

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Ботникова Сергея Анатольевича на тему: **«Разработка комплексной технологии получения стали высокой чистоты в условиях современных сталеплавильных цехов»**, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.2 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Актуальность работы.

Производство стали с низким содержанием неметаллических включений в настоящее время востребовано, так как вся производимая высококачественная металлопродукция должна содержать минимальное содержание в стали, как кислорода, так и серы. Кроме этого, следует ограничивать в металле содержание фосфора, а в некоторых случаях и азота. Несмотря на то, что данная тема изучается в металлургии давно, автор диссертации подробно представил текущие проблемы в сталеплавильных цехах, связанные с содержанием в стали оксидных неметаллических включений: затягивание разливочных стаканов на установке непрерывной разливки стали (УНРС), «унос» отложений включений в тело заготовки или сляба, брак металла по включениям, аварийные остановки УНРС и др. Все это однозначно говорит о том, что выбранная тема диссертации является **актуальной** для современной металлургической отрасли.

К научной новизне диссертационной работы следует отнести следующее:

1. Представлено дальнейшее развитие возможности **программы ЭВМ – STM**, в том числе, созданные и другие программные продукты на основе цифровых решений, позволяющие разрабатывать новые технологии производства чистых сталей в условиях сталеплавильного производства. Эффективность работы программы STM достигнута с использованием положения о ведущей роли окислительного потенциала в системе «металл-шлак-газ». Также учтен контроль внешнего поступления кислорода из атмосферы, материалов, шлака и футеровки. Преимущество этой идеи заключается в эффективном определении критических точек при производстве стали по всей технологической цепочке от выплавки до разливки стали, что позволяет разработать наиболее эффективные способы решения задач производства чистой стали и сверхчистой стали.

2. Установлено и научно обосновано **предельное содержание вредных элементов** в стали, раскисленной алюминием и модифицированной кальцием для соотношения оксидов кальция к алюминию от 0,6 до 1,0: общего кислорода – не более 0,0020 масс.%, серы – не более 0,0030 масс.% и магния –

не более 0,0008 масс.%, превышение которых приводит к снижению качества готовой металлопродукции за счет формирования избыточного количества неметаллических включений.

3. Уточнён вклад огнеупорного материала промежуточного ковша на основе MgO (85-90 масс. %) с примесями SiO₂ (около 5 масс. %) и Fe₂O₃ (около 0,7-3,0 масс. %) в процесс общего вторичного окисления расплава при производстве высококачественной раскисленной алюминием стали, что даёт перспективу развития технологий получения сталей с ультранизким содержанием включений.

4. Впервые введено новое понятие «суперчистая сталь» (защищено патентом Российской Федерации) – сталь, содержащая в сумме менее 500 атомов кислорода, серы, водорода, азота и фосфора на 1 млн. атомов железа.

5. Получена зависимость изменения величины теплового потока через стенки кристаллизатора в процессе непрерывной разливки средне- и низкоуглеродистых марок сталей для ШОС с основностью (CaO/SiO₂) от 1,04 до 1,25 и вязкостью от 0,03 до 0,12 Па·с на формирование поверхностных продольных трещин на непрерывнолитом металле. Это позволяет в комплексе и одновременно осуществлять корректировку технологии подготовки металла на внепечной обработке и для разливки на УНРС с целью получения литой стали без поверхностных трещин и без аварийных ситуаций в цехе.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные в работе научные результаты были использованы для разработки и внедрения технологии производства чистых сталей в промышленности. Предложены новые технологические решения при производстве сверхчистых сталей, позволяющие существенно снизить трудоёмкость и повысить технико-экономические показатели на металлургических предприятиях. К таким решениям можно отнести следующее:

1. Использование методов углубленной аналитики и машинного обучения с применением «больших данных» для совершенствования технологии производства чистых сталей. Для выявления первопричины проблем производства чистых сталей и установления наиболее релевантных технологических параметров, в первую очередь рекомендуется применять следующие прогнозные модели и алгоритмы машинного обучения: «дерево принятия решений», модели «случайный лес» и «градиентный бустинг». С целью получения прикладного применения представленного подхода необходима предварительная подготовка массива данных, а также осуществление интерпретации результатов машинного обучения, основывающийся на фундаментальных законах и физико-химических процессах, протекающих в сталеплавильном производстве. Ниже представлены примеры прикладного значения, рассмотренные в диссертации.

