

На правах рукописи



Числавлев Владимир Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ НА ОСНОВЕ
РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ МЕТАЛЛА В
ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ**

Специальность 05.16.02 - Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новокузнецк – 2019

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

Согласно стратегии развития черной металлургии России на 2014-2020 годы и на перспективу до 2030 года создание высокоскоростных железнодорожных магистралей в Российской Федерации является проектом национального масштаба, который предопределяет развитие государства.

В настоящее время тенденции развития высокоскоростных железнодорожных магистралей и конкуренция мировых производителей рельсовой металлопродукции приводят к появлению новых стандартов и все большему ужесточению требований, предъявляемых к качеству рельсового металла. Металлургическое качество стали определяется химической однородностью и содержанием неметаллических включений, которые ухудшают эксплуатационные свойства металлопродукции и приводят к трещинообразованию и разрушению.

Гомогенизация металлического расплава и его рафинирование от неметаллических включений осуществляется во время внепечной обработки и при непрерывной разливке стали. Обеспечение условий рафинирования стального расплава в процессе непрерывной разливки позволяет значительно повысить эффективность мероприятий внепечной обработки стали.

В связи с тем, что промежуточный ковш машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является заключительной футерованной ёмкостью, в которой сталь находится в жидком состоянии, целесообразно обеспечивать в нем рафинирование металла от докристаллизационных неметаллических включений. Условия рафинирования металла в промежуточном ковше во многом определяются его внутренней геометрией и гидродинамическими процессами, которые обуславливают распределение и динамику движения металлического расплава и неметаллических включений. Зачастую вопросам распределения потоков металла при непрерывной разливке уделяется незначительное внимание, что приводит к неполному использованию потенциала промежуточного ковша как агрегата для обеспечения гомогенизации металла и повышения его чистоты по неметаллическим включениям. Гидродинамические процессы в промежуточном ковше определяются как геометрическими параметрами внутреннего объема ковша, так и технологическими особенностями непрерывной разливки стали. При сложившемся многообразии существующих конструктивных вариантов современных машин непрерывного литья заготовок и технологических аспектов непрерывной разливки стали, необходимо учитывать невозможность использования типовых технических решений при модернизации конкретного агрегата.

В связи с этим обеспечение гомогенизации металла и его рафинирования от неметаллических включений при организации соответствующих гидродинамических условий в промежуточном ковше на основе рационального распределения потоков металла является актуальной научно-практической задачей.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом хоздоговорных и госбюджетных НИР ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» в рамках: базовой части Государственного задания Минобрнауки РФ № АААА-Б18-218012390005-5 «Развитие теоретических основ процессов формирования качества рельсовой продукции для высокоскоростных железных дорог», 2017-2018 гг.; гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № АААА-А17-117030910047-9 «Разработка и применение аддитивных технологий при модернизации процессов производства металлопродукции ответственного назначения», 2017-2018 гг.; научно-исследовательской работы № АААА-Б17-217012040051-1 «Исследование потоков жидкого металла в промежуточном ковше», 2016 г.

Степень разработанности темы исследования.

Вопросам создания благоприятных гидродинамических условий в промежуточном ковше при непрерывной разливке стали уделяется большое внимание отечественных и зарубежных ученых и исследователей. Перспективным направлением является разработка специальных огнеупорных элементов для распределения потоков металла, однако разнообразие вариантов конфигурации внутреннего объема промежуточного ковша и отсутствие возможности использования универсальных решений при модернизации существующих промежуточных ковшей не позволяет добиться конкурентных показателей качества без проведения исследований для конкретных условий. Возможным решением проблемы является разработка конструкции огнеупорных элементов для заданных условий непрерывной разливки стали с научным обоснованием эффективности их использования с применением современных компьютерных и аддитивных технологий, включающих проектирование и создание виртуальной модели устройства современными средствами автоматизированного проектирования, математического моделирования методом конечных элементов и физического моделирования исследуемых процессов.

Цель и задачи работы.

Повышение эффективности гомогенизации и рафинирования рельсовой стали от неметаллических включений на основе рациональной организации гидродинамических процессов в промежуточных ковшах машин непрерывного литья заготовок.

