

На правах рукописи



ГОРКУША ДМИТРИЙ ВИТАЛЬЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ И КОВШЕВОЙ
ОБРАБОТКИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ КЛАССА IF ДЛЯ
ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА
ПРОДУКЦИИ**

**Специальность 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких
металлов**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук и на кафедре Металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов НИТУ «МИСиС»

Научный руководитель: **Григорович Константин Всеволодович**
Академик РАН, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Шешуков Олег Юрьевич**
Доктор технических наук, профессор, директор института новых материалов и технологий, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Житенев Андрей Игоревич
Кандидат технических наук, ведущий инженер научно-технологического комплекса «Новые технологии и материалы», ФГАОУ ВО СПбПУ, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина»

Защита диссертации состоится «22» марта 2022 г. в 16 часов на заседании Диссертационного совета 24.2.324.01 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Г.И. Носова, а также на официальном сайте МГТУ им. Г.И. Носова <https://www.magtu.ru>.

Автореферат диссертации размещен на сайте МГТУ им. Г.И. Носова <https://www.magtu.ru> и на сайте ВАК <http://vak.ed.gov.ru>

Автореферат разослан " ____ " _____ 2022 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мезин Игорь Юрьевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Разработка новых более совершенных материалов для автомобильной промышленности позволяет производить более легкий кузов без потери прочностных характеристик конструкции. Это стало возможным благодаря созданию и последующему внедрению в производство таких марок стали как IF (Interstitial Free) – стали без свободных атомов внедрения и IF-ВН (Bake Hardening) – стали с упрочнением при горячей сушке. Поэтому совершенствование научных основ и технологических параметров достижения стабильного высокого качества сталей для глубокой вытяжки является актуальной задачей. В работе приведен краткий обзор истории появления IF стали и современное состояние производства IF стали в России. Изучение состояния вопроса показало, что стали класса IF производятся на предприятиях по различным технологическим схемам, в зависимости от наличия того или иного оборудования, однако обработка расплава на циркуляционном или камерном вакуумматорах является обязательной составляющей любой технологии. Качество произведенной стали зависит от многих параметров, одним из которых для IF-ВН сталей является достижение ВН-эффекта. В работе проведено исследование ключевых параметров достижения ВН-эффекта в сверхнизкоуглеродистых сталях для глубокой вытяжки. Другим важнейшим критерием качества для сталей класса IF и IF-ВН - является чистота металла по неметаллическим включениям (НВ), которые негативно влияют на пластические свойства материала, приводят к образованию поверхностных дефектов плоского проката и снижают технологичность производства из-за уменьшения скорости разлива стали, так как вызывают «зарастание» сталеразливочных стаканов. В работе представлены результаты исследования содержания, состава, размеров и морфологии неметаллических включений в пробах металла отобранных на всех этапах технологического процесса производства стали класса IF и IF-ВН методами количественного металлографического анализ шлифа, электролитического растворения (ЭР) с последующим рентгеновским микроанализом выделенных включений, Оже-электронной спектроскопии, фракционного газового анализа (ФГА). В результате анализа включений в исследованных образцах на сканирующем электронном микроскопе по морфологическим признакам выделены характерные типы включений, которые снижают эксплуатационные свойства и прочностные характеристики IF и IF-ВН сталей. Результаты анализа неметаллических включений в пробах металла, полученных методом ЭР и растровой электронной микроскопии находятся в хорошем соответствии с результатами определения оксидных неметаллических включений методом ФГА. Методом фракционного газового анализа показана динамика изменения содержания различных типов оксидных неметаллических включений в металле по ходу внепечной обработки стали. Показано, что применение метода ФГА позволяет проводить анализ причин образования НВ в металле и вносить корректирующие операции в технологический процесс.

Целью настоящей работы было, исследование и оптимизация технологии внепечной обработки IF и IF-ВН сталей для стабильного достижения ВН-эффекта и снижения негативного влияния неметаллических включений, влияющих на механические и коррозионные свойства металла, на технологичность производства и качество готовой продукции. Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

1) На образцах металла промышленных плавок, проведены исследования и установлены ключевые параметры достижения ВН эффекта в сверхнизкоуглеродистых сталях для глубокой вытяжки и предложены параметры промышленной технологии, обеспечивающие достижение стабильного качества конечного продукта.

2) Методами количественной металлографии, электролитического растворения образцов (ЭР) с последующим рентгеновским электрон- зондовым микроанализом (ЭЗМА) выделенных неметаллических включений на растровом электронном микроскопе, Оже-электронной спектроскопии и фракционного газового анализа (ФГА) проведены

исследования содержания, состава, размеров и морфологии неметаллических включений (НВ) в пробах металла отобранных на этапах выплавки, внепечной обработки, разливки по всей технологической цепочке производства стали класса IF.

3) Предложена и реализована комбинация методов ФГА и ЭР ЭЗМА для исследования количественного и качественного состава неметаллических включений и оценки чистоты сталей по неметаллическим включениям.

4) Проведены расчеты комплексного раскисления стали кальций содержащими лигатурами для модифицирования неметаллических включений с целью снижения их вредного влияния на технологичность процесса и качество готовой продукции. Сформулированы технологические параметры ввода кальция для модифицирования неметаллических включений.

5) Проведено изучение динамики изменения содержания различных типов оксидных неметаллических включений по ходу внепечной обработки и разливки стали для глубокой вытяжки на двух Российских металлургических предприятиях. Применение метода ФГА для анализа причин образования НВ в металле позволило разработать корректирующие мероприятия в технологическом процессе по предотвращению затягивания разливочных стаканов в процессе непрерывной разливки.

6) Проведенный анализ технологии выплавки и внепечной обработки IF и IF-ВН сталей на отечественных предприятиях позволил сформулировать рекомендации для оптимизации технологии для стабильного получения IF ВН стали заданного состава и высокого качества.

Научная новизна.

В работе получены новые научные результаты:

1) Определены ключевые технологические параметры достижения ВН – эффекта в сталях класса IF, диапазоны значений $C_{эфф}$ – от 7 до 20 ppm, общего углерода и азота до 40 ppm каждого, определено влияние размера зерна.

2) Впервые разработана и практически реализована методика количественного определения неметаллических включений различных типов совместным применением двух методов анализа неметаллических включений: фракционного газового анализа (ФГА) и электролитического растворения с последующим микрорентгеноспектральным анализом НВ на растровом электронном микроскопе (ЭР ЭЗМА). Разработанная методика исследований позволила доказать ключевую роль включений оксидов титана на процессы зарастания разливочных стаканов.

3) С применением методов ФГА и ЭР ЭЗМА количественно определено влияние различных технологических операций на формирование, модифицирование и удаление неметаллических включений различных типов в раскисленных алюминием сталях. Впервые количественно показано влияние операций разливки на изменение содержания неметаллических включений в металле.

4) Впервые показано, что по результатам анализа образцов металла методом ФГА возможно прогнозировать вероятность затягивания сталеразливочных стаканов при разливке сталей класса IF, по пикам кривой газовой выделения

Практическая значимость работы.

1) Разработанный метод определения количественного и качественного состава неметаллических включений комбинацией двух методов ФГА и ЭР ЭЗМА успешно использован для исследования промышленных образцов IF сталей и проходит апробацию для анализа других марок стали.

