно изучение этих параметров должно составлять основу разработки и оптимизации технологии науглероживания;
- комплексных исследований с анализом зависимостей всех критериев эффективности от технологических параметров науглероживания практически не проводилось;
- результаты системного изучения технологии науглероживания высокоокисленного полупродукта ДСП в литературе отсутствуют;
- требует дальнейшего изучения влияние типа карбюризатора на эффективность науглероживания;
- нет всесторонней оценки значимости фактора времени науглероживания полупродукта: на выпуске или в ходе внепечной обработки. Требует дальнейшего изучения величина допустимой корректировки состава металла по углероду на агрегате «ковш-печь».

Исходя из этого, сформулированы конкретные задачи исследования.

В связи с установленным научным фактом взаимосвязи свойств жидкого и твердого металла, сохранения наследственной связи дефектности и структурной неоднородности твердого и жидкого состояний при фазовом переходе, изучение степени равновесности расплавов может рассматриваться в качестве интегральной (комплексной) оценки качества готовой стали. Поэтому в качестве основного направления лабораторных исследований было выбрано изучение равновесности расплавов.

Глава 2. Исследование равновесности и условий формирования расплавов при науглероживании

Вторая глава посвящена исследованию равновесности и условий формирования расплавов при науглероживании. Изложены метод исследований, экспериментальные установка и методика. Равновесность расплавов изучали методом вискозиметрии, с использованием метода затухающих крутильных колебаний тигля с металлом. Эксперименты проводили в вакуумном высокотемпературном вискозиметре в атмосфере очищенного гелия с использованием тиглей из оксида циркония. Суть экспериментальной методики состояла в изучении динамики формирования расплава в ходе изотермической выдержки при 1600 °С с фиксацией характера изменений кинематической вязкости жидкого металла. Время стабилизации значений кинематической (время релаксации) ставили в соответствие завершению формирования микрооднородного, равновесного расплава.

Обобщение результатов многолетних исследований, выполненных при производстве трубных сталей с использованием современной технологической схемы, включающей сверхмощную ДСП, установку внепечной обработки стали - УВОС, вакууматор и МНЛЗ, показало, что неравновесность расплава, прежде всего, связана со снижением уровня пластических свойств готовой стали (рисунок 1). В результате детальных исследований было установлено, что науглероживание является одним из наиболее значимых источников неравновесности расплавов трубных сталей, существенно влияющих на качество литого и деформированного металла.

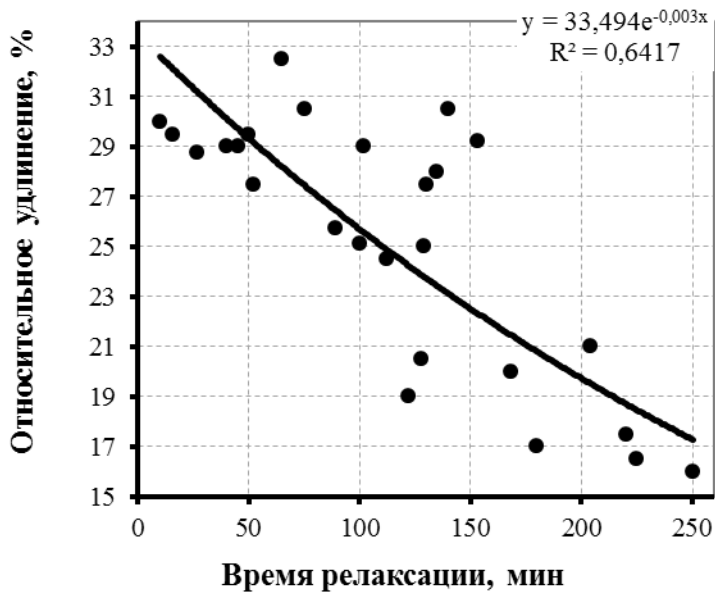


Рисунок 1 - Взаимосвязь равновесности расплава и пластичности углеродистых трубных сталей

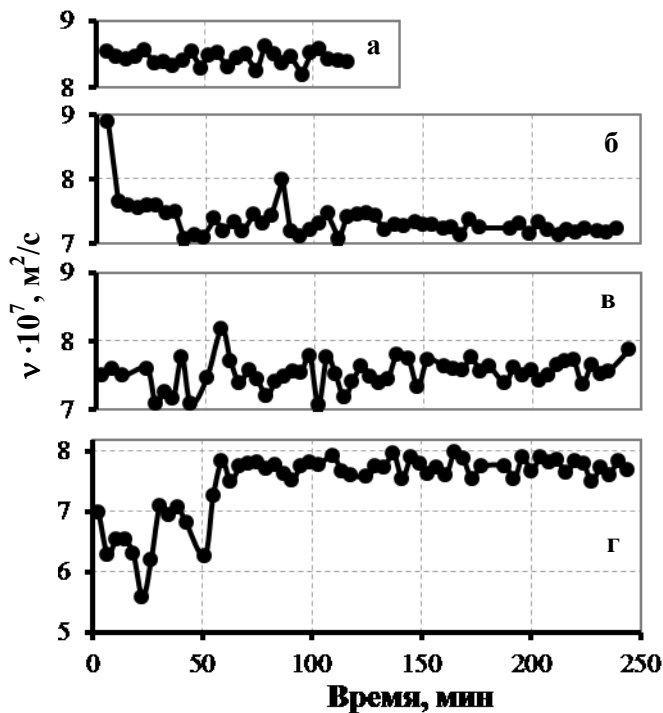
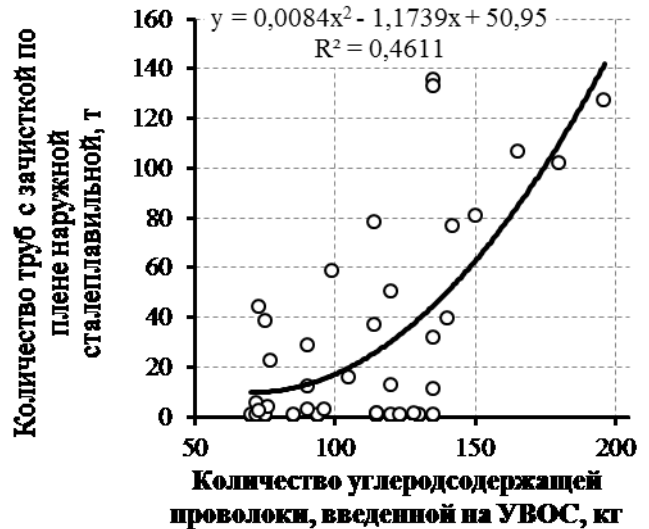


Рисунок 2 – Влияние степени науглероживания в ходе обработки на УВОС полупродукта ДСП на равновесность расплавов промышленных сталей и качество труб:

- а – сталь Д, без присадок углеродсодержащей проволоки, отсутствие брака;
- б - сталь Д, 70 кг на ковш 140 т, отсутствие брака;
- в - сталь Д, 152 кг на ковш 140 т, брак 6,4 т, зачистка по наружной плене 70 т;
- г – сталь 32Г, 170 кг на ковш 140 т, брак 7,0 т, зачистка по наружной плене 90 т.

Так, увеличение степени науглероживания на агрегате «печь-ковш» связано с возрастанием степени неравновесности структурного состояния расплава (рисунок 2). График «а» соответствует отсутствию присадок углеродистой проволоки, последующие графики отражают нарастание неравновесности по мере увеличения присадок до 170 кг/ковш. Здесь же приведены данные по росту отбраковки труб в связи с зачисткой поверхности при возрастании степени науглероживания.



Анализ промышленных данных позволил выделить другой параметр технологии науглероживания в ходе внепечной обработки, существенно влияющий на качество жидкого и твердого металла – это время корректировки состава металла по углероду. Смещение корректировок на начальные этапы обработки способствует как повышению пластичности металла труб, так и повышению равновесности расплава (рисунки 3, 4). Таким образом, показано, что одной из важнейших задач эффективной технологии науглероживания является формирование равновесных микрооднородных расплавов. Это соответствует ранее выдвинутому А.А. Вертманом и А.М. Самариним положению о том, что время полного растворения науглероживателя корректно ставить в соответствие не выравниванию химического состава, а устранению микронеоднородности расплава.