Пример 1. В условиях сталеплавильного цеха создана математическая модель прогнозирования температуры в промежуточном ковше при разливке каждой конкретной плавки на принципах алгоритма машинного обучения. Модель была интегрирована в сталеплавильное производство и предоставляет информацию в качестве рекомендаций для персонала цеха. По результатам работы создания и внедрения данной модели была получена экономия электроэнергии до 0,75 кВт·ч/т и расхода графитированных электродов до 1 % на установке ковш-печь.

Пример 2. В результате исследований, выполненных с применением прогнозной аналитики большого массива данных, установлены технологические параметры образования сталеплавильных дефектов «плена» и «пузырь-вздутие»: влияние нестабильности разливки металла на УНРС через параметр «позиция стопора» и «уровень металла в кристаллизаторе», химический состав стали и содержание в ней вредных примесей, работа оборудования УНРС и стана горячей прокатки.

Пример 3. Методом углубленного анализа данных выявлены основные параметры (признаки) технологических процессов выплавки полупродукта в печи, обработки стали на установке ковш-печь, вакууматоре и разливки на УНРС, влияющие на формирование неметаллических включений и возникновение сопутствующих дефектов готового проката. В работе определены оптимальные интервалы изменения их величин и пути достижения.

2. Комплексный подход расчёта шлакообразования в сталеразливочном ковше позволил оптимизировать технологию на выпуске плавки и на внепечной обработке. Установленные оптимальные расходы и виды материалов на выпуске плавки позволили улучшить технологический процесс производства стали на внепечной обработке с получением экономии материалов, ресурсов и высокого выхода годной стали.

3. С целью снижения в металле эндогенных и экзогенных включений, в состав которых входит магнезиальная шпинель ($MgO \cdot Al_2O_3$), предложена стабилизация химического состава шлака. В шлаке необходимо повышать концентрацию Al_2O_3 и не использовать материалы с повышенным содержанием MgO . Кроме того, для получения низкого содержания общего кислорода необходимо также обеспечить снижение концентрации SiO_2 в шлаке до уровня ниже 40 масс. %. В металле следует минимизировать концентрацию растворенного алюминия. Дополнительно целесообразно внедрить контроль химического состава шлака и используемых материалов, дополнительное оцифровывание технологических параметров сталеразливочного ковша, ужесточение требований к технологии применения огнеупоров сталеразливочного ковша, его подготовка, снижение времени нахождения металла в сталеразливочном ковше.

4. Внедрение компьютерных автоматических программ слежения за позиционированием стопора позволило осуществлять контроль стабильности разливки металла на УНРС и повысить эффективность технологии производства стали с низким содержанием включений.

5. Разработаны и внедрены эффективные мероприятия, снижающие случаи попадания тугоплавких неметаллических включений с внутренней поверхности разливочного стакана промежуточного ковша в тело заготовки.

6. Разработаны параметры оперативной оценки вторичного окисления при разливке чистых сталей на УНРС. Оперативная оценка окисления на разливке УНРС позволяет осуществлять поиск проблем в технологии производства чистых сталей с целью быстрого и эффективного воздействия на технологию.

7. Разработаны рекомендации по минимизации возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла на УНРС: по применяемым материалам, обслуживанию оборудования УНРС, мониторингу и контролю тепловой карты кристаллизатора, содержанию газов в металле (водород и азот) и реализации мероприятий, исключающих колебания уровня металла в кристаллизаторе путём корректировки химического состава стали и содержания в ней неметаллических включений, и снижению процессов вторичного окисления металла во время разлики, а также снижению в металле общего кислорода до уровня не более 20 ppm.