Основные задачи:

1) Адаптировать для условий применения к промежуточным ковшам МНЛЗ метод исследования распределения времени пребывания жидкости в агрегате (проточном реакторе непрерывного действия) для оценки эффективности гомогенизации расплава.

2) Разработать и сконструировать лабораторно-экспериментальный комплекс для проведения исследований гидродинамических процессов в промежуточном ковше МНЛЗ.

3) Исследовать с использованием трехмерной математической модели гидродинамику стального расплава в промежуточных ковшах МНЛЗ с различной конфигурацией внутреннего объема.

4) Выполнить комплексное исследование влияния дополнительных огнеупорных элементов (пороги, струегасители, перегородки) различных конфигураций на процессы движения расплава.

5) Установить на основе теоретических и экспериментальных исследований зависимости и закономерности движения расплава при рафинировании металла в промежуточном ковше.

6) Разработать рациональную конструкцию и конфигурацию внутреннего объема промежуточного ковша четырехручьевого МНЛЗ, обеспечивающие эффективную гомогенизацию расплава рельсовой стали и его рафинирование от неметаллических включений.

7) Провести промышленную апробацию результатов исследований в технологической практике непрерывной разливки рельсовой стали в условиях АО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат» и внедрить их в учебный процесс при подготовке обучающихся по направлению 22.03.02 – Металлургия.

Научная новизна.

1) Развита научная основа повышения эффективности обработки стального расплава при непрерывной разливке посредством рациональной организации гидродинамических процессов в промежуточных ковшах МНЛЗ.

2) Установлены и научно обоснованы новые зависимости и закономерности влияния гидродинамических процессов в промежуточном ковше МНЛЗ на гомогенизацию расплава и эффективность рафинирования стали от неметаллических включений.

3) Получены новые количественные данные о влиянии огнеупорных элементов различных конфигураций на характеристики и структуру потоков при движении металлического расплава в промежуточном ковше МНЛЗ.

4) Разработана номограмма для определения структуры потоков расплава стали в промежуточном ковше при производстве металлопродукции с регламентированным уровнем загрязненности неметаллическими включениями.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1) Адаптирован для условий применения к промежуточным ковшам МНЛЗ метод оценки эффективности гомогенизации стального расплава, основанный на определении объемов жидкого металла находящихся в зонах: застойной (отсутствует циркуляция расплава), идеального вытеснения (режим течения расплава приближен к ламинарному) и идеального смешения (область с равномерным перемешиванием расплава).

2) Для проведения комплексных, многофакторных исследований гидродинамических процессов в промежуточных ковшах МНЛЗ создан лабораторно-экспериментальный комплекс (Патент РФ №164038), включающий в себя физическую модель ковша в масштабе 1:2,5, оснащенный устройствами для кондуктометрического анализа, средствами видеофиксации, контрольно-измерительной цифровой аппаратурой.

3) Получены соотношения, зависимости и закономерности для осуществления инженерных расчетов при проектировании конструкции

промежуточных ковшей, обеспечивающей эффективные гомогенизацию и рафинирование стали от неметаллических включений.

4) Разработана конструкция полнопрофильных перегородок, обеспечивающих рациональную организацию потоков расплава, его гомогенизацию и эффективное рафинирование рельсовой стали от неметаллических включений в промежуточном ковше.

5) Результаты исследований прошли апробацию в условиях АО «Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» и использованы при совершенствовании технологии непрерывной разливки рельсовой стали и конструкции промежуточных ковшей четырехручьевого МНЛЗ.

6) Полученные в работе научные результаты внедрены в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» в учебный процесс при подготовке обучающихся по направлению 22.03.02 – Металлургия.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных задач использованы методы: математического и физического моделирования; визуализации гидродинамических процессов с использованием красителя (перманганат калия); кондуктометрический, с использованием кондуктометра PS202; исследования распределения времени пребывания жидкости в агрегате. Загрязненность металла неметаллическими включениями оценивали с помощью металлографического метода (ГОСТ 1778-70). Исследования химического состава неметаллических включений выполнены с использованием сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 LMN, оснащенного аналитической системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments Advanced Aztec Energy Inca350/X-max 20 (ГОСТ Р 8.563-96 и МИ 2336-95, ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002). Численные эксперименты проведены на трехмерной математической модели течения металлического расплава в промежуточном ковше с использованием метода конечных объемов.