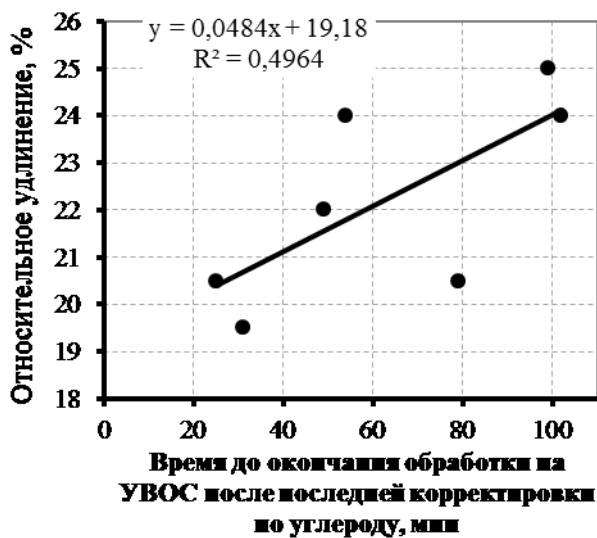


Рисунок 3 – Влияние времени корректировки по углероду в ходе обработки на УВОС на пластичность металла труб (сталь Д, типоразмер 245×7,9 мм×мм)

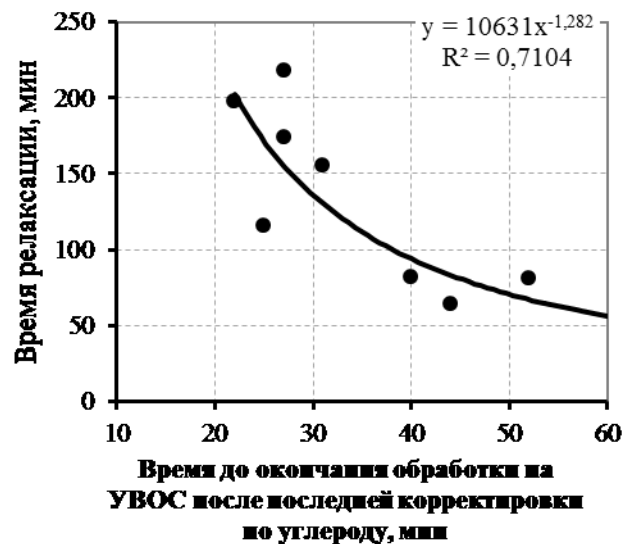


Рисунок 4 – Влияние времени корректировки по углероду на УВОС на равновесность расплава стали Д

Основными особенностями расплава при науглероживании полупродукта ДСП являются высокая окисленность и повышенное содержание серы. Исследования влияния этих примесей нами выполнены с использованием прецизионных материалов. Экспериментальные данные однозначно указывают на то, что увеличение концентрации кислорода существенно затягивает процесс формирования расплава после науглероживания железа (рисунок 5).

Результаты специальных экспериментов по науглероживанию расплавов железа с окисленностью, подобной промышленному металлу, подтверждают, что окисленность исходного металла оказывает очень существенное влияние на характер формирования расплава при науглероживании железа. Снижение исходной окисленности металла с 625 до 205 ppm положительно сказалось на процессе формирования структурно однородного расплава после науглероживания железа, значительно сократив время перехода расплава в равновесное структурное состояние (рисунок 6).

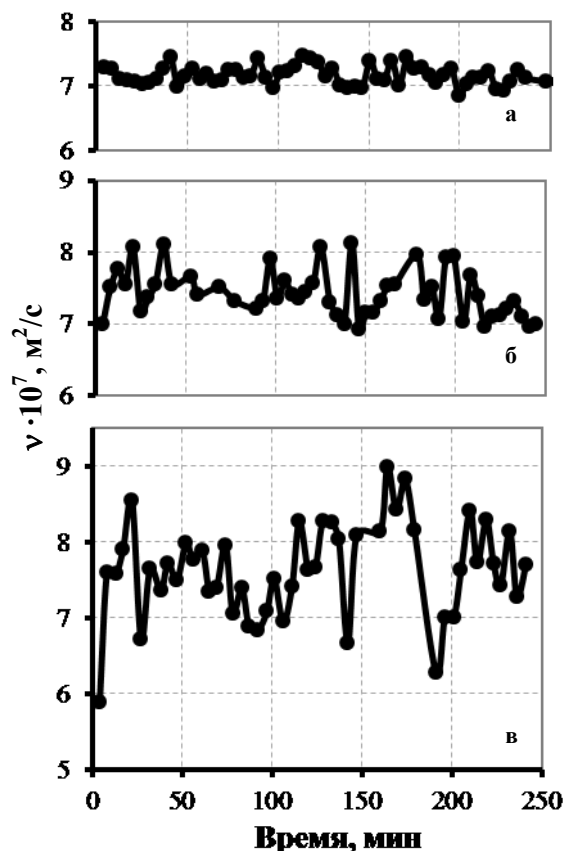


Рисунок 5 – Влияние кислорода на динамику формирования расплава при науглероживании железа из расчета ввода 0,1 масс. % углерода в ходе изотермической выдержки при 1600 °С. Содержание кислорода в железе перед науглероживанием: а – 8 ppm; б – 15 ppm; в – 60 ppm

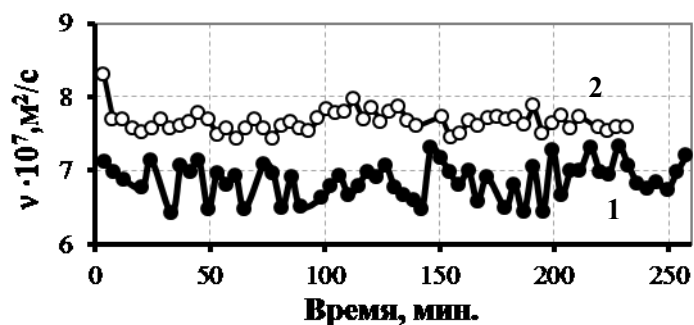


Рисунок 7 – Влияние серы на динамику формирования расплава при науглероживании железа из расчета ввода 0,1 масс. % углерода в ходе изотермической выдержки при 1600 °С: 1 – концентрация серы 500 ppm; 2 – концентрация серы 1÷2 ppm

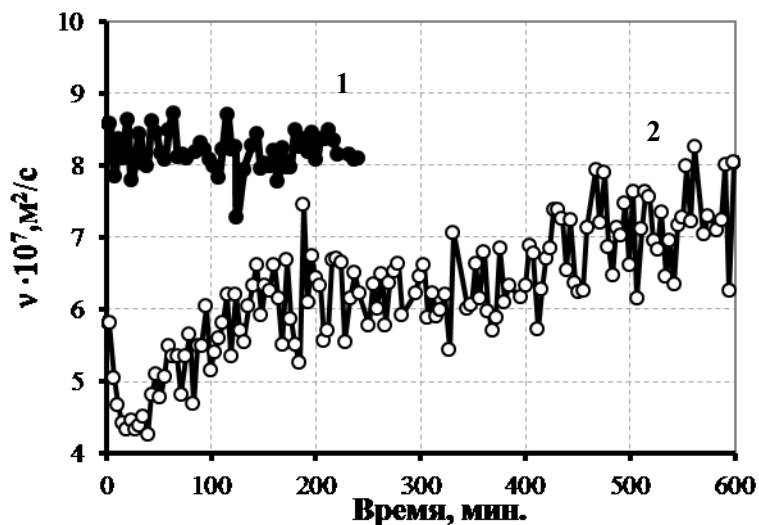


Рисунок 6 – Влияние исходной окисленности металла на динамику формирования расплава при науглероживании железа из расчета ввода 0,1 масс. % углерода в ходе изотермической выдержки при 1600 °С. Окисленность исходного расплава железа: 1 – 205 ppm; 2 – 625 ppm

Установлено, что значительная концентрация серы в исходном расплаве железа так же существенно замедляет процесс формирования микрооднородного структурного состояния после науглероживания (рисунок 7): при одинаково низкой окисленности металла, в случае содержания в расплаве серы 1 ÷ 2 ppm динамика изменения вязкости отражает структурное состояние расплава после науглероживания как близкое к равновесному, в то время как при содержании серы в расплаве в количестве 500 ppm установление равновесия за время эксперимента (более 4 часов) не зафиксировано.

При анализе природы влияния кислорода и серы на характер формирования расплавов исходили из представлений о преимущественном растворении атомарного углерода в ГЦК-подобной упаковке атомов расплава. Ограниченная растворимость углерода в ОЦК-подобных упаковках способствует образованию неравновесных кластеров типа Fe_xC . Известная ферритообразующая роль кислорода и серы в расплаве, по нашему мнению, способствует ОЦК-подобной упаковке железа и, таким образом, ограничивает формирование равновесных расплавов с углеродом. Для проверки этого положения нами проведен прецизионный эксперимент науглероживания железа, легированного ферритообразующим элементом кремнием (рисунок 8). При этом установлено влияние кремния, подобное влиянию кислорода и серы.

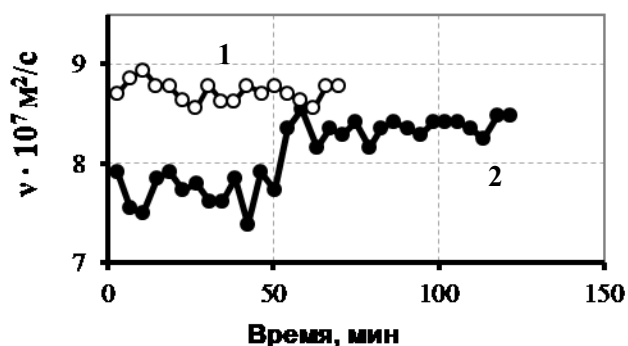


Рисунок 8 – Результаты исследования методом вискозиметрии динамики формирования расплава при 1600°C после науглероживания графитом (из расчета ввода 0,1 масс. % углерода): 1 – чистого железа; 2 – прецизионного сплава «Fe - 0,25% Si»

Опираясь на результаты лабораторных и промышленных исследований, сформулированы принципы технологии науглероживания, реализация которых должна повысить его эффективность:

- стабилизация окисленности полупродукта на минимально возможном уровне;
- комплексное решение технологических задач раскисления, науглероживания и десульфурации с опережающим глубоким рафинированием металла от нежелательных примесей;
- минимизация степени науглероживания в ходе внепечной обработки величиной не более 0,05-0,07 масс.% и смещение корректировок по углероду на начальные этапы обработки.

Глава 3. Исследование и стабилизация окисленности полупродукта

Третья глава посвящена исследованию и стабилизации окисленности полупродукта ДСП. Учитывая важность оценки исходного состояния расплава по окисленности, исследованию этого вопроса было уделено особое внимание. В результате исследования окисленности полупродукта, произведенного по базовой технологии, установлена высокая степень переокисления металла (рисунок 9). При этом уровень окисленности металла при выплавке в ДСП выше, чем в кислородно-конвертерном и приближается к подовым процессам с высокой интенсивностью продувки кислородом.