9. На основании исследований и изучения природы дефектов металла предложено разделять дефект «плена» на три типа: 1 – плена из-за неметаллических включений; 2 – плена из-за трещин на поверхности непрерывнолитого металла; 3 – плена, формирующаяся в процессе деформации. Добавлена новая информация о факторах и технологических параметрах, влияющих на образование и развитие дефектов, а также их трансформацию в процессе прокатки. Кроме этого, учтён дефект плена «прокатная» с целью однозначного разделения дефектов, не связанных со сталеплавильным производством и неметаллическими включениями. Таким образом, исключены разногласия по источнику возникновения дефекта из-за неметаллических включений, что позволит выйти на необходимые мероприятия.

10. Установлены **26 ключевых технологических параметров** производства чистых сталей от выплавки до разлики внедрение мониторинга и контроля которых позволяет поднять общий уровень технологии до показателей лучших мировых практик.

11. Разработана техническая документация сквозной технологии производства чистых сталей с низким содержанием неметаллических включений, в соответствии с которой осуществляется производство трубной стали на АО «ВМЗ» и АО «ПНТЗ».

По результатам проекта «чистая сталь» на АО «ВМЗ» получен экономический эффект 269,1 млн.руб. В том числе: снижена отбраковка труб по дефектам сталеплавильного происхождения более чем на 45%; снижены потери металла на УНРС более чем на 1000 т; снижено удельное число прорывов на УНРС в 3,5 раза.

12. Научные и прикладные результаты работы использовались в монографии «Технология и оборудование УНРС. Производство сортовых и блюмовых непрерывнолитых заготовок» и в учебном процессе «Производство чистой стали в условиях ЛПК АО «ВМЗ».

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Материал изложен на 438 страницах машинописного текста, содержит 80 рисунков, 45 таблиц, список литературы включает 442 источника.

Содержание автореферата отражает основные положения диссертации. В автореферате изложены основные идеи и выводы диссертационного исследования, степень новизны и практическая значимость результатов исследований.

Во введении представлена актуальность и цель диссертационной работы, поставленные и решенные задачи. Научная новизна сформирована из семи пунктов. Представлена теоретическая и практическая значимость и выносимые положения на защиту из 10 пунктов. Также автор работы во введении показал методы исследования, апробацию результатов работы, достоверность и обоснованность результатов и научных выводов работы, публикации, структуру и объём диссертации.

В первой главе приведён подробный аналитический обзор состояния вопроса о влиянии неметаллических включений (НВ), примесей и газов на свойства сталей, природе включений и методах их оценки. Рассмотрены современные представления о чистоте стали и приведен обзор ранее опубликованных результатов получения и производства такой стали, как в России, так и за рубежом. Отдельно в обзоре рассмотрено понятие «чистая сталь» по содержанию оксидных и сульфидных НВ, а также повышенные требования к современному производству и поиск баланса в производственной системе: себестоимость-производительность-качество. Детально рассмотрены проблемы производства «чистой стали» в современных сталеплавильных цехах. На основе материалов исследований автора, приведенных в главе 1, сформулированы цель и задачи настоящего диссертационного исследования, представленные во введении. Данные задачи также отражены в выводах главы 1.

Во второй главе представлено применение вычислительной термодинамики и новых цифровых технологий применимых к металлургии и производству высококачественной стали.

В этой же главе автор диссертации привел литературный обзор о множестве вычислительных программ для расчёта термодинамического равновесия, таких как ИВТАНТЕРМО, ТЕРРА (АСТРА), MTDATA, ThermoCalc, FactSage, ГИББС и др. Методика термодинамического анализа равновесного состояния многокомпонентных гетерогенных систем с применением программ на ЭВМ известна давно. Но существующие программы для расчёта термодинамического равновесия сложны и неудобны для их быстрого практического применения на действующем производстве.