2) Ключевые параметры достижения ВН – эффекта при производстве IF-ВН стали и рекомендуемые диапазоны значений $C_{эфф}$, углерода, азота—реализованы в практике производства IF-ВН сталей на двух отечественных предприятиях.

3) Проведенный анализ технологии выплавки и внепечной обработки IF и IF-ВН сталей на отечественных предприятиях позволил сформулировать рекомендации для корректировки промышленной технологии производства IF ВН стали с стабильным получением заданного состава и высокого качества.

Практическая значимость подтверждается полученной справкой от ПАО «Северсталь» об использовании результатов диссертационной работы в условиях ПАО «Северсталь».

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 20 научных работы: 5 статей опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Результаты работы доложены на 14 международных и Российских научных конференциях.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы из 118 наименований. Работа изложена на 151 странице машинописного текста, содержит 57 рисунков и 21 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования и сформулированы цели диссертационной работы.

В **первой главе**. Выполнен аналитический обзор литературы по теме диссертационной работы.

Проведен обзор сталей класса IF и IF-BF применяемых при производстве автомобилей и пути достижения упрочнения стали при сушке. Для производства внешних деталей кузова автомобиля требуется очень хорошая пластичность и поэтому используются IF стали (Interstitial Free – стали без свободных атомов внедрения), которые являются сверхнизкоуглеродистыми (содержание углерода в стали менее 30 ppm). Стали IF характеризуются высокой пластичностью и равномерным удлинением при штамповке. Сталь класса IF-ВН позволяет повышать прочность изготовленных из нее деталей за счет искусственного старения. Для проявления эффекта упрочнения стали при сушке, химический состав стали должен регулироваться таким образом, чтобы в стали оставалось 15-25 ppm углерода *эффективного* ($C_{эфф}$) За счет процесса искусственного старения предел прочности стальных деталей может увеличиться на 30 – 60 МПа. При этом полученная сталь не должна подвергаться старению и ухудшать свои свойства при транспортировке и хранении до конечного пользователя. Для автопроизводителей минимальный "срок годности" составляет не менее 3 месяцев.

В главе приведен обзор методов определения и факторы наличия ВН эффекта, а также факторы, влияющие на величину упрочнения при сушке, среди которых отмечено влияние содержания углерода, растворенного в твердом растворе, легирующих элементов, влияние размера зерна. Содержание $C_{эфф}$ в растворе α -Fe является главным фактором, определяющим наличие и величину ВН-эффекта. Растворенный углерод закрепляется на дислокациях при температуре сушки лакокрасочных покрытий тем самым вызывая упрочнение стали. Однако, увеличение углерода от 0 до 40 ppm увеличивает ВН эффект от 40 до 70 МПа, а дальнейшее увеличение растворенного углерода не оказывает влияния на величину ВН – эффекта.

Описан мировой опыт производства IF и IF-ВН сталей на таких предприятиях как Voest-Alpine Stahl Linz GmbH, Thyssen Krupp Stahl (Беккервет), National steel. Приведены

данные по химическому составу IF и IF-ВН стали, производимой на зарубежных предприятиях. Общее содержание углерода и азота не превышает 40 ppm каждого элемента в IF-ВН и IF сталях.

Определены основные типы неметаллических включений в IF и IF-ВН сталях, которые влияют на качество стали, такие как дефекты холоднокатаного листа и технологичность процесса производства - «зарастание» сталеразливочных стаканов. Основываясь на ранее проведенных исследованиях сделан вывод о том, что наиболее опасными включениями являются оксиды алюминия, а также о том, что присутствие титана в низкоуглеродистых и сверхнизкоуглеродистых марках стали вызывает значительное увеличение зарастания сталеразливочных стаканов особенно в сталях раскисленных алюминием. Описан процесс модификация неметаллических включений кальцием для снижения возможного вреда которые могут нанести неметаллические включения с точки зрения качества готовой продукции. Проведен сравнение различных методов анализа неметаллических включений, которые наиболее эффективно могут быть применены при контроле включений в сверхнизкоуглеродистых сталях. Показано, что каждый аналитический метод имеет ряд преимуществ и ограничений. Поэтому для получения достоверной и объективной информации о чистоте стали необходимо использовать несколько методов или их комбинацию.

На основании проведенного анализа были определены цели и задачи диссертационной работы:

- Определить влияние различных управляющих параметров на величину ВН-эффекта. Определить влияние общего содержания углерода и азота в металле, содержания «эффективного» свободного углерода, изучить влияние легирующих элементов на ВН эффект, а также влияние размера зерна.

- Определить наиболее опасные типы неметаллических включений влияющих на затягивание сталеразливочных стаканов, а также на отбраковку и качество поверхности стального листа.

- Изучить процессы образования, модифицирования и удаления различных неметаллических включений при внепечной обработке низкоуглеродистой стали класса IF.

- Определить влияние кальция на процессы модифицирования неметаллических включений в расплаве IF стали раскисленной алюминием.

- Провести анализ технологии выплавки и внепечной обработки IF и IF-ВН стали на двух отечественных предприятиях и дать рекомендации по корректировке технологии с целью уверенного получения стали с заданным химическим составом по углероду и азоту, заданным содержанием «эффективного» углерода, достижения заданного ВН-эффекта и снижения вредного влияния неметаллических включений.

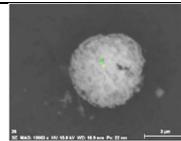
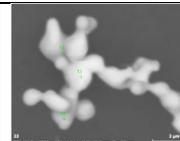
Во **второй** главе приведено описание разработанной комплексной методики анализа неметаллических включений методами фракционного газового анализа (ФГА) и электролитического растворения образца с последующим определением состава и морфологии неметаллических включений на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3700N, оборудованном энергодисперсионным рентгеновским микроанализом (ЭО ЭЗМА).

В качестве материалов для проведения методических экспериментов были использованы образцы модельных сплавов системы Fe-10% Ni выплавленные в высокочистых тиглях MgO в высокочастотной индукционной печи в атмосфере Ar, которые отличались системами последовательного раскисления:- титаном и цирконием (Ti/Zr) или титаном и магнием (Ti/Mg).

Исследования неметаллических включений в экспериментальных образцах методом электролитического растворения образцов ЭР ЭЗМА.

Для электролитического растворения (ЭР) образцов использовали специально подобранные растворы электролитов. После электролитического растворения металлической матрицы стального образца неметаллические включения и кластеры (которые являются стабильными и не растворялись в растворе электролита) были отфильтрованы на поверхности поликарбонатных мембранных пленочных фильтров с размером открытых пор 0,4 мкм. Характеристики НВ и их кластеров (такие как количество, размеры, химический состав и морфология) были оценены с помощью трехмерных исследований. По итогам анализа было выделено три группы неметаллических включений, представленных в таблице 1.

Таблица 1. Типы неметаллических включений и их характеристики, выделенные по итогам электролитического растворения.