В результате специальных исследований установлено определяющее влияние на окисленность полупродукта трех технологических факторов: расхода кислорода (рисунок 10), технологии ввода углеродсодержащего материала в печь (рисунок 11) и содержания FeO в шлаке (рисунок 12).

Используя в качестве критериев оптимизации технологии окисленность полупродукта и энерготехнологические параметры плавки, поэтапно были исследованы и оптимизированы: режим продувки кислородом (рисунок 13), технология ввода антрацита в ДСП (рисунок 14), шлаковый режим (рисунок 15).

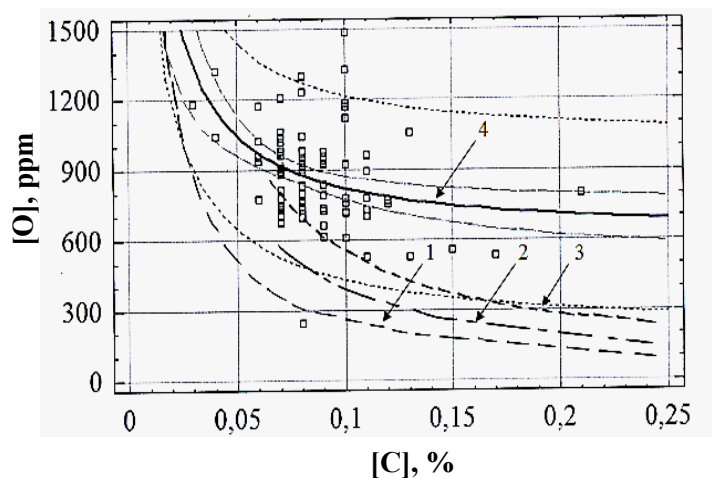


Рисунок 9 – Зависимость окисленности металла в ДСП от содержания углерода в сравнении с другими процессами:

- 1 – равновесное значение содержания кислорода в металле;
- 2 – кислородно-конвертерный процесс;
- 3 – подовый процесс; 4 – ДСП

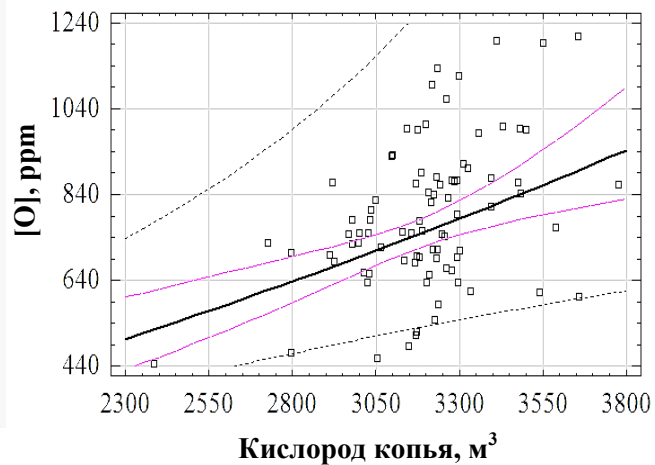


Рисунок 10 – Зависимость окисленности металла в ДСП от количества кислорода, подаваемого через сверхзвуковые фурмы (кислород копя)

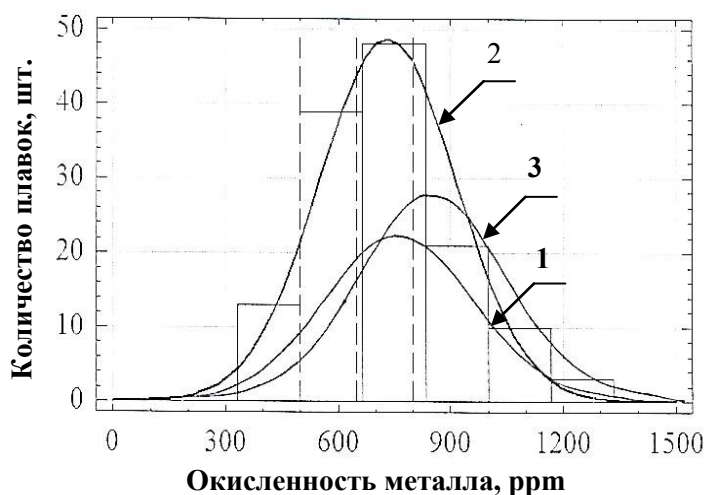


Рисунок 11 – Окисленность металла при различных технологиях:

- 1 – технология с завалкой чугуна в бадью;
- 2 – технология с использованием завалки антрацита в бадью;
- 3 – базовая технология.

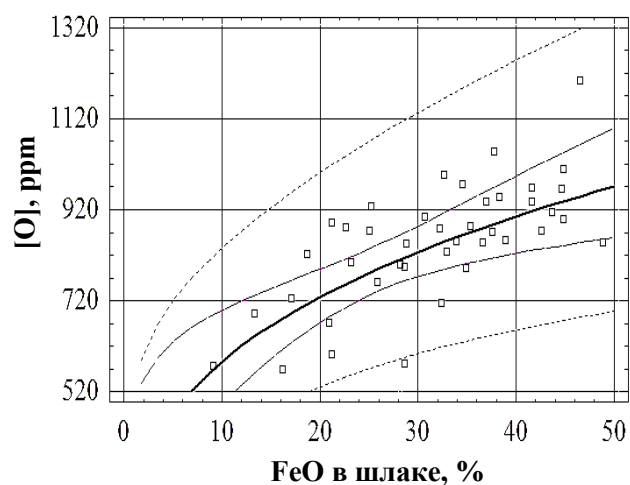


Рисунок 12 – Зависимость окисленности металла в ДСП от состава шлака

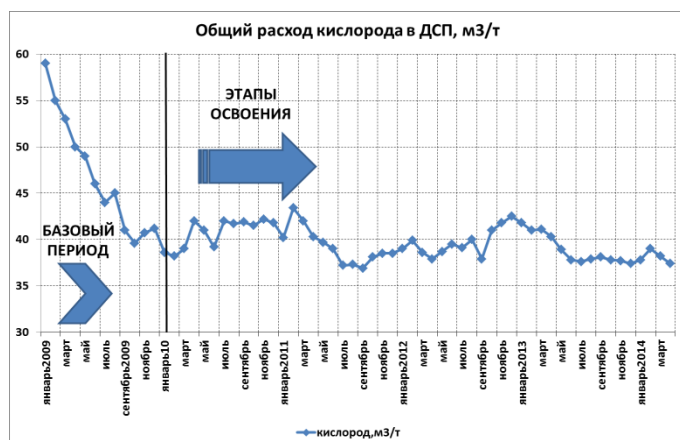


Рисунок 13 – Общий расход кислорода в ДСП по этапам освоения технологии

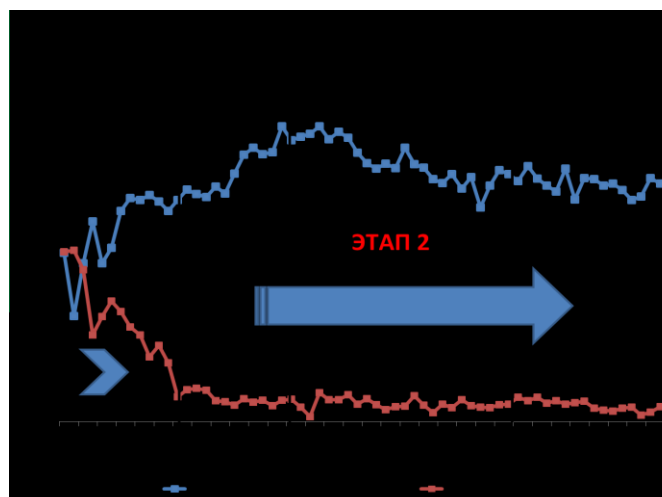


Рисунок 14 – Расход антрацита в ДСП по этапам освоения технологии

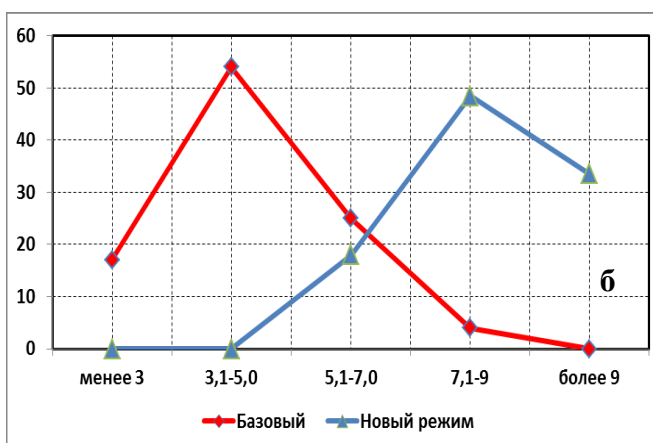
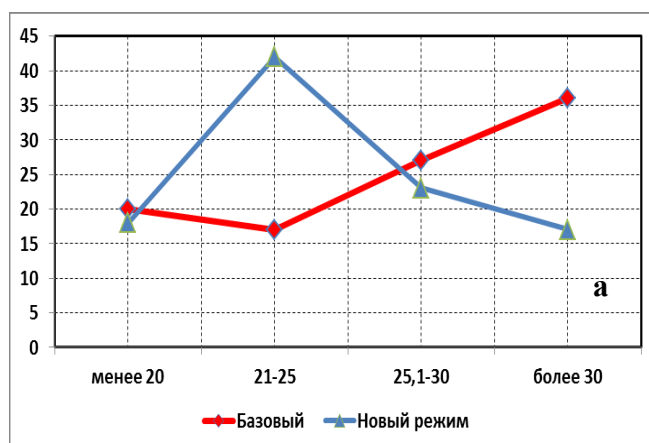


Рисунок 15 – Состав печного шлака при базовой и новой технологии:
 а – содержание (FeO);
 б – содержание (MgO)

В результате внедрения усовершенствованной технологии плавки в ДСП получено значительное снижение и стабилизация окисленности полупродукта (рисунок 16). Установлено, что достигнутое снижение окисленности полупродукта позволяет уменьшить неравновесность расплава (рисунок 17). Стабилизация окисленности связана с достижением близкого к стабильному значению окисленности (рисунок 18) в интервале значений содержания углерода в полупродукте, что позволяет при разработке технологии науглероживания регламентировать ее значения на уровне 600÷700 ppm. Это согласуется с полученными экспериментальными данными (рисунок 19) по равновесности расплавов промышленной стали Д при поступлении на установку «печь-ковш» в зависимости от исходной окисленности расплава.