С целью оперативной и адекватной разработки технологии чистых сталей была необходимость в развитии и внедрения в работу усовершенствованного программного модуля (программа SyTherMa-равновесие или сокращенно – STM) для промышленных расчётов состава и массы металла, шлака и газа с использованием принципов термодинамики. Добавлены в базу программы STM материалы, которые сейчас используются на предприятиях черной металлургии РФ, а также расширена база констант равновесий химических соединений для промышленных расчётов до 85 компонентов: фторидов – 2; оксидов – 58; сульфидов – 7; нитридов – 7; карбидов – 7; чистых газов – 4. Для промышленных объектов расчёт коэффициентов активности металла в программе STM автором диссертации проводился с использованием параметров взаимодействия Вагнера, а расчёт коэффициентов активности шлака – по теории В.А. Кожеурова.

Также в главе 2 в параграфе 2.4 представлен пример разработки математической модели прогнозирования температуры металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах. Модель показала высокую точность и была рекомендована для промышленного применения. По результатам работы создания и внедрения данной модели было достигнуто снижение в 4,6 раза случаев разлива слябов с отклонениями от целевого диапазона по перегреву над температурой ликвидус (15-30 °С) в сравнении со средним уровнем этого показателя до начала проведения работы.

В третьей главе представлен анализ всего комплекса мероприятий производства и разработки технологии чистых сталей с использованием дополнительных инструментов: элементы математических, термодинамических моделей, прогнозные и статические модели, построенные с применением физико-химических основ, технологии машинного обучения и больших данных. Основным инструментом разработки технологии являлись выполненные шесть STM расчетов от выпуска плавки из печи до разлива на УНРС. Кроме расчётов STM дополнительно были построены поверхности растворимости компонентов в металле (ПРКМ) системы Fe–Mg–Ca–Al–Mn–C–O. Для исследования влияния содержания остаточного кальция на морфологию образующихся неметаллических включений проведён расчёт при концентрациях, характерных для технологий модифицирования трубной стали

20 и стали 09Г2С, – [Са] = 0,0020; 0,0025; 0,0030 масс. % и температуре 1560 °С.

Согласно выполненному STM расчёту №4 «критическое поступление кислорода извне во время разливки на УНРС, влияющее на оптимальное модифицирование включений кальцием» и построенной ПРКМ Fe–Mg–Ca–Mn–Al–O–S сделаны выводы, имеющие важный прикладной характер.

Так, для оптимизации процесса разливки на УНРС необходимо обеспечивать содержание кальция от 0,0020 до 0,0025 масс. % и алюминия не более 0,0250 масс. %, а также предотвращать возможное вторичное окисление металла, поступление кислорода извне в расплав металла до уровней не более 0,014 кг/т и стремиться снижать магний в металле с целью минимизации формирования нежелательных и трудноудаляемых алюминатов кальция и магния в промежуточном ковше. С целью обеспечения попадания в оптимальную зону по кальцию, алюминию и кислороду в металле, а также улучшения технологии модифицирования включений кальцием, были предложены следующие комплексные рекомендации и мероприятия с учётом всей технологической цепочки:

- минимизация попадания сталеплавильного шлака в ковш (до уровня не более 2,0 кг/т);
- оптимизация раскисления стали (корректировку химического состава стали и шлака осуществлять одновременно);
- улучшение шлакообразования в ковше следует начинать с выпуска плавки из сталеплавильного агрегата, а также обеспечение достаточной толщины шлака (около 90-130 мм) для вакуумной обработки металла в камерном вакууматоре со шлаком и снижение вторичного окисления через шлак и воздух (за счёт оптимизации химического состава шлака и его кратности);
- выполнение подбора материалов для производства стали с учётом вредных примесей и нежелательных соединений (SiO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2 , S, P и др.);
- совершенствование и оптимизация технологии продувки инертным газом расплава в сталеразливочном ковше (поступление кислорода извне не более 0,2-0,4 кг/т);
- организация улучшенного ввода в расплав алюминия и кальция, а также оптимизация расхода Al и Ca на плавку с целью получения жидких и глобулярных включений (отношение $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ в металле следует выдерживаться в интервале 0,6-1,0);
- необходимо стремиться обеспечить в металле алюминий на нижнем допустимом пределе;
- организация мероприятий по защите металла от вторичного окисления на участках разливки «сталеразливочный ковш – промежуточный ковш» и «промежуточный ковш – кристаллизатор» (поступление кислорода извне не