Тип 1	Тип 2	Тип 3
		
Состав (масс%):		
49-100% FeO, 0-39% ZrO ₂ , 0-36% TiO _x , 0-11% Al ₂ O ₃	18-94% FeO, 0-78% ZrO ₂ , 4-33% TiO _x , 0-7% Al ₂ O ₃	0-24% FeO, 64-100% ZrO ₂ , 0-36% TiO _x , 0-1% Al ₂ O ₃
Размер включений (мкм):		
0,5 – 5,2	2,5 – 13,5	2,8 – 26,1
Соотношение сторон (AR):		
1 – 1,2	1 – 2,7	1 – 3,8

Общее количество различных оксидных включений в образцах оценивали с использованием метода фракционного газового анализа (ФГА). Для каждого из исследованных образцов были подготовлены три пробы металла весом около 1,0-1,5 г. Для каждого образца среднее значение трех или более параллельных определений было использовано для характеристики различных типов НВ в металле.

В работе приведены результаты ФГА для образцов двух типов экспериментов с раскислением расплава Ti и Zr, и Ti и Mg при различных схемах выдержки (1, 3 или 5 минут после введения раскислителей), показано изменение содержания и состава неметаллических включений в металле в зависимости от типа раскисления и условий эксперимента.

Были определены три основные группы оксидов. По температурам восстановления оксидов каждая группа соответствует определенному составу оксидных включений.

На рисунке 1 показаны определенные температурные диапазоны на кривых газовой выделения для образца Ti / Zr, которые были определены для T_m для каждой из 3 групп оксидов.

Для определения общего содержания оксидных неметаллических включений в каждом образце металла был применен Фракционный газовый анализ. Типичная эволюграмма, полученная во время анализа ФГА образца металла из эксперимента АЗ (Ti / Zr-3 мин), показана на рисунке 2. На этом рисунке пики, соответствующие содержанию кислорода в различных типах оксидных включений (ось Y1), относятся к

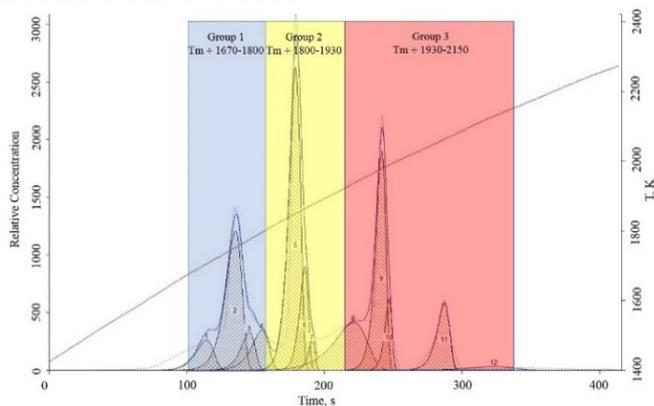


Рисунок 1. Определенные температурные диапазоны восстановления оксидов наложенные на кривые газовой выделения для образцов Ti / Zr.

неизотермическому восстановлению различных оксидных фаз углеродом в аналитическом расплаве при различных температурах аналитического расплава (ось Y2) и времени анализа (ось X). Реакция восстановления для различных оксидных фаз (таких как FeO, TiO_x, Al₂O₃, ZrO₂ или MgO) может быть записана следующей реакцией:

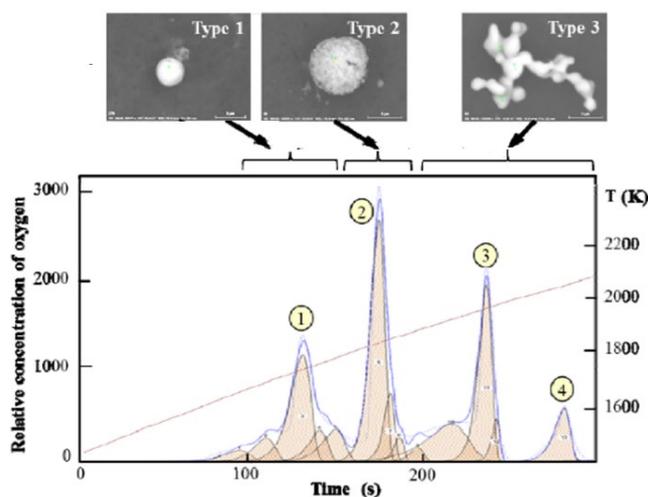
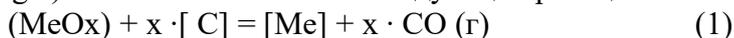


Рисунок 2. Типичная диаграмма ФГА образца металла из эксперимента АЗ (Ti / Zr-3 выдержка 3 мин).

коррелирует с включениями типа 1, содержащими в основном FeO (группы 1) или более высокие содержания TiO_x (группы 2). Пик 2 соответствуют включениям типа 2, имеющим относительно более высокое содержание TiO_x и ZrO₂.

Пики 3 и 4 соответствуют высокотемпературным оксидам, таким как ZrO₂. Эти пики могут быть получены при восстановлении кластеров типа 3, имеющих самое высокое содержание ZrO₂. Хорошие корреляции между результатами, полученными методами ФГА и ЭР ЭЗМА, были установлены и для других образцов металлов в экспериментах с Ti / Zr и Ti / Mg.

Для подтверждения сходимости результатов, полученных двумя разными методами, были построены графики (рисунок 3), показывающие соотношение различных типов и групп оксидов, полученных: а) после электролитического растворения и б) после метода ФГА. Результаты

представленные на рисунке 3 демонстрируют хорошую корреляцию в определении разных типов включений двумя методами ЭР и ФГА.

Сочетание методов ФГА и ЭР ЭЗМА хорошо дополняют друг друга для подробного изучения НВ таким параметрам, как оценка объемной доли различных типов неметаллических включений, морфологии, размеров и количество кластеров.

В третьей главе было исследовано изменение содержания различных типов неметаллических включений в стали при внепечной обработке низкоуглеродистой стали класса IF на двух отечественных металлургических предприятиях. На предприятиях используют разные технологии выплавки и внепечной обработки сталей данного класса, что обусловлено различным набором агрегатов внепечной обработки. При этом, наиболее

Можно видеть, что различным пикам оксидов на рисунке 2 соответствуют различные температуры начала восстановления углеродом и температуры максимума пика. В соответствии с математической моделью, использованной для идентификации результатов анализа ФГА, были определены четыре основных пика с характерными температурами начала и максимума. Пик 1 соответствует оксидам, восстанавливаемым углеродом при низких температурах. Основываясь на результатах, полученных методом ЭР ЭЗМА, можно предположить, что этот пик

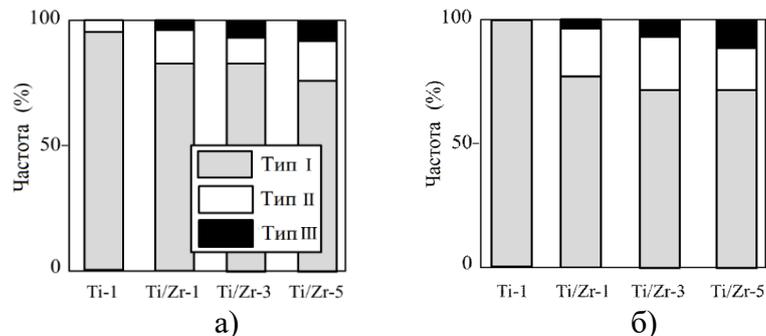


Рисунок 3. Частотное распределение типичных НВ и кластеров в различных экспериментальных образцах, полученные с помощью методов ЭР (а) и ФГА (б).