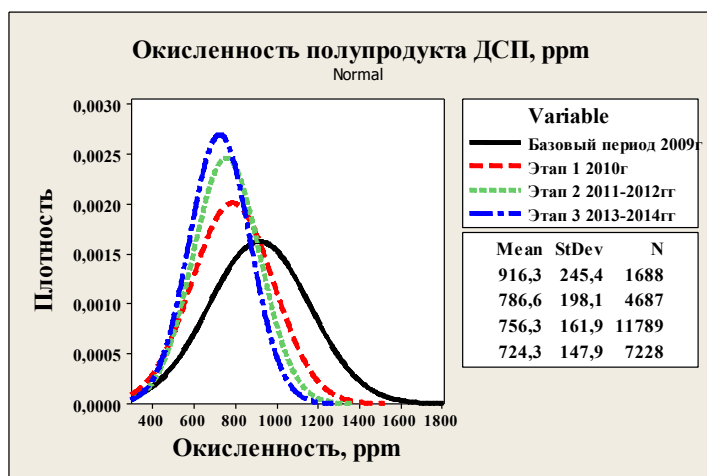


Рисунок 16 – Этапы совершенствования технологии плавки и стабилизации окисленности полупродукта ДСП

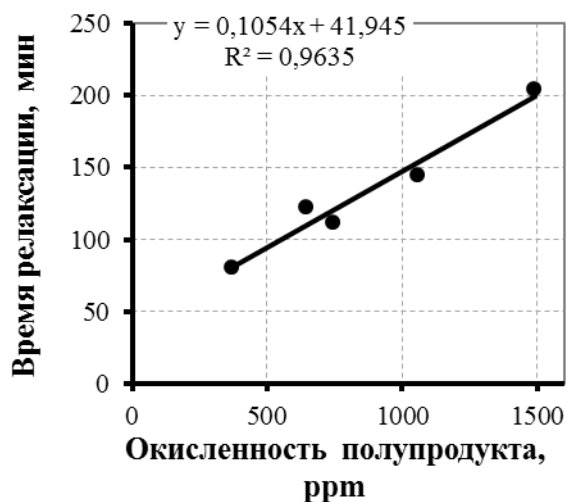


Рисунок 17 – Влияние окисленности полупродукта на неравновесность расплава стали Д

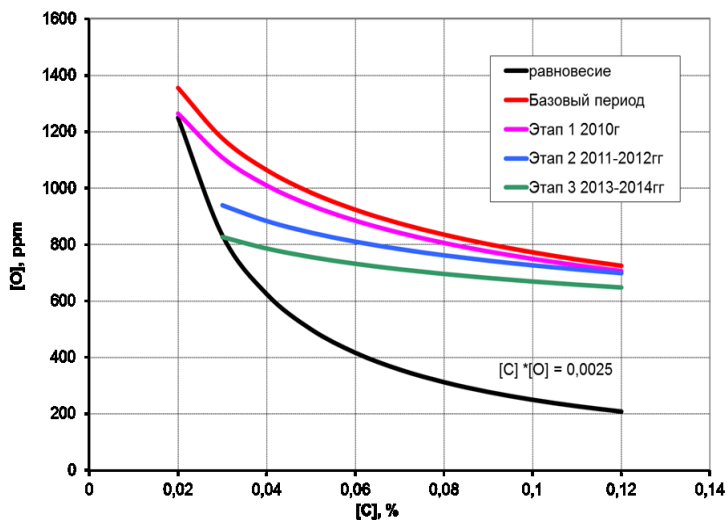


Рисунок 18 – Сравнение переокисленности полупродукта по этапам освоения технологии

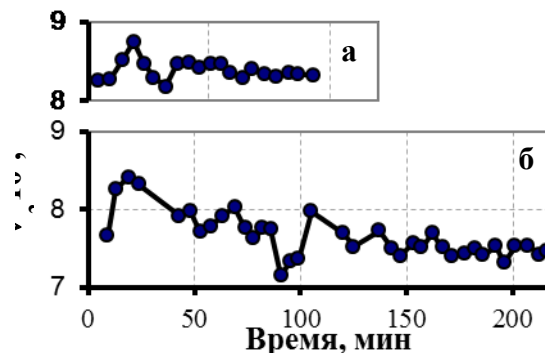


Рисунок 19 – Влияние окисленности полупродукта на неравновесность расплава стали Д при поступлении на установку «печь-ковш»:
а – технологически регламентированная окисленность полупродукта: 634 ppm;
б – переокисленный расплав: 867 ppm.

Глава 4. Разработка и совершенствование комплексной технологии раскисления и науглероживания металла

Четвертая глава посвящена разработке и совершенствованию комплексной технологии раскисления и науглероживания металла при выплавке трубных сталей с использованием полупродукта ДСП. При этом первоочередное внимание было уделено исследованию и оптимизации режима раскисления алюминием и выбору типа науглероживателя.

В результате изучения влияния раскисления алюминием на динамику формирования расплава (регламентированной окисленности) при науглероживании железа установлено, что для формирования равновесного структурного состояния расплава содержание алюминия должно быть порядка 0,03 % (рисунок 20).

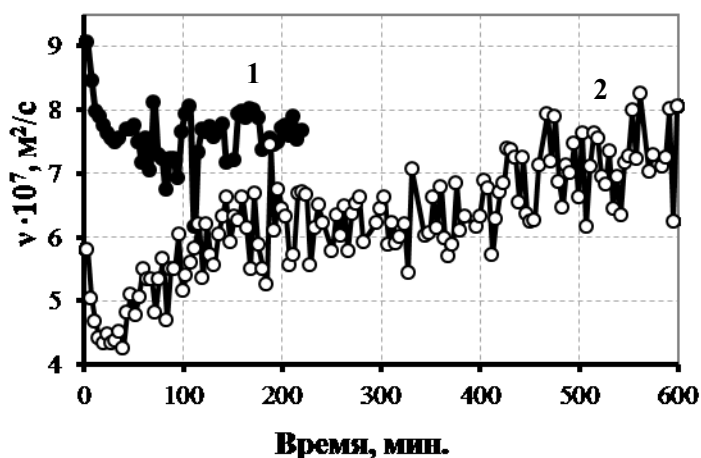


Рисунок 20 – Влияние глубины раскисления алюминием на динамику формирования расплава при науглероживании железа из расчета ввода 0,1 масс. % углерода в ходе изотермической выдержки при 1600 °С. Окисленность исходного расплава железа – 625 ppm. Остаточная концентрация алюминия: 1 – 0,03 масс.%; 2 – 0,005 масс.%

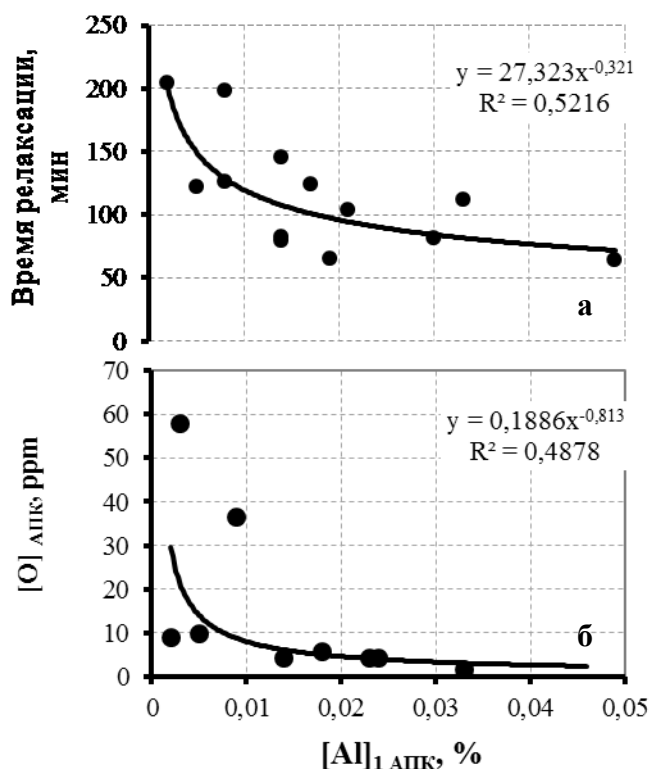


Рисунок 21 – Зависимость степени равновесности промышленных расплавов (а) и глубины раскисления металла по приходу на установку «печь-ковш» (б) от содержания алюминия в металле в начале внепечной обработки

Исследования степени равновесности промышленных расплавов (рисунок 21) и глубины раскисления металла по приходу на установку «печь-ковш» позволили регламентировать значение минимально необходимой концентрации алюминия в металле диапазоном 0,015 ÷ 0,020 %.