Положения, выносимые на защиту.

1) Результаты адаптации метода исследования распределения времени пребывания жидкости в агрегате (проточном реакторе непрерывного действия) для оценки эффективности рафинирования расплава стали от неметаллических включений для условий применения к промежуточным ковшам МНЛЗ.

2) Результаты экспериментальных исследований гидродинамических процессов в промежуточном ковше с различной конфигурацией внутреннего объема, проведенных на разработанном лабораторно-экспериментальном комплексе.

3) Результаты программной реализации модели гидродинамических процессов и математического моделирования движения металлического расплава в промежуточных ковшах МНЛЗ различных конструкций.

4) Конструкция полнопрофильных перегородок, обеспечивающих рациональную организацию потоков расплава, его гомогенизацию и эффективное рафинирование рельсовой стали от неметаллических включений в промежуточном ковше.

5) Результаты промышленной апробации в условиях АО «Объединенный

Западно-Сибирский металлургический комбинат» разработанной конструкции полнопрофильных перегородок в промежуточных ковшах четырехручьевого МНЛЗ при непрерывной разливке рельсовой стали.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности ВАК 05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов по п. 7 «Тепло- и массоперенос в низко- и высокотемпературных процессах»; п. 16 «Разливка продуктов плавки и методы непрерывной разливки».

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов, методов, методик, выводов и рекомендаций подтверждается использованием современных методов теоретического и экспериментального исследования процессов гидродинамики, качеством измерений их характеристик и статистической обработкой результатов; адекватностью реализованных физических и математических моделей; применением широко распространенных разнообразных и апробированных методов анализа; сопоставлением полученных результатов с данными других исследователей; результатами промышленной апробации.

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения» (г. Новокузнецк, 2014, 2015, 2016, 2017 гг.); XVIII Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2014 г.); Инновационном конвенте «Кузбасс: образование, наука, инновации» (г. Кемерово, 2014, 2015, 2016 гг.); XI Международной научно-практической конференции «Литье. Металлургия. 2015» (Украина, г. Запорожье, 2015 г.); Международной интерактивной научно-практической конференции (г. Екатеринбург, 2015 г.); XIII Международной научно-технической конференции молодых специалистов (г. Новокузнецк, 2015 г.); VIII конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий» (г. Москва, 2017 г.); XX Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2017 г.); XV Международной конференции огнеупорщиков и металлургов (г. Москва, 2017 г.); XV Международном Конгрессе сталеплавильщиков и производителей металла (г. Тула, 2018 г.).

Публикации.

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 22 печатных работах, в том числе 3 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, а также в 2 статьях, входящих в базы данных Web of Science и Scopus. По результатам работы получено 2 патента РФ на полезную модель.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы и приложений. Изложена на 170 страницах, содержит 27 таблиц, 105 рисунков. Список литературы включает 189 наименований.

Основное содержание работы

Во введении рассмотрены актуальность и степень разработанности темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, отражены научная новизна и значимость работы, методология и методы исследования, изложены положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов диссертационной работы.

В первом разделе выполнен анализ публикаций в научно-технической литературе и рассмотрено современное состояние непрерывной разливки стали, современное состояние и тенденции развития производства рельсовой металлопродукции, характеристика качества непрерывнолитой заготовки рельсовых марок стали, методы и способы обработки металлического расплава в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок.