интересными, с точки зрения изучения содержания неметаллических включений являются разные технологические схемы раскисления и модифицирования: на одном из предприятий используется кальций для модифицирования, а на другом предприятии его не применяют.

Анализ неметаллических включений в пробах металла, отобранных на предприятии 1 (без применения кальция для модифицирования).

Схема технологии производства стали класса IF и отбора проб металла в ККЦ предприятия 1 представлена на рисунке 4.



Рисунок 4. Схема отбора проб металла и технологии производства стали класса IF на предприятии 1.

Исследования содержания, состава, размеров и морфологии НВ в отобранных пробах металла проводили методами количественного металлографического анализ шлифов на оптическом микроскопе, методом Оже-электронной спектроскопии, ФГА, ЭР с последующим рентгеновским микроанализом выделенных включений.

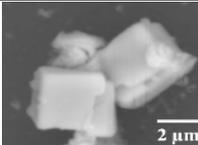
Отобранные пробы металла были исследованы методом неметаллических включений в пробах после электролитического растворения.

электродного растворения с последующим анализом выделенных включений на растровом электронном микроскопе в лаборатории КТН Royal Institute of Technology (Стокгольм, Швеция).

В результате исследования выделенных включений на сканирующем электронном микроскопе, по морфологическим признакам было выделено 5 основных характерных типов неметаллических включений (таблица 2). Исследования проб металла показали, что средний размер включений типа I

Тип	Изображение	Состав НВ	Длина НВ, мкм	Длина / Ширина	Проба
Тип I, Сферические НВ		Al_2O_3 ; $Al_2O_3 + TiO_x$; $Al_2O_3 + MgO + TiO_x$; $Al_2O_3 + MgO + TiO_x$	1.1~ 11.2	1.0~1.3	1, 2, 3, 4
Тип II, Пластинчатые НВ		Al_2O_3	4.8~ 15.3	1.0~2.9	
Тип III, Регулярные НВ, Иррегулярные НВ		Al_2O_3	1.3~ 10.4		1, 2, 3, 4
Тип IV, Кластеры - оксиды		Al_2O_3 ; $Al_2O_3 + TiO_x$; $Al_2O_3 + MgO + TiO_x$; $Al_2O_3 + MgO + TiO_x + (Ti, Nb)N, C + MnS$	3.5~ 31.5	1.0~3.1	1, 2, 3, 4

имеет тенденцию к увеличению в процессе внепечной обработки и разливки.

<p>Тип V, Кластеры -нитриды</p>		<p>(Ti,Nb)N+(Al,Mg) O</p>	<p>1.0~ 4.6</p>	<p>1.0~1. 5</p>	<p>2, 3, 4</p>
--	---	-------------------------------	---------------------	---------------------	------------------------

Было обнаружено, что все сферические включения превращаются при разливке и затвердевании стали в регулярные (кристаллы), включения неправильной формы и кластеры типов III и IV.

Методом ФГА были исследованы все отобранные пробы металла (пробы №1-№4).

По интервалам температур начала восстановления оксидов в насыщенном углеродом металлическом расплаве, пики на кривых газовой выделения были разделены на три основные группы (Группа 1: SiO₂ – TiO₂ – Al₂O₃; TiO_x – Al₂O₃; Группа 2: Al₂O₃; Группа 3: Al₂O₃ – MgO – TiO), соответствующие определенному составу оксидных неметаллических включений.

Было обнаружено, что результаты для оксидных включений и кластеров в образцах металла полученные методом ЭО, хорошо согласуются с результатами метода ФГА.

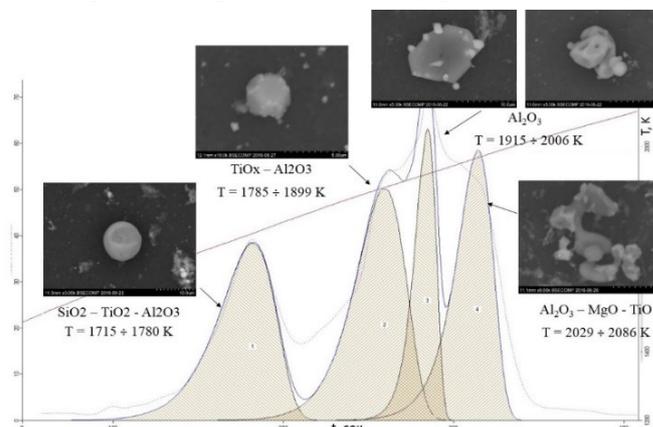


Рисунок 5. Результаты определения содержания оксидных НВ в пробах металла методом ФГА и соответствие типов включений полученных методом ЭО.

На рисунке 5 показана типичная кривая газовой выделения при ФГА-анализе образца и соответствующие пикам оксидные включения, и кластеры, наблюдаемые на электронном микроскопе после электролитического растворения.

На основании данных ФГА, могут быть оценены изменения состава и содержания различных оксидных неметаллических включений в образцах стали, взятых на разных стадиях производства ИФ стали. Полученные результаты могут быть использованы для корректировки внепечной обработки при производстве ИФ-сталей.

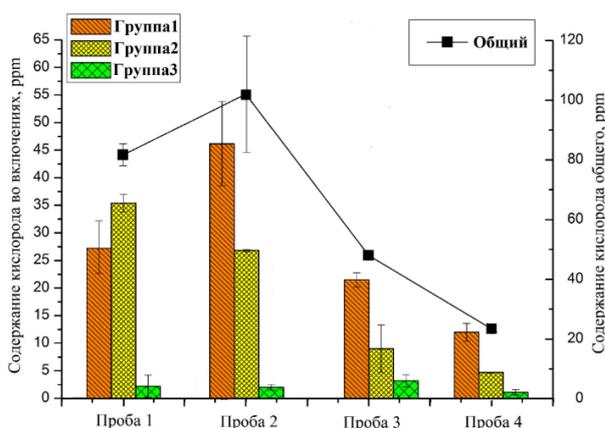


Рисунок 6. Результаты исследования, проб металла, с помощью метода ФГА (предприятие 1).

Общее содержание оксидных неметаллических включений в пробе 3, взятой из промковша снижается до 33 ppm (более чем на 30 ppm), и наибольшее количество

На рисунке 6 видно, что чистые оксиды алюминия (группа 2, ~ 55%) и включения состава Al₂O₃-SiO₂ (группа 1, ~ 42%) являются основными типами включений в пробе 1 (сталь в ковше после вакуумирования была раскислена алюминием до отбора пробы). Затем после добавления Ti во время обработки стали на ковше-печи количество чистых включений Al₂O₃ значительно уменьшается до 35%, а количество включений TiO_x-Al₂O₃ (группа 1) увеличивается до ~ 62%. Однако после добавления Al и Ti в конце обработки стали на агрегате ковш-печь содержание O во всех оксидных включениях увеличилось с 65 ppm в образце 1 до 76 ppm в пробе 2.

оксидных неметаллических включений соответствует составу $TiO_x-Al_2O_3$ (~ 63%) и чистому оксиду Al_2O_3 (27%).