более 0,010 и 0,003 кг/т соответственно на данных производственных участках);

- оценку эффективности технологии производства чистых сталей осуществлять через контроль стабильности разливки металла на УНРС за счёт внедрения в работу компьютерных автоматических программ слежения за позиционированием стопора-моноблока, что позволит обеспечить сравнительные адекватные данные для анализа расхода кальция.

Отдельно в главе 3 было рассмотрено влияние огнеупорной футеровки сталеразливочного ковша на формирование неметаллических включений, в основу которых входит магний. Автор диссертации нашёл оптимальные мероприятия и решения по минимизации и исключению образования магниевых включений в конечной металлопродукции. В этой же главе представлен выбор параметров разделения природы образования металлургических дефектов из-за неметаллических включений и факторный анализ причин образования прорывов кристаллизующейся корочки на УНРС.

В четвертой главе описан механизм изменения свойств шлака в кристаллизаторе и рассмотрены проблемы разливки чистых сталей на УНРС. Представлен литературный обзор по свойствам шлакообразующих смесей для кристаллизатора УНРС и рассмотрены текущие производственные проблемы применения ШОС для кристаллизатора.

Выполнено исследование механизма влияния содержания в металле вредных примесей, включений и газов на физико-химические свойства шлака в кристаллизаторе. Автор диссертации подробно рассмотрел и изучил технологические особенности свойства шлака в кристаллизаторе для разливки сверхчистых сталей. Представлены теоретические и опытные данные по контролю теплопередачи от слитка к кристаллизатору с учётом физико-химических свойств шлака: основность и температура плавления шлака. Также в главе 4 представлен материал по формированию дефектов металла из-за свойств шлака или шлакообразующей смеси (ШОС) в кристаллизаторе УНРС с увязкой качества стали в сталеразливочном и промежуточном ковшах, то есть содержание в стали газов и включений. Дополнительно было учтено влияние плит кристаллизатора на формирование продольного дефекта на литом металле. Данная глава является предпосылкой разработки алгоритма подбора ШОС кристаллизатора для разливки чистых сталей на любых УНРС.

В пятой главе представлена разработка классификации чистоты стали по содержанию в ней общего кислорода, азота, водорода, серы, фосфора. В параграфе 5.2 приведена разработка дифференцированного подхода к требованиям технологии производства «чистой стали» и необходимому набору сталеплавильного оборудования в цехе. В параграфе 5.3 представлена оценка чистоты металла прямыми методами исследований для проб металла, отобранных из сталеразливочного или промежуточного ковшей. Для условий,

в которых была выполнена эта работа установлено, что объемная доля включений в промежуточном ковше в среднем повышается на 40 %. В этой главе было введено новое понятие «суперчистая сталь», которое было запатентовано автором диссертации. Данное понятие подразумевает сталь, в которой содержатся вредные примеси и газы, а именно, [O], [S], [H], [P] и [N], не более 500 атомов на 1 млн. атомов железа.

В шестой главе представлен разработанный автором диссертации алгоритм корректировки технологии производства чистых сталей. Рассмотрены возможные потери в сталеплавильных цехах и в том числе на производстве металлопродукции из-за неметаллических включений. В параграфе 6.2 описан новый метод мониторинга и контроля производства чистых сталей в сталеплавильном производстве. В результате проведенного диссертационного исследования и решения задачи по мониторингу и контролю производства «суперчистой стали» был создан перечень из 26 ключевых контролируемых параметров (приведен в приложении диссертации), которые влияют на качество, производительность и себестоимость стали. В параграфе 6.3 представлен полный комплекс технологических мероприятий производства высококачественной стали, что является главной целью диссертационной работы по разработке комплексной технологии получения стали с повышенными требованиями к её чистоте по содержанию неметаллических включений, примесей и газов. В параграфе 6.4 приведен разработанный и внедренный алгоритм корректировки технологии производства чистых сталей с учетом ранее рассмотренных положений в главе 3 и 4.