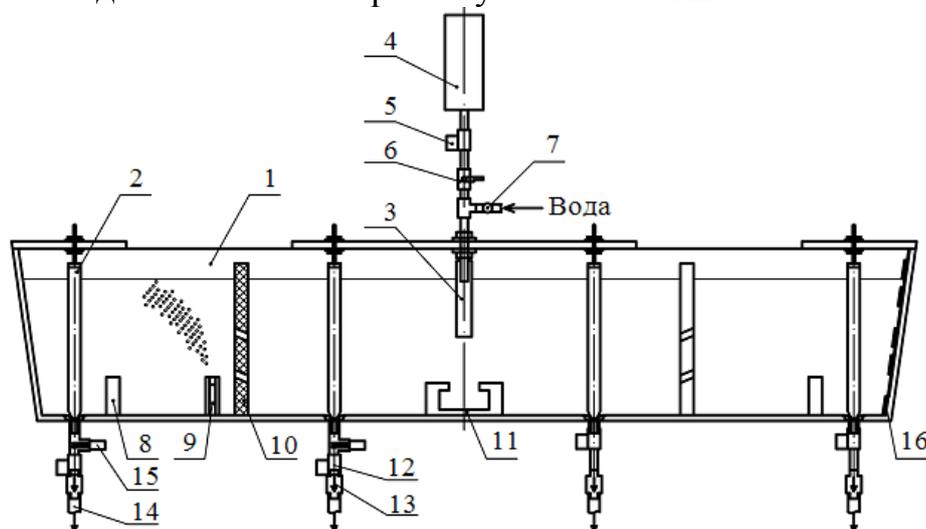
Установлено, что перспективным направлением является использование специальных огнеупорных элементов (порогов, струегасителей, перегородок и т.д.) в промежуточном ковше, обеспечивающих благоприятные гидродинамические условия для гомогенизации металлического расплава и его рафинирования от неметаллических включений. Проанализированы современные технические решения, определены основные проблемы, связанные с разработкой конфигурации внутреннего объема промежуточного ковша, обеспечивающей эффективную организацию движения потоков металлического расплава. Отмечено отсутствие универсальных решений и рекомендаций по разработке огнеупорных элементов с оптимальными геометрическими параметрами, позволяющими создавать благоприятные гидродинамические условия для гомогенизации металлического расплава и его рафинирования от неметаллических включений в промежуточных ковшах различной конструкции.

С учетом проанализированных данных определены основные направления исследований и сформулированы задачи.

Во втором разделе приведен анализ условий подобия исследуемых процессов, разработаны основные положения физического моделирования, разработан проект лабораторно-экспериментального комплекса и описана методика проведения исследований гидродинамических процессов в промежуточном ковше. Программно реализована математическая модель течения металлического расплава в промежуточном ковше четырехручьевого МНЛЗ.

Основным элементом лабораторно-экспериментального комплекса (рисунок 1) является физическая модель промежуточного ковша, выполненная из прозрачного органического стекла в масштабе 1:2,5 с обеспечением подобия исследуемых процессов. В качестве моделирующей жидкости используется вода. Визуализация потоков жидкости осуществляется вводом в струю воды индикатора (красителя). В качестве красителя используется водный раствор перманганата калия концентрацией 3 г/л. При проведении моделирования производится непрерывная видеофиксация протекающих процессов. Оценка степени гомогенизации жидкости, уточнение минимального времени пребывания моделирующей жидкости в объеме модели промежуточного ковша и определение объемов характерных зон осуществляется кондуктометрическим методом. В качестве индикатора используется раствор хлорида натрия. Измерение

электрической проводимости и содержания NaCl в воде производится солемером PS202, датчики которого установлены в разливочных стаканах модели промежуточного ковша. При этом показания солемера непрерывно регистрируются, что позволяет построить кривую распределения времени пребывания индикатора в промежуточном ковше и выполнить количественную оценку объемных долей областей промежуточного ковша.



- 1 – модель промежуточного ковша; 2 – стопор; 3 – труба подвода моделирующей жидкости; 4 – резервуар для красителя (солевого раствора);
 5 – электромагнитный клапан (нормально-закрытый) для подачи индикатора;
 6 – кран; 7 – вентиль, регулирующий расход моделирующей жидкости;
 8-11 – модели рафинирующих устройств; 12 – электромагнитный клапан (нормально-открытый) для отвода моделирующей жидкости; 13 – расходомеры;
 14 – линии отвода моделирующей жидкости; 15 – датчики кондуктометра;
 16 – датчики уровня моделирующей жидкости

Рисунок 1 – Схема лабораторно-экспериментального комплекса для исследования гидродинамических процессов в промежуточном ковше

Для условий разливки стали через промежуточный ковш адаптирован метод исследования распределения времени пребывания жидкости в проточном реакторе непрерывного действия, основанный на определении объемов жидкого металла, находящихся в зонах: застойной (отсутствует циркуляция расплава), идеального вытеснения (режим течения расплава приближен к ламинарному) и идеального смешения (область с равномерным перемешиванием расплава) и разработана методика оценки эффективности гомогенизации расплава стали.