Было обнаружено, что количество сложных включений и кластеров $Al_2O_3-MgO-TiO_x$ и $MgO-Al_2O_3$ (группа 4) в проанализированных образцах было небольшим и варьировалось от 3 до 10% в зависимости от этапа по технологической цепочки производства. Таким образом, модификация и удаление включений в жидкой стали во время обработки и разлива в ковше способствовали снижению содержания О в наиболее вредных неметаллических включениях и кластерах групп 2 и 3 с ~ 38 ppm в образце 1 до 6 ppm в пробе 4 отобранной из сляба. При этом общее содержание кислорода во всех оксидных включениях в слябе составляло 18 ppm. Снижение содержания кислорода, находящегося в виде неметаллических включений, указывает на то, что идет рафинирование от неметаллических включений и кластеров при внепечной обработке, в промковше и при непрерывной разливке. При этом наиболее существенное рафинирование от неметаллических включений произошло на этапе непрерывной разливки стали в промковше и кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок.

В работе был проведен **анализ образования, модифицирования и удаления неметаллических включений на предприятии 2** (с применением кальция).

Технологическая схема производства стали класса IF на предприятии 2 представлена на рисунке 7.

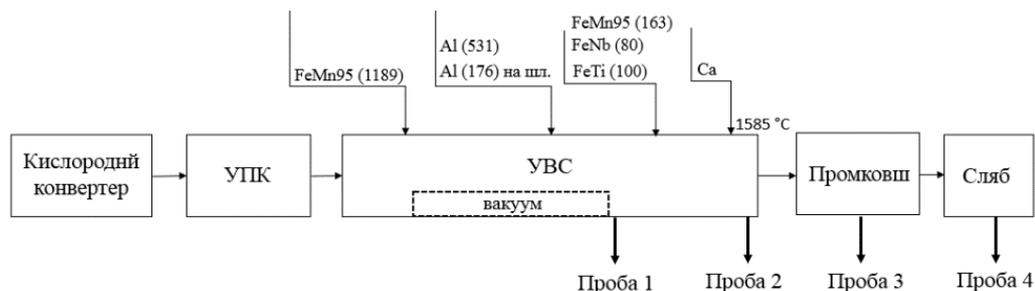


Рисунок 7. Схема отбора проб металла и технологии производства стали класса IF на предприятии 2.

Исследования содержания, состава, размеров, морфологии и объемного распределения НВ в отобранных пробах металла проводили с использованием рентгеноспектрального микроанализа образцов на сканирующем электронном микроскопе и методом фракционного газового анализа.

По результатам сравнения плавок на предприятии 1 где включения не модифицируются с помощью добавления кальция и предприятия 2 где добавление кальция применяется можно сделать вывод, что кальций положительно влияет на морфологию включений, модифицируя их в глобулярные/сферические включения которые являются наименее вредными как для технологичности процесса (затягивание сталеразливочных стаканов) и для конечного продукта. Это говорит об эффективном применении комплексного раскисления путем добавления модификатора кальция, который модифицирует включения типа кластеры в сферические включения.

В **главе 4** представлено исследование ключевых параметров достижения ВН эффекта в сверхнизкоуглеродистых сталях для глубокой вытяжки а также представлены предложения по оптимизации технологии выплавки, внепечной обработки и легирования при производстве сталей класса IF и IF-ВН.

В работе был проведен анализ влияния общего содержания углерода, азота и $C_{эфф}$ на величину ВН-эффекта и наличие площадки текучести для холоднокатаного и отожженного листа в исходном состоянии. Полученные результаты представлены на рисунке 8. Определено, что для диапазона $C_{эфф}$ 7–20 ppm величина ВН-эффекта

изменялась в пределах 30–53 МПа. В данном диапазоне изменения $C_{эфф}$ наблюдали максимальный рост ВН-эффекта, МПа при увеличении $C_{эфф}$. При величине $C_{эфф}$ в диапазоне 23–37 ppm, вероятность наличия площадки текучести в исходном состоянии превышала 60%, при этом увеличения ВН-эффекта практически не наблюдали (рисунок 8).

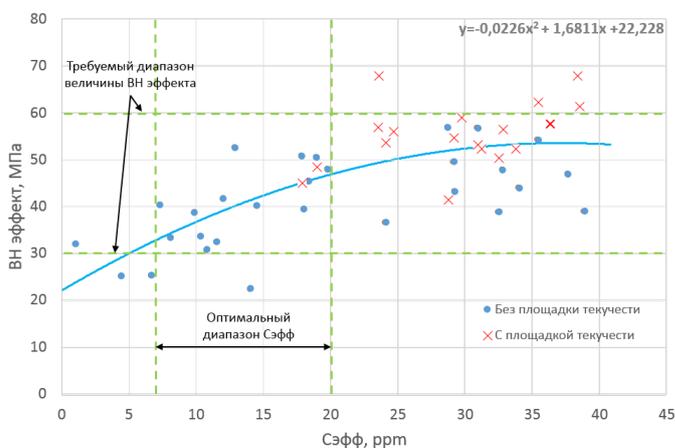


Рисунок 8. Зависимость величины ВН эффекта от $C_{эфф}$ в листе.

величине ВН-эффекта более 60 МПа вероятность наличия площадки текучести составляла уже 75%.

Была проанализирована вероятность появления площадки текучести в сталях IF-ВН в зависимости от общего содержания углерода и азота в металле. Было замечено, что при содержании углерода менее $0,0042 \pm 0,0002\%$ и азота менее $0,0043 \pm 0,0002\%$ площадка текучести в исследуемых образцах не появлялась.

В образцах стали с площадкой текучести наблюдали содержание суммарного углерода и азота более 86 ppm. При суммарном содержании углерода и азота менее 80 ppm в слябе наблюдали отсутствие площадки текучести в листовой стали. Таким образом, установлено, что для обеспечения отсутствия площадки текучести в холоднокатаном листе IF-ВН стали необходимо выполнение четырех условий по содержанию углерода и азота на пробе, отобранной из сляба: 1) содержание общего углерода в металле менее 40 ± 2 ppm; 2) содержание общего азота в металле менее 40 ± 2 ppm; 3) суммарное содержание углерода и азота менее 80 ppm; 4) содержание углерода эффективного в диапазоне 7-20 ppm.

При помощи моделирования равновесного фазового состава в программе ThermoCalc были проанализированы различные варианты легирования стали и предложена система легирования IF и IF-ВН сталей титаном и ниобием. Показано, что при легировании стали титаном не должно оставаться избытка титана в твердом растворе. Титан необходим в данной стали для полного связывания азота, и управление ВН-эффектом должно происходить только за счет свободного углерода в стали. Для полной стабилизации азота титаном необходимо ввести в сталь следующее количество Ti:

$$[Ti] = 3,42[N] \quad (2)$$

Далее после расчета необходимого содержания Ti вводят Nb по расчету, преобразовали формулу (1) таким образом, чтобы можно было посчитать содержание необходимого Nb в зависимости от требуемого $C_{эфф}$:

$$[Nb] = \left((C_{общ}) - \frac{(C_{эфф})}{10000} \right) \times 7,75 \quad (3)$$

где $(C_{эфф})$ – задаваемый параметр необходимого в стали углерода эффективного.

В главе приведен анализ влияния размера зерна на наличие площадки текучести и показано, что отсутствует взаимосвязь наличия/отсутствия площадки текучести и размера

зерна для сталей с наличием ВН-эффекта. Установлено, что для образцов с отсутствием площадки текучести и отсутствием ВН эффекта размер зерна больше, чем в других партиях.