Стабильность получения требуемой концентрации алюминия существенно зависит от качества алюминийсодержащих материалов. Установлено, что эффективность использования гранулированного алюминия и ферроалюминия значительно выше, чем чушкового.

При выборе типа науглероживателя показаны значительные преимущества использования искусственных графитов и электродного боя над природными высокоуглеродистыми материалами типа антрацита с точки зрения не только металлургических свойств (меньшая зольность, меньшее содержание влаги, летучих и азота), но и установленного экспериментально влияния типа науглероживателя на качество получаемого расплава (рисунок 22).

В результате поэтапного совершенствования (таблица 1) разработан современный вариант комплексной технологии раскисления и науглероживания высокоокисленного полупродукта при выплавке трубных сталей в ДСП на твердой завалке, основными положениями которого являются:

- опережающее раскисление металла гранулированным алюминием с получением в металле не менее 0,015-0,020 % алюминия;
- использование для науглероживания полупродукта искусственных графитов или электродного боя;
- минимизация корректировок по углероду на установке «печь-ковш» величиной не более 0,05-0,07% и смещение их на начальные этапы внепечной обработки.

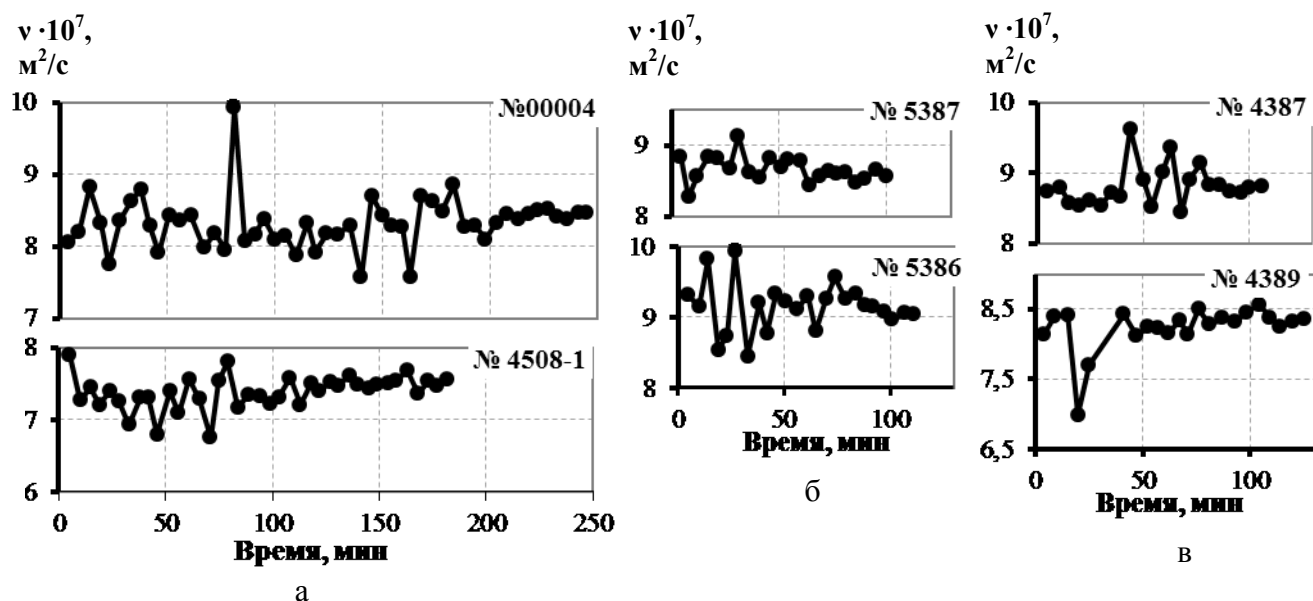


Рисунок 22 - Влияние типа науглероживателя на равновесность расплава стали Д: а – природные углеродсодержащие материалы; б – искусственные графиты; в – электродный бой

Таблица 1 - Показатели науглероживания и раскисления металла на примере стали марки Д в ходе поэтапного совершенствования технологии выплавки трубных сталей из высокоокисленного полупродукта ДСП

Период	Брак НЛЗ Ø 360, 400мм по дефекту «холодная продольная трещина», %	Расход алюминий- и углеродсодержащих материалов в ковш на выпуске плавки из ДСП, кг/ковш				Расход углеродсодержащих материалов на УВОС, кг/ковш	
		FeAl50	AlГРАН	Антрацит или ВУМ	Графит	ВУМ	С-проволока
1	8,69	100	70	450	-	-	до 150
2а	2,18 ÷ 2,8	450	200	400	-	100÷200	до 100
2б	3,17	450	200	500	-	100÷150	до 150
3а	0,00 ÷ 0,49	450	200	-	450	-	до 100
3б	0,01	500	270	-	450	-	до 100

Параллельно были решены задачи десульфурации полупродукта на выпуске. Степень десульфурации в период выпуска гарантируется величиной не менее 50 и достигает 80% за счет использования извести и ряда других патентуемых материалов в ковш.

Внедрение разработанной комплексной технологии раскисления, науглероживания и десульфурации при производстве трубных сталей из низкоуглеродистого полупродукта ДСП показало значительную эффективность:

– резко снижен брак непрерывнолитой заготовки по дефекту «холодная продольная трещина»: с 8,69 % практически до нуля;

- брак труб по наружной плене снижен практически в 10 раз;
- получено существенное возрастание эксплуатационных свойств готовой стали (рисунок 23). При этом может быть отмечено одновременное возрастание как прочностных, так и пластических свойств.

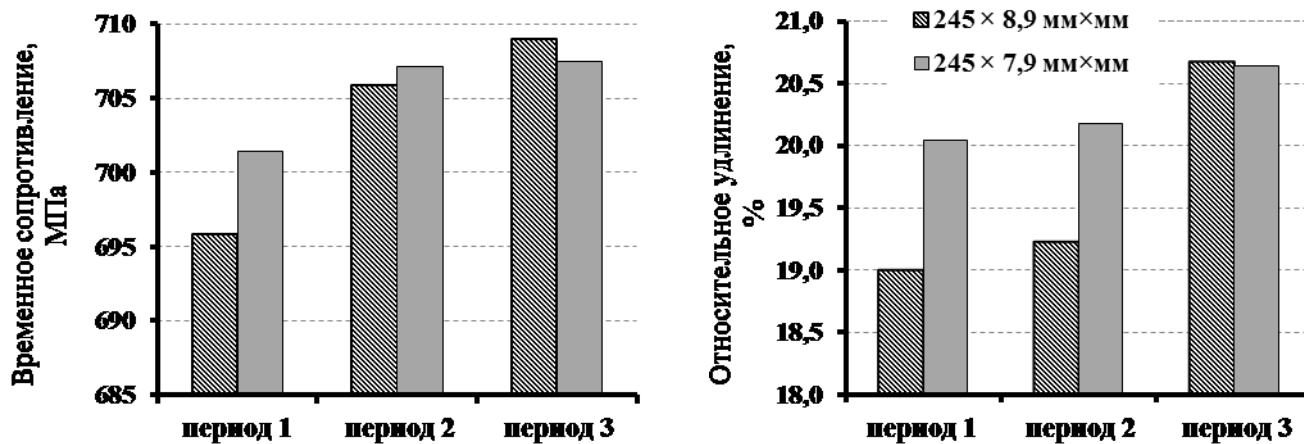


Рисунок 23 - Динамика изменения средних значений эксплуатационных свойств стали Д по периодам развития технологии

Анализ степени неравновесности расплавов позволил сделать заключение, что, несмотря на существенно большую степень науглероживания при производстве стали из низкоуглеродистого полупродукта ДСП, в результате реализации комплексной технологии раскисления, науглероживания и десульфурации металла, удалось обеспечить качество расплава, не уступающее случаю производства полупродукта в мартеновской печи.

Развитие технологического регламента в условиях реального промышленного производства, в большинстве случаев, является оптимизационной задачей, которая в качестве критериев оптимизации, наряду с эффективностью решения технологических задач и качеством металлопродукции, особое внимание уделяет экономической эффективности. Это предопределило целесообразность исследований эффективности использования для производства трубных сталей из полупродукта ДСП карбида кремния.

Глава 5. Разработка и исследование технологии науглероживания металла с использованием карбида кремния

Пятая глава посвящена физико-химическому анализу и разработке технологии использования карбида кремния при науглероживании полупродукта. Карбид кремния рассматривали как комплексный материал, содержащий углерод и раскислитель.

С использованием новых термодинамических данных по элементам реакции



получено оригинальное уравнение для температурной зависимости константы равновесия

$$\lg K = \lg([\text{Si}] \cdot [\text{C}]) = -\frac{694,2}{T} + 5,052$$

принципиально не меняющее ранее высказанных мнений (Выплавка стали в дуговых печах машиностроительного комплекса с заменой чугуна углеродкарбидкремниевыми брикетами / М. И. Гасик, А. Н. Овчарук, И. Б. Деревянко, А. Д. Подольчук, А. Б. Никонов, Н. Ф. Гимадеев, О. Н. Рахматулина, Н. П. Рябинкин // *Электротехнология*. - 2006. - № 9. - С. 2-13) о практической необратимости этой реакции ($K_p = 4,91 \cdot 10^4$ при $T = 1923$ К). Поэтому при разработке технологии использования карбида кремния как средства науглероживания полупродукта базировались на изучении кинетики его растворения в жидком металле и закономерностей формирования структурно однородных железоуглеродистых расплавов в сопоставлении с особенностями этих процессов при использовании графитов.