Физические модели огнеупорных элементов реализованы методом послойного моделирования (FDM) с использованием технологии 3d-печати, что позволило обеспечить точность геометрических параметров моделей.

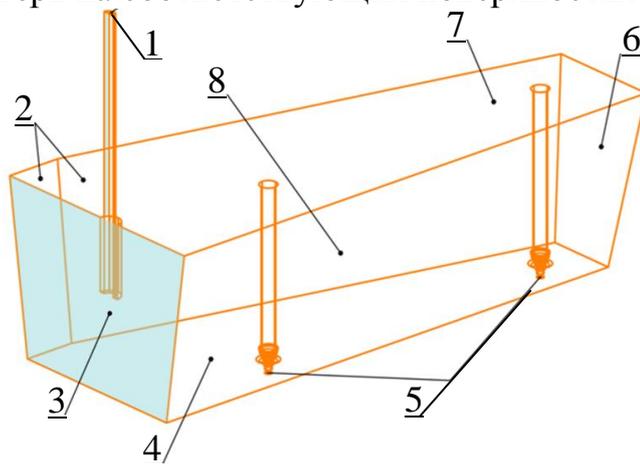
Исследование гидродинамики металла проводили для условий разливки стали со скоростью 0,7 м/мин с подачей металла в промежуточный ковш через защитную трубу и получением заготовки сечением 300×360 мм.

Моделирование проводили при различных вариантах конструкции промежуточного ковша: **1)** без огнеупорных элементов (базовый вариант); **2)** с установкой порогов на расстоянии 144 мм от оси защитной трубы: А) / Б) высота

228 мм, угол среза верха $0^\circ / 30^\circ$; В) / Г) высота 171 мм, угол среза верха $0^\circ / 30^\circ$; Д) / Е) высота 114 мм, угол среза верха $0^\circ / 30^\circ$; Ж) / З) высота 57 мм, угол среза верха $0^\circ / 30^\circ$; **3**) с установкой струегасителей, различной высоты: А) 64 мм; Б) 80 мм; В) 96 мм; Г) 112 мм; Д) 128 мм; **4**) с установкой полнопрофильных перегородок с переливными отверстиями, направляющими поток моделирующей жидкости к поверхности под углом 30° , различных конфигураций на расстоянии 144 мм от оси защитной трубы: А) диаметр 5 отверстий верхнего ряда 20 мм и 4 отверстий нижнего – 20 мм; Б) диаметр 5 отверстий верхнего ряда 32 мм и 4 отверстий нижнего – 20 мм; В) диаметр 5 отверстий верхнего ряда 40 мм и 4 отверстий нижнего – 32 мм; Г) диаметр 4 отверстий верхнего ряда 40 мм и 3 отверстий нижнего – 32 мм; Д) диаметр 4 отверстий верхнего ряда 40 мм и 3 отверстий нижнего – 20 мм; Е) диаметр 4 отверстий верхнего ряда 32 мм и 3 отверстий нижнего – 20 мм.

Для получения количественной информации о распределении температуры металла и скорости потоков в объеме промежуточного ковша использованы методы вычислительной гидродинамики, при реализации трехмерной, турбулентной математической модели с однофазным представлением металлического расплава. В качестве расчетной области, в связи с наличием вертикальной плоскости симметрии, принята половина внутреннего объема промежуточного ковша, занимаемая жидким расплавом. Для построения конечно-элементной модели расчетная область разделена на 350000 конечных объемов.

Математическая модель учитывает такие свойства жидкой стали как плотность, вязкость, теплопроводность и теплоемкость. В качестве граничных условий и нагрузок (рисунок 2) на входе заданы значения массового расхода (Q , т/мин) и температуры расплава (T , К), для стенок и поверхности металла – значения тепловых потерь на соответствующих поверхностях (q_i , кВт/м²).