Была проанализирована технология производства IF стали на предприятии 1 и даны предложения по корректировке технологического процесса. Производство IF-стали в кислородно-конвертерном цехе предприятия 1 производится согласно следующей последовательности агрегатов: кислородный конвертер, внепечная обработка на установке вакуумирования стали (УВС), установке печь-ковш (УПК) и разливка на МНЛЗ, как показано на рисунке 11 (а), однако на основании анализа более чем 100 паспортов промышленных плавов обнаружено, что в большинстве случаев после выпуска полупродукта ковш с расплавом отправляется на установку ковш-печь до этапа вакуумирования.

Ключевой технологической операцией для достижения низкого содержания углерода является обработка стали на вакууматоре. Анализ паспортов плавов для предприятия 1 показал, что на МНЛЗ происходит увеличение содержания углерода в металле в среднем на 15 ppm. Соответственно, для обеспечения содержания углерода в готовой продукции менее 25 ppm, необходимо получать металл после операции вакуумирования менее 15 ppm. Данное содержание углерода в металле после операции вакуумирования необходимо для компенсации прироста углерода на МНЛЗ. Были рассчитаны равновесные содержания углерода, которые можно получить на вакууматоре в зависимости от исходных концентраций углерода и кислорода при заданной температуре и определены оптимальные интервалы концентраций углерода и кислорода в металле перед операцией вакуумирования.

Проведен расчет комплексного раскисления стали класса IF кальций содержащими лигатурами, что позволяет обеспечить оптимальный состав неметаллических включений при достижении требуемой низкой концентрации кислорода.

В результате проведенных исследований в главе 4 предложена схема корректировки технологии выплавки и внепечной обработки стали класса IF на предприятии 1.

Показано, что увеличение содержания в расплаве азота и углерода происходит на агрегате ковш-печь при дуговом нагреве металла, при вводе ферросплавов и на МНЛЗ. С учетом анализа действующей технологии выплавки и внепечной обработки стали описанной были сформированы рекомендации по корректировке данной технологии выплавки и внепечной обработки сталей класса IF и IF-VN.

Сера является поверхностно активным элементом, отрицательно влияющим на процесс глубокого обезуглероживания. Технология выплавки и внепечной обработки сталей IF и IF-VN предполагает, что шихта для выплавки должны быть специально подготовлена, а именно для снижения содержания серы в готовом металле используют установку предварительной десульфурации чугуна. Металлический лом также необходимо использовать с низким содержанием серы и примесей цветных металлов таких как цинк, медь, хром и никель. Содержание серы в чугуне не должно превышать 50 ppm и содержание серы в металле перед операцией вакуумирования не должно превышать 70 ppm.

В диссертации приведены основные факторы, влияющие на содержание азота в расплаве и рекомендации по технологии выплавки стали в конвертере обеспечивающей низкое содержание азота.

Было установлено, что прирост концентраций углерода в расплаве на этапе разливки, после обработки стали на циркуляционном вакууматоре составляет в среднем 10 ppm. Увеличение содержания углерода в стали может происходить за счет углерода в легирующих материалах, при науглероживании расплава электрическими дугами во время обработки на установке ковш-печь, при разливке стали за счет науглероживания стали от защитных шлаковых смесей и футеровки. На всех плавках, после операции

циркуляционного вакуумирования расплава до разливки в готовый сляб наблюдали увеличение содержания азота в среднем на 12 ppm, что говорит о влиянии процессов вторичного окисления. В работе предложены рекомендациями по снижению прироста углерода и азота на этапе разливки.

На основе анализа данных паспортов плавов, были определены средние теплотери расплава, начиная с выпуска металла из конвертера и заканчивая измерением температуры на МНЛЗ, которые составляли, в среднем, - 1 °С/мин.

Предложен вариант технологии выплавки и внепечной обработки сталей IF и IF-VH без использования установки ковш-печь, рассчитанной от этапа разливки до выплавки стали на кислородном конвертере (кислородный конвертер – вакууматор – усреднительная продувка – разливка). Расчеты производили для стали IF с содержанием углерода и азота ≤ 25 ppm для каждого элемента в готовом прокате. Представлены ключевые параметры по содержанию углерода, азота и интервалам температур необходимым для успешного проведения каждого технологического этапа.

Сталь на МНЛЗ по предложенной технологии должна приходиться с температурой в диапазоне 1590-1570 °С. По результатам статистического анализа промышленных плавов при действующей технологии прирост содержания углерода и азота в металле после обработки на циркуляционном вакууматоре и до разливки с учетом обработки на агрегате ковш-печь составляет от 5 до 20 ppm. За счет точного контроля по температуре, правильной логистики, соблюдения временных интервалов предусмотренных на обработку стали на каждом из агрегатов, предлагается убрать операцию обработки стали на агрегате ковш-печь заменив ее на обработку на установке усреднительной продувки стали. Мера по исключению процесса подогрева стали на установке ковш-печь позволит снизить прирост углерода и азота в стали до 5-10 ppm на данном этапе. На установке усреднительной продувки стали предполагается проведение операций раскисления и микролегирования расплава по предложенной схеме с использованием кальция с последующим вводом строго определенных количеств Nb и Ti. Время обработки стали на установке усреднительной продувки должно составлять не более 40 минут. При рассчитанных теплотерях после обработки стали на циркуляционном вакууматоре температура металла должна составлять 1630 °С \pm 10 °С.

Содержание углерода в металле после обработки на циркуляционном вакууматоре должно составлять 15 ppm, азота ≤ 20 ppm. Температура прихода стали на циркуляционный вакууматор должна составлять 1660 °С \pm 10 °С из расчета времени обработки 30 минут.

Сталь при выпуске из кислородного конвертера имеет относительно наибольшие теплотери и, с учетом доставки до вакууматора в течение 10-15 минут, расплав полупродукта должен быть выпущен из КК при температуре 1690 °С \pm 10 °С с содержанием азота менее 20 ppm.

Графическая схема предложенной технологии показана на рисунке 9.

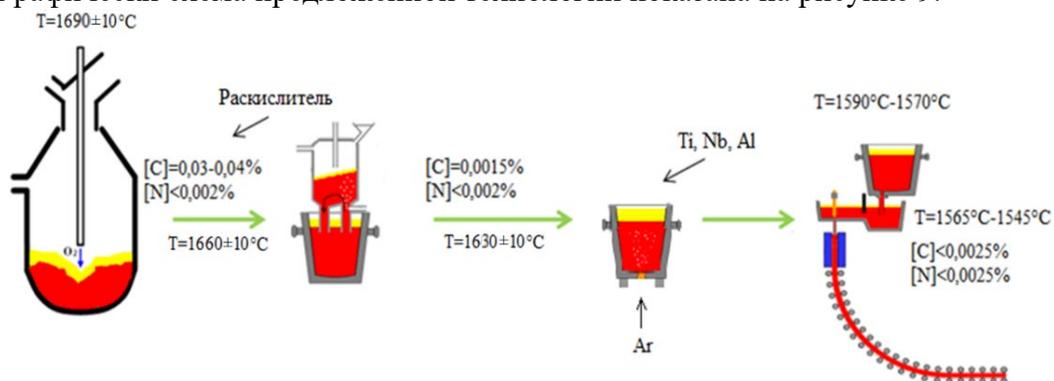


Рисунок 9. Предлагаемая альтернативная схема технологии выплавки и внепечной обработки стали класса IF на предприятии 1 без использования ковша-печи.