В заключении по диссертации сформулированы основные научные положения и изложены достигнутые практические результаты работы.

Результаты работы достаточно полно обсуждены на региональных, Всероссийских и Международных конференциях, форумах и конгрессах. По теме диссертации опубликована монография «Технология и оборудование УНРС. Производство сортовых и блюмовых непрерывнолитых заготовок». – Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 300 с. В общем по теме диссертации опубликовано 51 научная работа, в том числе в журналах перечнях ВАК – 16, один патент на изобретение и одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, статьи в других журналах и сборников конференций или конгрессов – 32, 1 монография. В изданиях, которых входят в Международные реферативные базы данных систем цитирования, опубликовано 10 работ в переводных периодических изданиях: «Steel in Translation» – 4 (Scopus, квартиль Q2); «Metallurgist» – 3 (Scopus, квартиль Q3); «Chernye Metally» (Scopus, квартиль Q2) – 2; «Refractories and Industrial Ceramics» – 1 (Scopus, квартиль Q3).

Рассмотренный материал диссертации соответствует паспорту специальности 2.6.2 – металлургия черных, цветных и редких металлов: п. 2 – Твёрдое и жидкое состояние металлических, оксидных, сульфидных, хлоридных и смешанных систем; п. 4 – Термодинамика и кинетика металлургических процессов; п. 11 – Металлургические системы и коллективное поведение в них различных элементов; п. 13 – Тепло- и массоперенос в низко- и высокотемпературных процессах; п. 14 – Кристаллизация расплавов и методы воздействия на затвердевание; п. 15 – Подготовка сырьевых материалов к металлургическим процессам и металлургические свойства сырья; п. 17 – Пирометаллургические процессы и агрегаты; п. 18 – Электро- и спецэлектрометаллургические процессы; п. 21 – Внепечная обработка металлов; п. 22 – Разливка продуктов плавки и методы непрерывной разливки; п. 25 – Производство особо чистых металлов и сплавов; п. 26 – Математическое моделирование процессов производства черных, цветных и редких металлов, формирование техногенных месторождений и способов их утилизации. Управление и оптимизация металлургическими процессами.

По работе следует сделать некоторые замечания:

1. В пункте 2 научной новизны обозначены предельные содержания вредных элементов в стали, раскисленной алюминием и модифицированной кальцием: общий кислород – не более 0,0020 масс.%, сера – не более 0,0030 масс.% и магний – не более 0,0008 масс.%, превышение которых приводит к снижению качества готовой металлопродукции за счет формирования избыточного количества неметаллических включений. Это для всех марок стали? Наверное, не совсем корректно говорить о том, что это сделано впервые. Необходимо пояснить термин «избыточное количество неметаллических включений».

2. Хотелось бы разобраться с терминологией. Автор диссертации вслед за рядом других авторов ([11] Хан, Б.Х. Раскисление, дегазация, легирование стали / Б.Х. Хан, Н.Я. Ищук – М.: Металлургия, 1965 – 254 с.; [46] Лейтес, А.В. Защита стали в процессе непрерывной разливки / А.В. Лейтес. – М.: Металлургия, 1984. 200 с.; [282] Abraham, S. Development of an inclusion characterization methodology for improving steel product cleanliness / S. Abraham, J. Raines, R. Vodnar // AISTech. – 2013. – P.1069-1089) считает, что включения, образующиеся в процессе вторичного окисления, относятся к экзогенным, т.е. внесенными в металл другими материалами. Данный процесс в принципе мало чем отличается от процесса окисления в период кислородной продувки и последующего раскисления, продуктами которого являются эндогенные неметаллические включения.