Используя подходы, изложенные в работе А.И. Сотникова (Сотников А.И. *Скорость диффузионного растворения твердых частиц в металлических расплавах* // *Расплавы*. – 1991. - №2. – С. 110-112), нами была сделана сравнительная оценка времени полного растворения частиц графита и карбида кремния меньше критического размера (по оценке М.Я. Меджибожского, В.И. Сельского и др. (*Порошкообразные материалы в сталеплавильном производстве* / М.Я. Меджибожский, В.И. Сельский, В.Е. Купершток, И.Б. Шукстунский, И.И. Пелипенко – Киев: «Техніка», 1974. – 184 с.) $10^{-2} \div 10^{-1}$ см), когда растворение протекает преимущественно за счет молекулярной диффузии и вкладом конвективной диффузии можно пренебречь.

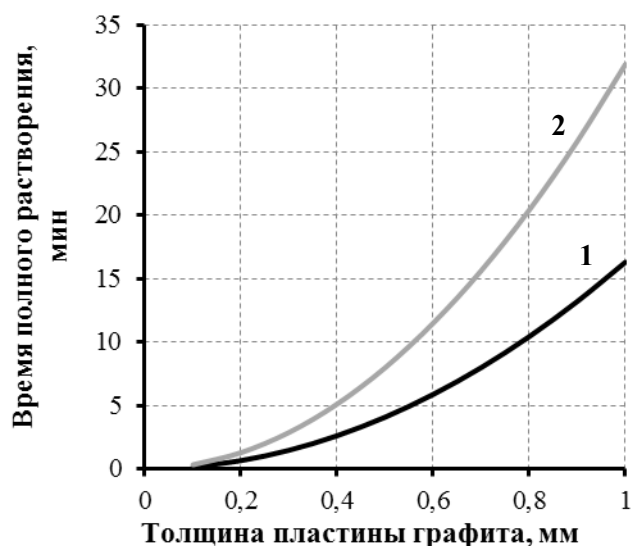


Рисунок 24 – Зависимость времени полного растворения в режиме молекулярной диффузии от размера частицы: 1 – графит; 2 – SiC

Представленные на рисунке 24 результаты расчетов для науглероживания железа, не содержащего кислород, свидетельствуют, что при одном размере частицы время полного растворения карбида кремния превышает аналогичное время для графита. Таким образом, в случае науглероживания раскисленного металла замена графита на карбид кремния значительно снижает скорость растворения карбюратора, увеличивая продолжительность формирования гомогенного расплава и снижая вероятность завершения даже макропроцессов науглероживания в условиях ограниченного времени технологических этапов при производстве стали высокоинтенсивными процессами.

Причина меньшей скорости растворения карбида кремния связана с параллельным переходом в металл кремния, снижающего растворимость углерода в приграничном слое металла. Очевидно, что при увеличении окисленности исходного металла будет возрастать степень развития процесса окисления кремния, протекающего одновременно с растворением карбида

кремния. Это позволяет сделать вывод о целесообразности использования карбида кремния для присадки в высокоокисленный расплав, когда за счет взаимодействия с кислородом кремний удаляется из металла.

В связи с тем, что науглероживание является одним из наиболее значимых источников неравновесности расплавов трубных сталей, существенно влияющих на качество литого и деформированного металла, изучение закономерностей формирования равновесных, микрооднородных структурных состояний расплавов железа при науглероживании, в том числе карбидами, должно рассматриваться как необходимое условие теоретической формулировки условий, гарантирующих заданное качество металла.

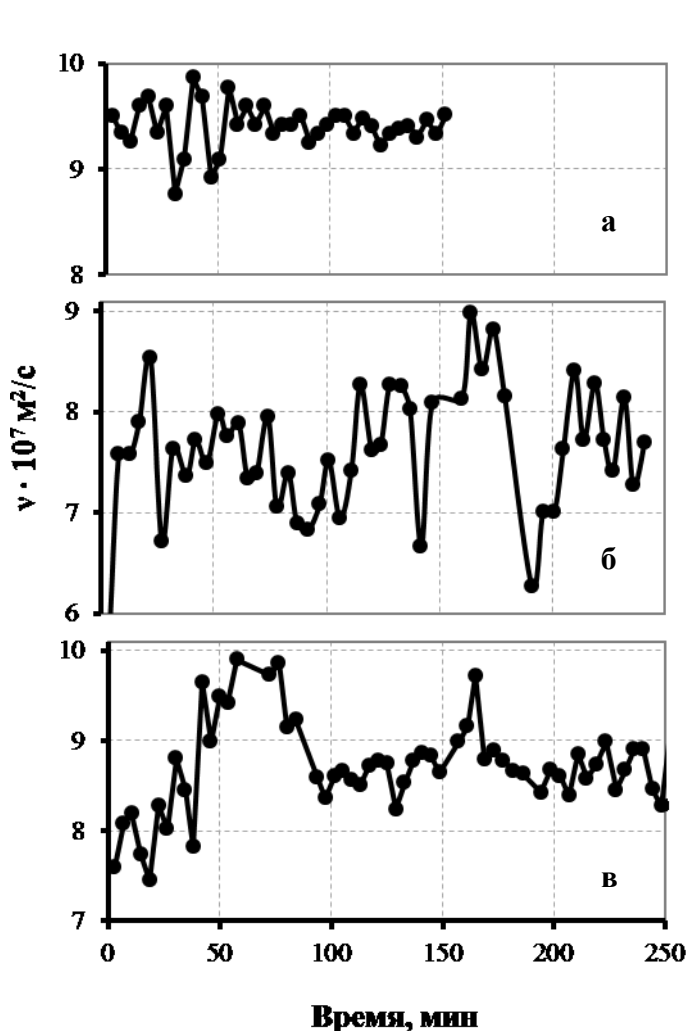


Рисунок 25 – Сопоставление динамики формирования расплава при науглероживании (из расчета ввода 0,1% углерода) графитом железа с окисленностью 20 ppm (а) и 60 ppm (б) и карбидом кремния железа с окисленностью 20 ppm (в)

Методом вискозиметрии экспериментально изучены закономерности формирования микрооднородных расплавов при науглероживании карбидом кремния в сопоставлении с науглероживанием графитом. Представленные на рисунке 25 результаты исследований указывают на то, что снижение окисленности исходного металла как основополагающий принцип повышения эффективности науглероживания графитом не выполняется при использовании в качестве реагента для науглероживания карбида кремния. А именно, в случае науглероживания графитом наиболее быстро переход в равновесное структурное состояние расплава происходит при минимальной окисленности: в то время как при окисленности 60 ppm формирование равновесного структурного состояния за время эксперимента (порядка 4 часов) не зафиксировано (рисунок 25-б), снижение окисленности до 20 ppm обеспечило переход расплава в равновесное состояние после 60-минутной выдержки (рисунок 25-а). В то же время при науглероживании железа карбидом кремния в условиях низкой окисленности металла (20 ppm) установление равновесия за время эксперимента (более 4 часов) не было достигнуто (рисунок 25-в).

На рисунке 26 сопоставлены экспериментальные данные по формированию расплава при науглероживании прецизионного сплава «Fe-0,25%Si» графитом и чистого железа карбидом кремния, которые позволили связать повышенное время релаксации при науглероживании карбидом кремния с отрицательным влиянием кремния на микрооднородное распределение углерода в расплаве железа.

Таким образом, присутствие в металле кремния отрицательно влияет не только на макропроцессы растворения карбюризатора, но и на характер формирования расплава после науглероживания. При анализе природы влияния кремния на характер формирования расплавов исходили из представлений о преимущественном растворении атомарного углерода в ГЦК-подобной упаковке атомов расплава. Ограниченная растворимость углерода в ОЦК-подобных упаковках способствует образованию неравновесных кластеров типа Fe_xC . Известная ферритообразующая роль кремния в расплаве, по нашему мнению, способствует ОЦК-подобной упаковке железа и, таким образом, ограничивает формирование равновесных расплавов с углеродом. С этих позиций влияние кремния на формирование расплава при науглероживании железа аналогично влиянию кислорода.

Необходимость ограничения содержания кремния при формировании железоуглеродистых расплавов позволила обоснованно предположить, что окисленность исходного расплава при науглероживании карбидом кремния существенно влияет на характер формирования расплава при науглероживании. Для проверки этого положения была поставлена серия специальных экспериментов по науглероживанию карбидом расплавов железа с высокой окисленностью.