Чтобы избежать перегрева стали в кислородном конвертере для сохранения стойкости футеровки, а также с учетом того, что получить строго заданную температуру на кислородном конвертере сложно, то сталь в кислородном конвертере можно выпускать при температуре $1680\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для получения необходимо заданной температуры $1660\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}$ перед этапом вакуумирования, возможно использование агрегата ковш-печь для выравнивания температуры перед вакуумированием. Однако использование в технологической цепочке агрегата ковш-печь по статистике увеличивает содержание азота в металле в среднем на 10 ppm, что соответственно увеличит содержание азота в конечном продукте. Предложенная схема с использованием агрегата ковш-печь представлена на рисунке 10.

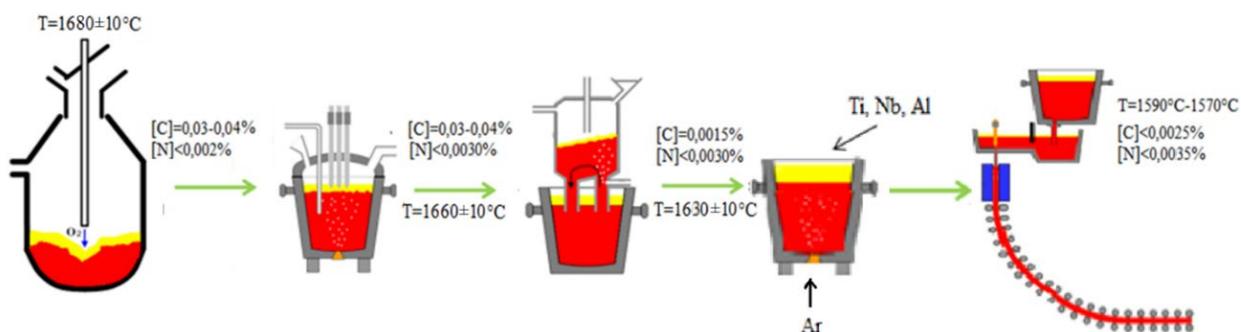


Рисунок 10. Предлагаемая альтернативная схема технологии выплавки и внепечной обработки стали класса IF на предприятии 1 с использованием ковша-печи.

Выводы

1. Разработана методика комплексного анализа неметаллических включений в стали с применением методов фракционного газового анализа и электролитического растворения неметаллических включений с последующим анализом на сканирующем электронном микроскопе (ЭР ЭЗМА). Методика опробована на образцах системы Fe-10% Ni. По итогам проведенных исследований образцов данного сплава были выделены три основные группы неметаллических включений по морфологии и составу, которым хорошо соответствовали типы включений определенные методом ФГА. Показано, что комбинация методов ФГА и ЭР ЭЗМА хорошо дополняют друг друга при изучении неметаллических включений в сталях, позволяя получать объективные данные.
2. Представлены результаты исследования методами количественного металлографического анализ шлифов, электролитического растворения образцов металла (ЭР ЭЗМА) с последующим рентгеновским микроанализом выделенных включений, Оже-электронной спектроскопии, фракционного газового анализа (ФГА) содержания, состава, размеров и морфологии неметаллических включений в пробах металла отобранных на всех этапах технологического процесса производства стали класса IF и IF-ВН. По морфологическим признакам выделены характерные типы неметаллических включений, которые влияют на ухудшение технологичности процесса разлива, снижение эксплуатационных свойств и прочностных характеристик изделий, произведенных из сталей. Показано, что результаты анализа неметаллических включений в пробах металла, полученных методом ЭР ЭЗМА находятся в хорошем соответствии с результатами определения оксидных неметаллических включением методом ФГА.
3. Изучена динамика изменения содержания различных типов оксидных неметаллических включений по ходу внепечной обработки стали IF и IF-ВН для различных вариантов технологий: при раскислении алюминием на предприятии 1 и при комплексном раскислении алюминием с добавлением кальция, как модификатора

- на предприятии 2. Показано, что применение метода ФГА, как экспрессного метода, возможно для определения корректирующих операций по ходу технологического процесса во избежание затягивания разливных стаканов.
4. Были определены наиболее опасные типы неметаллических включений при производстве IF и IF-VN сталей, которыми являются крупные кластеры неметаллических включений, а также регулярные и иррегулярные неметаллические включения на основе Al_2O_3 , которые, при разливке стали являются причиной зарастания сталеразливочных стаканов. Установлена роль оксидов титана, как связывающего включений Al_2O_3 в конгломераты, снижающие технологичность непрерывной разливки. Для сталей класса IF было выделено 3 группы оксидов, на основе Al_2O_3 и Al_2O_3 с добавлением оксидов Mg и Ca, а также группа комплексных оксидов алюминатов кальция и магния.
 5. По результатам проведенных исследований образцов металла на предприятии 1 и 2 сделан вывод о том, что кальций положительно влияет на морфологию включений, модифицируя их в глобулярные/сферические включения которые хорошо удаляются, являются менее вредными для технологичности процесса (затягивание сталеразливочных стаканов) и не влияют на качество конечного продукта.
 6. Было показано, что промковш является рафинировочным агрегатом этапа внепечной обработки. Экспериментально, с применением метода ФГА установлено, что модифицирование и удаление включений из жидкой стали в процессе разливки приводило к снижению содержания кислорода в наиболее вредных неметаллических включениях и кластерах групп 2 и 3 с ~ 38 ppm до 6 ppm в пробах металла отобранных из сляба. При этом, общее содержание кислорода во всех оксидных включениях в пробе металла перед разливкой составляло более 40 ppm, а в пробе, отобранной от сляба оно снижалось до 18 ppm. Снижение содержания кислорода, находящегося в неметаллических включениях, указывает на то, что идет рафинирование от неметаллических включений и кластеров в промковше при непрерывной разливке. При этом наиболее существенное, до 40% рафинирование от неметаллических включений с 40 ppm до 18 ppm происходило на этапе непрерывной разливки стали в промковше и кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок.
 7. Проведенный анализ промышленных образцов сверхнизкоуглеродистых сталей для глубокой вытяжки показал, что ключевым параметром достижения VN – эффекта является попадание в диапазон значений $C_{эфф}$ в слябе от 7 до 20 ppm. Установлено, что при общем содержании углерода в стали менее 40 ± 2 ppm и азота менее 40 ± 2 ppm появления площадки текучести при статических испытаниях образцов не наблюдали, при этом величина VN-эффекта в металле рулонов, прокатанных из данных слябов удовлетворяла диапазону 30-60 МПа. Показано, что оптимальный диапазон величины VN-эффекта составляет от 30 до 40 Мпа, при попадании в который, в 95% случаев, в листовом металле площадки текучести не наблюдали.
 8. Показано, что микролегирование IF-VN сталей титаном и ниобием является наиболее предпочтительным вариантом. Предложена двухэтапная схема микролегирования, где на первом этапе должна происходить полная стабилизация азота титаном, а заданная величина $C_{эфф}$ достигается последующим вводом необходимого количества Nb. Показано, что отсутствует взаимосвязь уровня механических свойств и размера зерна для сталей с наличием VN-эффекта, но для образцов с отсутствием площадки текучести и отсутствием VN эффекта средний размер зерен больше, чем для образцов с VN эффектом.
 9. Проведены расчеты комплексного раскисления стали кальций содержащими лигатурами для модифицирования неметаллических включений с целью снижения их вредного влияния на технологичность процесса и готовую продукцию. Установлены условия модифицирования металла кальцием.