3. В работе не рассмотрены мероприятия по выплавке жидкого полупродукта в сталеплавильном агрегате, в частности окислительный период.

4. В разделе «Построение прогнозной модели температуры металла» по маршрутам ДСП-УКП-УНРС и ДСП-УКП-ВД-УНРС отмечается, что наилучшее качество показала модель, построенная по алгоритму градиентный бустинг. Автор отмечает, что в топ значимых вошли 13 и 15 факторов соответственно. Среди обсуждаемых топ факторов есть «основность шлака $\text{CaO}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2)$ в ковше» и «Стойкость огнеупоров сталеразливочного ковша «шлаковый пояс» (плавок)». Хотелось бы понять, в чем автор видит физический смысл влияния этих параметров на температуру металла?

5. В разделе «Влияние геометрии сталевыпускного отверстия в печи на производительность цеха» проводится обсуждение изменения конструкции и размера эркерного отверстия. На первом этапе был предложен эркер с меньшим диаметром выходного отверстия – 160 мм (существующий цилиндрический имеет диаметр 180 мм). На основании этого автор считает: «В результате меньшая площадь струи контактирует с воздухом в сравнении со стандартным цилиндрическим эркером, что положительно сказывается на качестве металла» (стр.155). Это заключение является дискуссионным. Действительно мгновенное взаимодействие струи металла с атмосферой становится меньше, но если говорить об интегральном показателе взаимодействия разливаемого металла с атмосферой, то можно ожидать, что он вырастет. Видимо это и сказалось на последующих результатах, когда автор был вынужден увеличивать размер эркерного отверстия.

6. На стр.198 декларируется, «на практике было установлено, что для оперативного контроля нежелательного процесса вторичного окисления через шлак, следует осуществлять мониторинг снижения Al в промежуточном ковше, которого должно быть не более 0,0060 масс. % и мониторинг прироста кремния – не более 0,0050 масс. %. В случае превышения этих показателей необходимо воздействовать на технологический процесс». В этой связи возникает ряд вопросов: во-первых, как проводить реальный непрерывный мониторинг за содержанием алюминия и кремния и, во-вторых, о каких воздействиях на технологический процесс идет речь при отклонении от заданных параметров?

7. В Приложении Г основные фазы, которые были обнаружены в отложениях от разливочных стаканов: $\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$; Al_2O_3 ; $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$. Почему не был обнаружен легкоплавкий оксид $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$?

8. Хотелось бы понять, какие из представленных выводов и закономерностей автор считает фундаментальными, т.е. могут быть отнесены

не только к цехам с непрерывной разливкой, но и производящих поковочные слитки и/или отливки?

Сделанные замечания носят частный характер и не меняют общего положительного мнения о рецензируемой работе. Автореферат диссертации отражает её содержание.

ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании рассмотренных материалов диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, позволившее разработать комплексную технологию получения стали с повышенными требованиями к её чистоте по содержанию неметаллических включений, примесей и газов в условиях современных сталеплавильных цехов с учётом всей технологической цепочки, а также способ поиска критических точек поступления кислорода в металл извне в разрабатываемых и действующих технологиях, имеющие достаточно высокий уровень научной новизны и практической значимости. Считаю, что диссертационная работа **Ботникова Сергея Анатольевича** соответствует требованиям п. 9, Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.2 – металлургия черных, цветных и редких металлов.

Официальный оппонент, доктор технических наук, Советник технического директора ОАО «Электростальский завод тяжелого машиностроения»

Косырев Константин Львович,

дата 26.04.2024

144000, Московская обл., г. Электросталь, ул. Красная, 19
Телефон: +7(496)577-72-42
E-mail: eztm@eztm.ru

Я, Косырев Константин Львович, согласен на автоматизированную обработку персональных данных, приведенных в этом документе

подпись

Подпись К.Л. Косырева заверяю

Директор по управлению персоналом и общим вопросам ОАО «ЭЗТМ»



печать, дата

В.А. Костромитин