- 1 – защитная труба (вход), $Q=2,12$ т/мин, $T=1786$ К, $q_6=-1,75$ кВт/м²;
 2 – задние стенки, $q_3=-3,2$ кВт/м²; 3 – Плоскость симметрии;
 4 – днище, $q_5=-3,2$ кВт/м²;
 5 – Разливочные стаканы (выход), $Q=2,12$ т/мин, $q_7=-1,75$ кВт/м²;
 6 – боковые стенки, $q_4=-3,8$ кВт/м²; 7 – поверхность, $q_1=-15$ кВт/м²;
 8 – передняя стенка, $q_2=-3,2$ кВт/м²

Рисунок 2 – Граничные условия и нагрузки

В третьем разделе приведены результаты физического и математического моделирования гидродинамических процессов в промежуточном ковше. Установлено (рисунок 3), что при базовом варианте конструкции промежуточного ковша время достижения центральных и периферийных разливочных стаканов составляет 6 и 52 с соответственно, здесь и далее время соответствуют реальным условиям металлургического процесса.

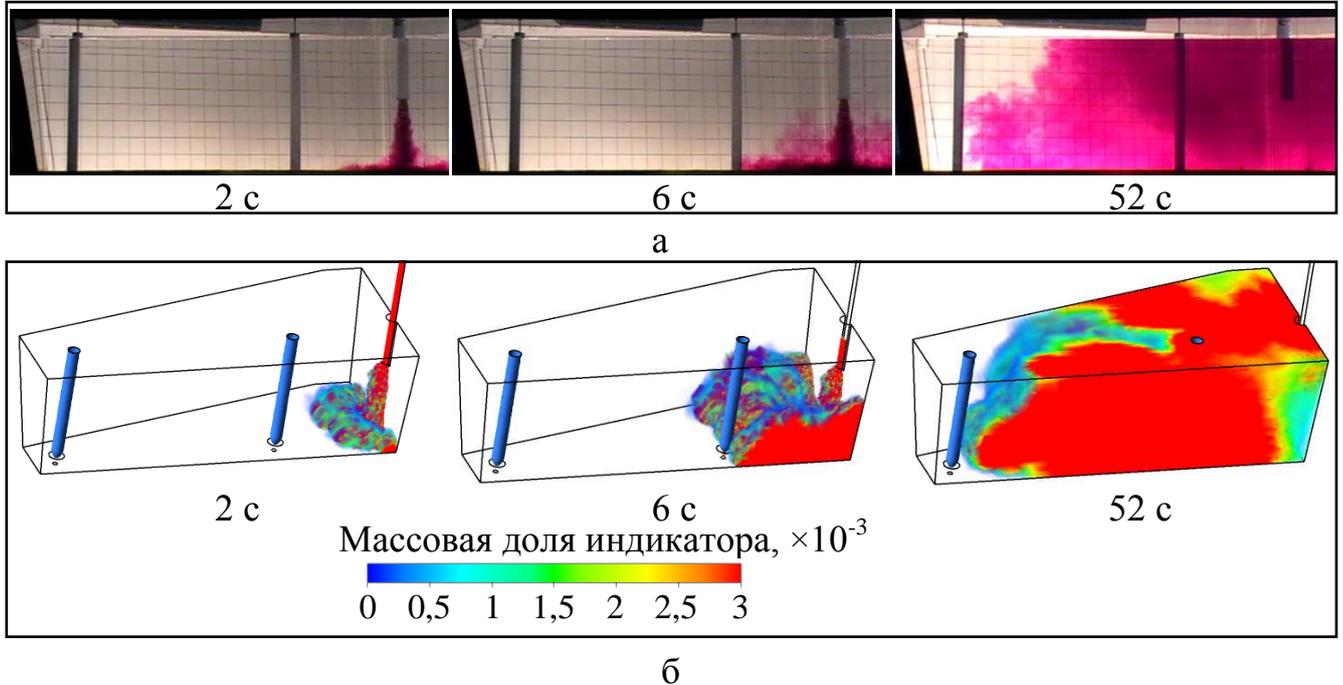
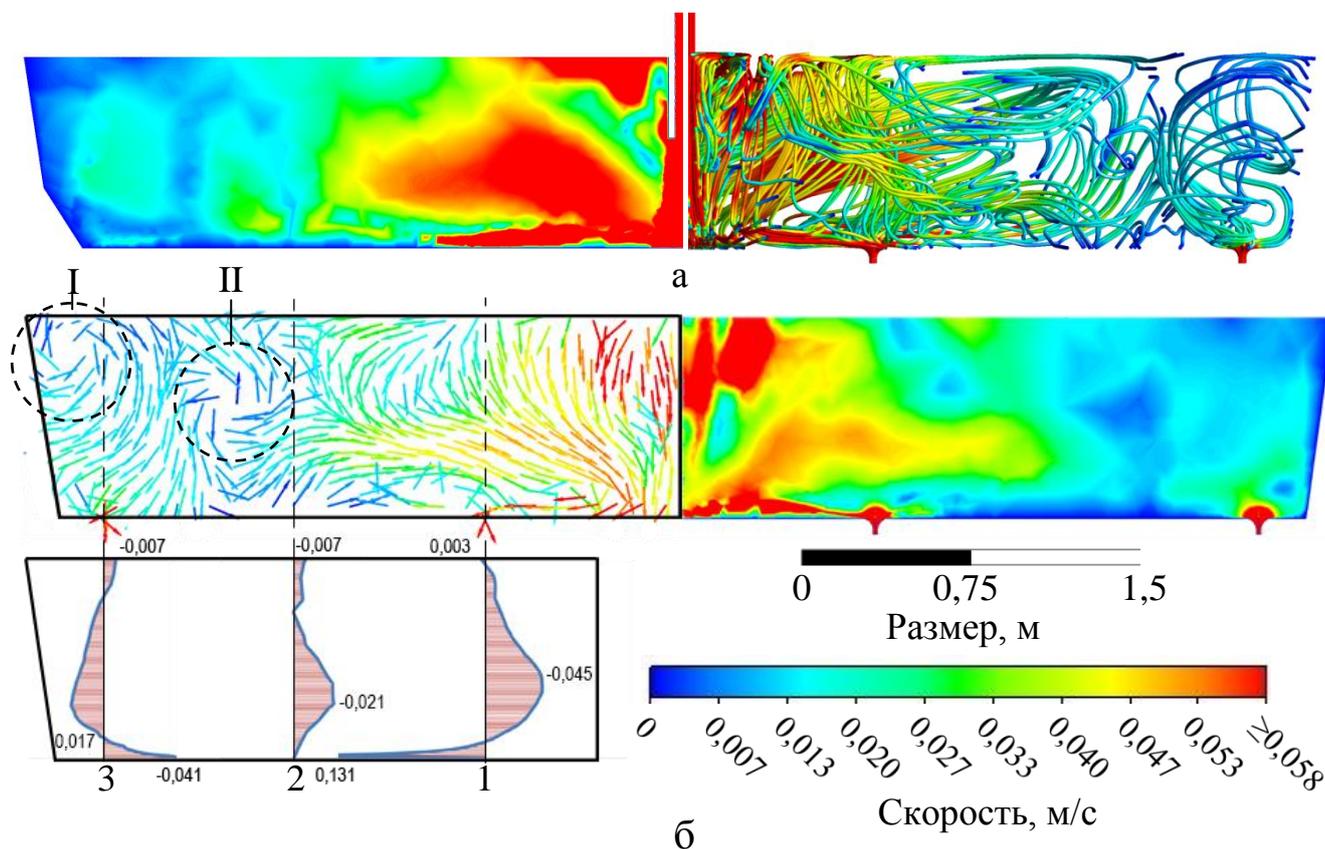