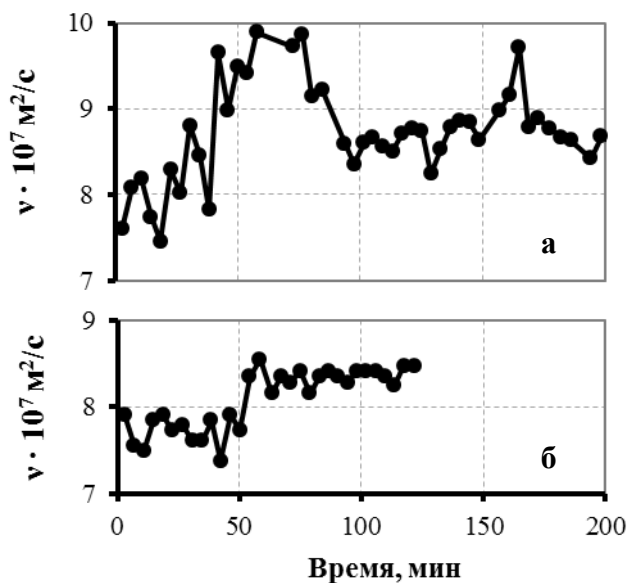


Рисунок 26 – Сопоставление динамики формирования расплава при науглероживании сплава «Fe-0,25%Si» графитом (а) и чистого железа карбидом кремния (б) при окисленности 20 ppm

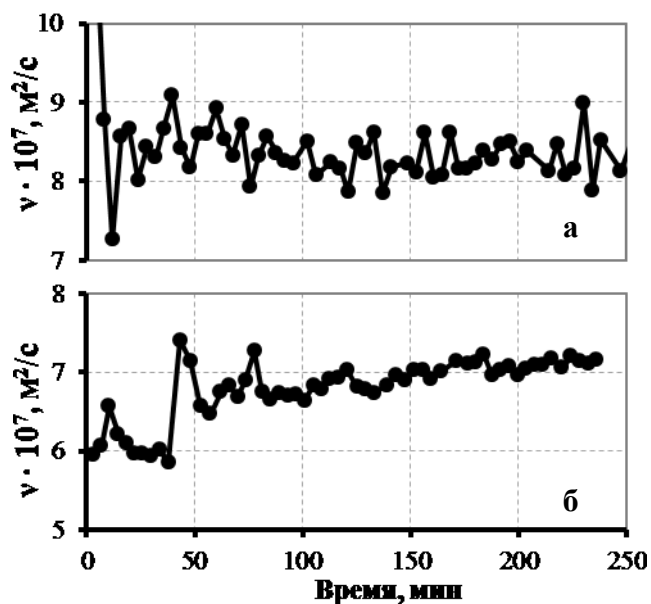


Рисунок 27 – Сопоставление динамики формирования расплава при науглероживании карбидом кремния чистого железа с различной окисленностью: а – 20 ppm; б – 500 ppm

На рисунке 27 приведены данные по формированию расплава при науглероживании карбидом кремния (из расчета ввода 0,1% углерода) в случаях окисленности металла 200 и 500 ppm, что при 1600 °С соответствует концентрации в металле 0,06 и 0,01% кремния. В случае концентрации кислорода 200 ppm (рисунок 27 – а) установление равновесия при науглероживании железа карбидом кремния за время эксперимента (более 4 часов) не зафиксировано. При науглероживании железа с концентрацией кислорода 500 ppm характер формирования расплава резко меняется: после выдержки в течение 150 минут зафиксирован переход расплава в микрооднородное, равновесное структурное состояние (рисунок 27 - б). Это может быть связано с взаимной нейтрализацией отрицательного влияния на формирование равновесного структурного состояния железоуглеродистого расплава кремния и кислорода в результате их взаимодействия.

Таким образом, результаты исследований закономерностей формирования микрооднородных расплавов при науглероживании карбидом кремния подтвердили вывод, сделанный при изучении кинетики процесса, о целесообразности использования карбида кремния как реагента для первичного науглероживания высокоокисленного полупродукта ДСП.

На основе результатов физико-химического анализа и изучения закономерностей формирования расплавов выдвинуты следующие технологические принципы использования карбида кремния и графитов для науглероживания расплава железа:

- использование карбида кремния для решения комплексной задачи предварительного раскисления и частичного науглероживания непосредственно высокоокисленного полупродукта;
- приоритетное использования графита при науглероживании раскисленного полупродукта с минимизацией при этом расхода карбида кремния.

В развитие выдвинутых принципов разработан вариант комплексной технологии раскисления и науглероживания с использованием карбидкремнийсодержащих материалов при производстве трубных марок стали с содержанием углерода 0,2% и более, особенностями которого являются использование двух типов науглероживателей: карбида кремния и графита, - стадийность и порядок ввода материалов. При наполнении сталеразливочного ковша на 15-20% в ковш отдаются карбид кремния с марганцевыми ферросплавами. Расход карбида кремния ограничен содержанием кремния в заданной марке стали. Для углеродистых марок стали степень науглероживания карбидом кремния не превышает 0,1%. При наполнении половины ковша в металл последовательно задаются гранулированный алюминий, графит марки ГИИ-А или электродный бой. Внедрение разработанного варианта технологии при выплавке трубных сталей в ДСП в сравнении с вариантом науглероживания только графитами позволило сохранить показатели процесса по качеству жидкого металла (рисунок 28), по качеству НЛЗ и уровень эксплуатационных свойств металла труб (рисунок 29).

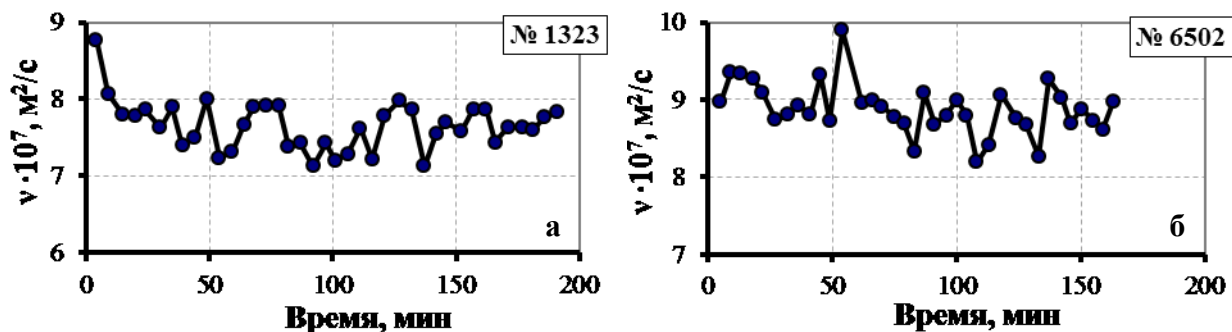


Рисунок 28 – Влияние технологии науглероживания полупродукта на выпуске из ДСП на неравновесность расплава стали Д. Тип науглероживателя: а – ГИИ, б – ГИИ совместно с SiC

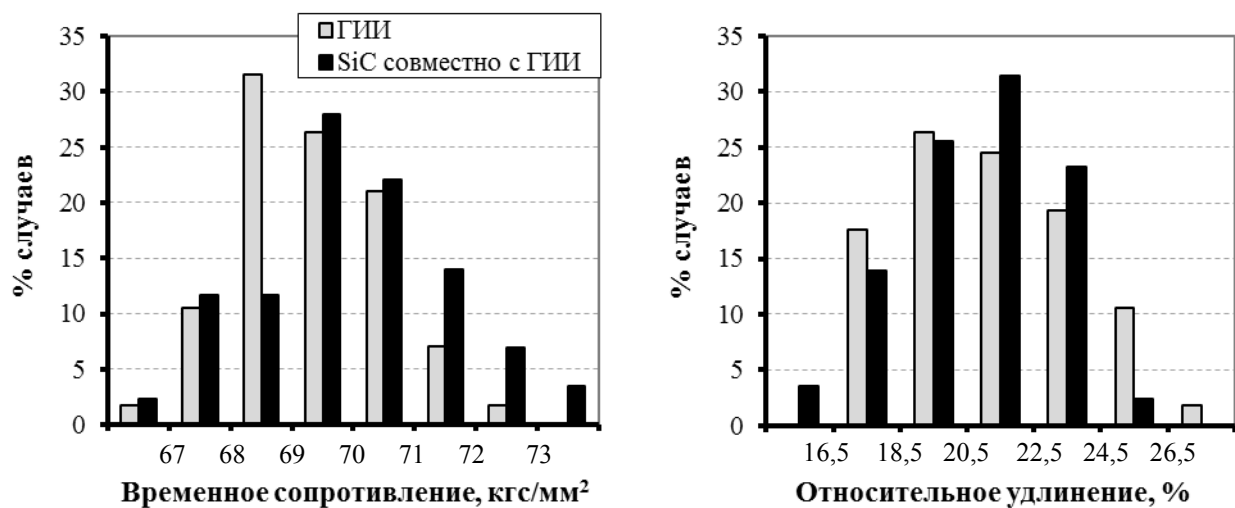


Рисунок 29 – Влияние технологии науглероживания высокоокисленного полупродукта на выпуске из ДСП на эксплуатационные свойства стали Д

В сочетании с экономическим эффектом более 125 млн. рублей в год это позволяет рассматривать разработанную технологию науглероживания с использованием карбида кремния как одно из перспективных решений совершенствования технологии получения высококачественной стали из высокоокисленного полупродукта ДСП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен цикл лабораторных и технологических исследований, позволивший установить, что науглероживание металла, как один из важнейших элементов современной технологической схемы получения стали из полупродукта, связано с изменением равновесности структурного состояния расплава и формированием микронеоднородности по углероду, что может сопровождаться снижением качества литой заготовки и эксплуатационных свойств деформированного металла. Показано, что одной из первоочередных технологических задач

- науглероживания металла является формирование равновесного, микрооднородного по распределению углерода расплава и необходимость наиболее полного решения этой задачи на начальных этапах обработки полупродукта.
2. Исследованиями реологических свойств жидкого металла впервые установлено, что формирование микрооднородных равновесных расплавов в процессе науглероживания существенно замедляется в присутствии в металле примесных элементов кислорода и серы в количествах, характерных как для начальных (до 500 ppm и более), так и завершающих (менее 50 ppm) стадий обработки полупродукта.
 3. На основе результатов лабораторных и промышленных исследований сформулированы технологические принципы повышения эффективности науглероживания полупродукта ДСП:
 - регламентация окисленности полупродукта на уровне 500÷800 ppm;
 - комплексное решение технологических задач раскисления, науглероживания и десульфурации с опережающим глубоким рафинированием металла от примесей;
 - минимизация степени науглероживания в ходе внепечной обработки.
 4. На основании детальных промышленных исследований установлена возможность и разработаны параметры получения целевой окисленности полупродукта за счет согласованной оптимизации режима продувки кислородом, технологии присадки в ДСП антрацита и шлакового режима. Предложены оптимальные технологические параметры выплавки полупродукта в сверхмощной ДСП-135 на 100-процентной твердой завалке:
 - общий расход кислорода - 38÷43 м³/т;
 - присадка антрацита, вводимого в ДСП, (22÷23 кг/т) в завалку (в бадьи) – 50÷52% от общего количества и через систему бункеров ДСП («сверху») - 39÷41 %;
 - регламентация содержания в шлаке FeO диапазоном 20÷30%, MgO 8÷9% при основности 2,0-2,3.
 5. Разработана комплексная технология раскисления и науглероживания полупродукта при выплавке трубных сталей в ДСП-135 на твердой завалке:
 - опережающее раскисление;
 - использование для раскисления гранулированного алюминия из расчета получения остаточной концентрации алюминия в металле не менее 0,015-0,020 %;
 - десульфурация полупродукта на выпуске патентуемыми шлакообразующими смесями;
 - исключение применения для науглероживания природных углеродсодержащих материалов и использование в качестве базового материала искусственных графитов или электродного боя из расчета получения концентрации углерода на нижнем уровне марочных значений;
 - проведение, в случае необходимости, корректировок по углероду на УВОС (не более 0,05-0,07%) на начальных стадиях внепечной обработки присадкой проволочных материалов с графитовым наполнителем.