10. Проведен анализ технологии выплавки и внепечной обработки стали на двух отечественных предприятиях. Проведены расчеты вакуум кислородного обезуглероживания и даны рекомендации по корректировке технологии для стабильного получения стали заданного состава, требуемого количества Сэфф для получения заданного ВН-эффекта и использование кальция в качестве модификатора для снижения влияния неметаллических включений на качество стали и технологичность процесса. Предложена скорректированная технология производства IF ВН стали, обеспечивающая стабильное достижение заданного состава стали и высокого качества продукции.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Изменение содержания различных типов неметаллических включений в процессе внепечной обработки низкоуглеродистой стали класса IF [Текст] / Д.В. Горкуша, К.В. Григорович, А.В. Карасев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2019. - Т. 62, № 5. - С. 345-352.
2. Исследование критериальных параметров достижения ВН эффекта в сверхнизкоуглеродистых сталях для глубокой вытяжки [Текст] / Д.В. Горкуша, О.А. Комолова, К.В. Григорович [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2020. - Т. 63, № 3-4. - С. 201-210.
3. Разработка и использование компьютерных тренажеров в металлургии [Текст] / О.А. Комолова, К.В. Григорович, Д.В. Горкуша [и др.] // Тяжелое машиностроение. - 2017. - № 1-2. - С. 55-61.
4. Characterization of Non-metallic Inclusions and Clusters during Production of Low-carbon IF Steel [Text] / D. Gorkusha, A.V. Karasev, O. Komolova [et al.] // ISIJ International. - 2020. - Vol. 60, № 12. - P. 2819-2828. - DOI : 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-202.
5. Application of Some Modern Analytical Techniques for Characterization of Non-Metallic Inclusions in a Fe-10mass%Ni Alloy Deoxidized by Ti/Zr and Ti/Mg [Text] / A.V. Karasev, D. Gorkusha, K.V. Grigorovich [et al.] // Metals. - 2021. - Vol. 11, № 3. - P. 448. - DOI : 10.3390/met11030448.

Другие публикации:

6. Горкуша, Д.В. Анализ и оптимизация технологии выплавки и внепечной обработки стали класса IF в ОАО "ММК" [Текст] / Д.В. Горкуша, О.А. Комолова, К.В. Григорович // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР : труды научно-практической конференции с международным участием. - Екатеринбург : Уральский рабочий, 2015. - С. 187-190.
7. Горкуша, Д.В. Анализ причин повышенного содержания углерода и азота в стали класса IF для условий ОАО "ММК" [Текст] / Д.В. Горкуша, О.А. Комолова, К.В. Григорович // Теория и технология металлургического производства. - 2015. - Т. 16, № 1. - С. 60-64.
8. Анализ поведения вредных примесей при производстве сталей для глубокой вытяжки [Текст] / Д.В. Горкуша, О.А. Комолова, К.В. Григорович [и др.] // V Международная конференция-школа по химической технологии ХТ16 : сборник тезисов докладов сателлитной конференции XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. - Волгоград, 2016. - С. 157-159.
9. Комолова, О.А. Физико-химические модели технологии рафинирования стали в вакууматоре [Текст] / О.А. Комолова, Д.В. Горкуша, К.В. Григорович // V Международная конференция-школа по химической технологии ХТ16 : сборник тезисов докладов сателлитной конференции XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. - Волгоград, 2016. - С. 240-242.

10. Применение имитационных компьютерных тренажеров в ковшевой металлургии [Текст] / Д.В. Горкуша, Д.О. Теребикина, О.А. Комолова [и др.] // XIV Международный конгресс сталеплавателей и производителей металла: сборник трудов. - Электросталь, 2016. - С. 445-448.
11. Горкуша, Д.В. Анализ и оптимизация технологии производства сталей для глубокой вытяжки [Текст] / Д.В. Горкуша, К.В. Григорович, О.А. Комолова // Международная научная конференция "Физико-химические основы металлургических процессов", посвященная 115-летию со дня рождения академика А.М. Самарина: сборник материалов. - М.: ИМЕТ РАН, 2017. - С. 86.
12. Контроль неметаллических включений в сталях и сплавах - сравнение различных методов [Текст] / Д.В. Горкуша, К.В. Григорович, А.В. Карасев [и др.] // Международная научная конференция "Физико-химические основы металлургических процессов", посвященная 115-летию со дня рождения академика А.М. Самарина: сборник материалов. - М.: ИМЕТ РАН, 2017. - С. 87.
13. Смирнов, Л.П. Анализ причин зарастания погружных стаканов при непрерывной разливке стали раскисленной алюминием [Текст] / Л.П. Смирнов, Д.В. Горкуша, К.В. Григорович // Международная научная конференция "Физико-химические основы металлургических процессов", посвященная 115-летию со дня рождения академика А.М. Самарина: сборник материалов. - М.: ИМЕТ РАН, 2017. - С. 88.
14. Изменение содержания различных типов неметаллических включений в процессе внепечной обработки сталей типа IF [Текст] / Д.В. Горкуша, К.В. Григорович, А.В. Карасев [и др.] // XV Международный конгресс сталеплавателей и производителей металла: сборник трудов. - Тула, 2018. - С. 272-276.
15. Горкуша, Д.В. Анализ существующей технологии выплавки и внепечной обработки стали класса IF в ККЦ ОАО "ММК" и предложения по оптимизации технологии [Текст] / Д.В. Горкуша, О.А. Комолова, К.В. Григорович // Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XVI международной конференции. - Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2015. - С. 7-9.
16. Grigorovich, K. New software and method for ladle treatment technology optimization [Text] / K. Grigorovich, O. Komolova, D. Gorkusha // 5th International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking. - Sweden, 2016. - P. 47.
17. Grigorovich, K. Physical and chemical modeling and computer simulation of ladle steel treatment technologies [Text] / K. Grigorovich, O. Komolova, D. Gorkusha // Proceedings of the sixteenth Israeli-Russian Bi-national Workshop 2017. - Israel, 2017. - P. 75-84.
18. Characterization of Non-Metallic Inclusions and Clusters in Steels by Using Different Modern Analytical Techniques [Text] / A.V. Karasev, D. Gorkusha, K.V. Grigorovich [et al.] // Proceedings of the 10th International Conference and Exhibition on CLEAN STEEL. - Budapest, 2018. - P. 62-63.
19. Изменение содержания различных типов неметаллических включений в процессе внепечной обработки стали типа IF [Текст] / Д.В. Горкуша, К.В. Григорович, А.В. Карасев [и др.] // XV Международный конгресс сталеплавателей: сборник трудов к 100-летию Национального исследовательского технологического университета "МИСиС" и 380-летию российской металлургии. - Тула, 2018. - С. 272-276.
20. Горкуша Д.В. Анализ технологий производства IF-VH стали [Текст] / Д.В. Горкуша, О.А. Комолова, К.В. Григорович // Международная научная конференция "Физико-химические основы металлургических процессов" имени академика А.М. Самарина: сборник материалов. - М.: ИМЕТ РАН, 2019. - С. 55.