6. Выполнен физико-химический анализ и предложены технологические принципы использования карбида кремния при науглероживании полупродукта. Разработан вариант комплексной технологии раскисления и науглероживания с использованием карбидкремнийсодержащих материалов для предварительного раскисления высокоокисленного полупродукта при производстве марок стали с содержанием углерода 0,2% и более.
7. Внедрение разработанной комплексной технологии раскисления и науглероживания при производстве трубных сталей из низкоуглеродистого полупродукта ДСП показало ее значительную эффективность:
 - резко снижен с 8,69 % практически до нуля брак непрерывнолитой заготовки по дефекту «холодная продольная трещина»;
 - снижен практически в 10 раз брак труб по наружной сталеплавильной плене;
 - получено существенное возрастание эксплуатационных свойств готовой стали. При этом может быть достигнуто одновременное возрастание как прочностных, так и пластических характеристик;
 - внедрение карбида кремния в технологию науглероживания при выплавке трубных сталей в ДСП-135 дало экономический эффект более 125 млн. рублей в год.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования

1. Результаты исследований являются актуальными для разработки технологии производства ответственных сталей, полученных на базе малоуглеродистого полупродукта, в том числе колесных и рессорных марок стали.
2. Дальнейших исследований требуют вопросы: степени науглероживания по стадиям процесса науглероживания (в том числе науглероживание в твёрдом состоянии), расширения сортамента материалов для науглероживания (в том числе использование карбида кальция), а также подготовки расплава перед науглероживанием с точки зрения режимов (интенсивности) плавления.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Мурзин А.В. Влияние науглероживания полупродукта в условиях внепечной обработки на качество труб из непрерывнолитой стали / А.В. Мурзин, А.И. Степанов, С.П. Бурмасов, А.Г. Гудов, И.П. Пархоменко, Е.Г. Житлухин // Сталь. 2009. № 7. С. 17-22 (0,25 п.л. / 0,2 п.л.).

Murzin, A.V., Stepanov, A.I., Burmasov, S.P., Gudov, A.G., Parkhomenko, I.P., Zhitlukhin, E.G. Influence of carburization of the intermediate product in ladle treatment on the quality of continuous-cast steel pipe (2009) Steel in Translation, 39 (7), pp. 570-572 (0,12 п.л. / 0,1 п.л.).

2. Мурзин А.В. Совершенствование технологии современного сталеплавильного производства на основе закономерностей формирования металлических расплавов / М.В. Зуев, С.П. Бурмасов, А.И. Степанов, А.Г. Гудов, А.В. Мурзин, Е.Г. Житлухин // Сталь. 2013. № 2. С. 27-29 (0,12 п.л. / 0,09 п.л.).

Zuev, M.V., Burmasov, S.P., Stepanov, A.I., Gudov, A.G., Murzin, A.V., Zhitlukhin, E.G. Improvement in steel smelting by studying melt behavior (2013) *Steel in Translation*, 43 (2), pp. 106-109 (0,17 п.л. / 0,12 п.л.).

3. Мурзин А.В. Исследование и оптимизация технологии науглероживания металла при выплавке стали с использование полупродукта ДСП / М.В. Зуев, С.П. Бурмасов, А.Г. Гудов, А.В. Мурзин, В.Г. Кузякин // *Сталь*. 2014. № 6. С. 25-30 (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).

Zuev, M.V., Burmasov, S.P., Gudov, A.G., Murzin, A.V., Kuzyakin, V.G. Carburization of crude steel from a superpowerful arc furnace (2014) *Steel in Translation*, 44 (6), pp. 433-438 (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).

4. Мурзин А.В. Совершенствование технологии современного сталеплавильного производства на основе изучения закономерностей формирования металлических расплавов / М.В. Зуев, С.П. Бурмасов, А.И. Степанов, А.Г. Гудов, А.В. Мурзин, Е.Г. Житлухин // *Электрометаллургия*. 2013. № 4. С. 10-15 (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).

Другие публикации:

5. Мурзин А.В. Влияние науглероживания полупродукта на свойства металла и качество труб в условиях внепечной обработки и непрерывной разливки стали / А.В. Мурзин, А.И. Степанов, С.П. Бурмасов, А.Г. Гудов, И.П. Пархоменко // *Труды XVI международной научно-практической конференции «ТРУБЫ-2008»* (г. Челябинск, 15-17 сентября 2008 г.). ОАО «РосНИТИ, Челябинск, 2008. С. 242-245 (0,17 п.л. / 0,1 п.л.).

6. Мурзин А.В. Неравновесность жидкого металла и качество стали / С.П. Бурмасов, А.Г. Гудов, А.И. Степанов, А.В. Мурзин, А.А. Карпов, М.В. Зуев, Л.А. Смирнов // *Новые технологии и материалы в металлургии: Сб. науч. тр. - Екатеринбург: УрО РАН, 2010. С. 242-260 (0,75 п.л. / 0,2 п.л.).*

7. Мурзин А.В. Теоретические и технологические аспекты науглероживания металла при производстве стали из полупродукта / А.Г. Гудов, С.П. Бурмасов, М.В. Зуев, А.В. Мурзин, Д.А. Попцов // *Новые технологии и материалы в металлургии: сб. науч. трудов. Екатеринбург: Межрегиональный издательский центр, 2015. С. 269-282 (0,54 п.л. / 0,25 п.л.).*

8. Мурзин А.В. Влияние примесного состава полупродукта на формирование расплавов при науглероживании / А.Г. Гудов, С.П. Бурмасов, А.В. Мурзин, Д.А. Попцов // *Сб. тр. XIII международного конгресса сталеплавателей* (г. Полевской, 12-18 октября 2014 г.). Москва – Полевской, 2014. С. 265-269 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

9. Мурзин А.В. Влияние технологии производства полупродукта на качество жидкого металла и эксплуатационные свойства рессорной стали / С.Н. Филиппев, С.П. Бурмасов, А.Г. Гудов, А.В. Мурзин, А.А. Карпов, С.А. Трофимов, Е.А. Васин, Д.А. Попцов // *Сб. тр. XIII международного конгресса сталеплавателей* (г. Полевской, 12-18 октября 2014 г.). Москва – Полевской, 2014. С. 82-87 (0,25 п.л. / 0,1 п.л.).

10. Мурзин А.В. Исследование и совершенствование технологии науглероживания металла при выплавке трубных сталей с использованием полупродукта ДСП / А.И. Степанов, С.П. Бурмасов, А.В. Мурзин, А.Г. Гудов, Е.Г. Житлухин, В.Г. Кузякин, А.В. Рябухин // *Сб. тр. XIII международного конгресса сталеплавателей* (г. Полевской, 12-18 октября 2014 г.). Москва – Полевской, 2014. С. 258-265 (0,33 п.л. / 0,25 п.л.).

11. Мурзин А.В. Влияние науглероживания полупродукта на свойства металла и качество труб в условиях внепечной обработки и непрерывной разливки стали / А.В. Мурзин, А.И. Степанов, С.П. Бурмасов, А.Г. Гудов, И.П. Пархоменко, Е.Г. Житлухин // Сб. тр. X международного конгресса сталеплавателей (г. Магнитогорск, 13-17 октября 2008 г.). Москва, 2009. С. 617-622 (0,25 п.л. / 0,12 п.л.).

12. Мурзин А.В. Исследование окисленности полупродукта и качества металла при производстве трубных сталей современным дуговым процессом / М.В. Зуев, С.П. Бурмасов, А.В. Мурзин, А.И. Степанов, А.Г. Гудов, Е.Г. Житлухин, М.В. Ушаков, Е.В. Пузакова // Сб. тр. XI международного конгресса сталеплавателей (г. Н. Тагил, 3-8 октября 2010 г.). Москва, 2011. С. 211-215 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

13. Мурзин А.В. Совершенствование технологии современного сталеплавильного производства на основе изучения закономерностей формирования металлических расплавов / М.В. Зуев, А.И. Степанов, А.В. Мурзин, Е.Г. Житлухин, С.П. Бурмасов, А.Г. Гудов // Сб. тр. XII международного конгресса сталеплавателей (г. Выкса, 22-26 октября 2012 г.). Москва, 2013. С. 75-78 (0,17 п.л. / 0,1 п.л.).