Рисунок 3 – Гидродинамическая картина в промежуточном ковше базовой конструкции, полученная методами физического (а) и математического моделирования (б)

Поступающий из сталеразливочного ковша поток расплава (рисунки 3, 4), попадая в объем промежуточного ковша, достигает дна и разделяется, формируя высокоскоростные потоки.

Часть придонных потоков направляется к центральным разливочным стаканам на расстоянии 0-50 мм от дна промежуточного ковша со скоростью достигающей 0,131 м/с (рисунок 4, эпюра 1), создавая «короткие пути». После достижения центральных разливочных стаканов скорости придонных потоков снижаются (рисунок 4, эпюра 2). В зоне периферийных стопоров и торцевых стенок наблюдается наличие застойных зон, что в реальных условиях способствует температурной и химической неоднородности металлического расплава. Анализ векторов скорости потоков расплава (рисунок 4) позволяет установить наличие в промежуточном ковше характерных вихревых областей – у торцевой стенки (рисунок 4, область I), между периферийным и центральным стопорами (рисунок 4, область II).

В результате анализа данных длин линий тока, полученных при математическом моделировании (рисунок 4, а), установлено, что более 60 % линий имеют длину от 0 до 4,4 м и лишь 8 % линий имеют длину более 8,8 м, что подтверждает наличие большого числа коротких путей движения расплава. При этом минимальная длина линии тока составила 0,81 м, а максимальная – 40,35 м.



а – продольное сечение по защитной трубе; б – продольное сечение по стопорам

Рисунок 4 – Контурная карта результирующей скорости движения расплава параллельно плоскости XOY

Данные, полученные кондуктометрическим методом на физической модели и при численном моделировании, подтвердили неравномерное распределение потоков моделирующей жидкости в промежуточном ковше базовой конструкции.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о том, что объем застойных зон в промежуточном ковше базового варианта конструкции составляет ~28 %, при этом объем зон идеального вытеснения и идеального смешения составляет ~5,5 % и ~66,5 % соответственно. Разность значений температуры на выходе из разливочных стаканов составляет 5,5 градусов. Наличие коротких путей к центральным разливочным стаканам не позволяет обеспечить в полной мере гомогенизацию металлического расплава по химическому составу и температуре, а также рафинирование металлического расплава от докристаллизационных неметаллических включений, транспортируемых потоком металла, в кристаллизатор.

Дальнейшие исследования гидродинамики металла в промежуточном ковше проводили с использованием порогов, струегасителей различных конфигураций.

Установлено, что увеличение высоты моделей порогов до 228 (570) мм (вариант Б) способствовало увеличению времени достижения порции моделирующей жидкости разливочных стаканов в 8 раз и 1,9 раза соответственно, при сравнении с базовым вариантом и уменьшению объема застойных зон до 23 %, при этом применение порогов со скошенной верхней частью, позволило увеличить время достижения порции моделирующей жидкости разливочных

стаканов в среднем на 3 с. Использование струегасителя позволило увеличить время достижения порции моделирующей жидкости центрального и периферийного разливающих стаканов в 6,3 раз и 2,4 раза соответственно, при сравнении с базовым вариантом. При этом увеличение высоты модели струегасителя до 128 (320) мм (вариант Д) способствует уменьшению объема застойных зон до 25 %.

При установке полнопрофильных перегородок с переливными отверстиями происходит разделение внутреннего объема промежуточного ковша на отдельные камеры – приемную и разливные. В приемной камере происходит активная циркуляция моделирующей жидкости, через переливные отверстия поток поступает в разливные камеры (рисунок 5).

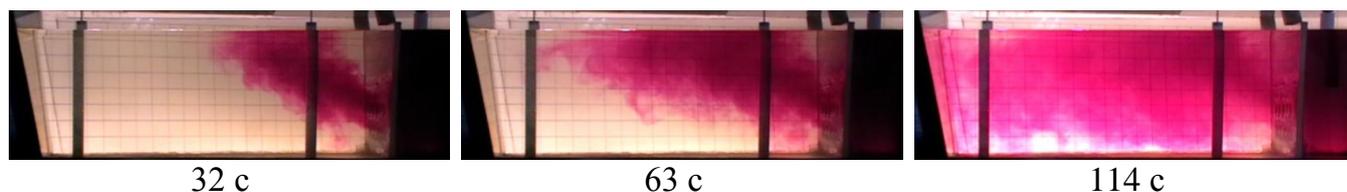


Рисунок 5 – Гидродинамическая картина в промежуточном ковше с использованием полнопрофильных перегородок (вариант Б)

При анализе результатов физического и математического моделирования (рисунки 6, 7) гидродинамических процессов в промежуточном установлено, что конфигурация перегородок с 2 рядами отверстий – диаметром 20 (50) мм для нижнего ряда (4 отверстия) и 32 (80) мм для верхнего ряда (5 отверстий) (вариант Б) является наиболее рациональной, при этом суммарная площадь отверстий 5278 (32987) мм² и их расположение обеспечивают увеличение минимального времени достижения потока центральных и периферийных разливающих стаканов в 19 и 2,3 раза соответственно, различаясь на 6 с (рисунок 7), что свидетельствует об активной циркуляции моделирующей жидкости и ее гомогенизации, минимальное значение объема застойных зон ~18 % (рисунок 8). Разность значений температуры на выходе из разливающих стаканов составляет 0,5 градусов.

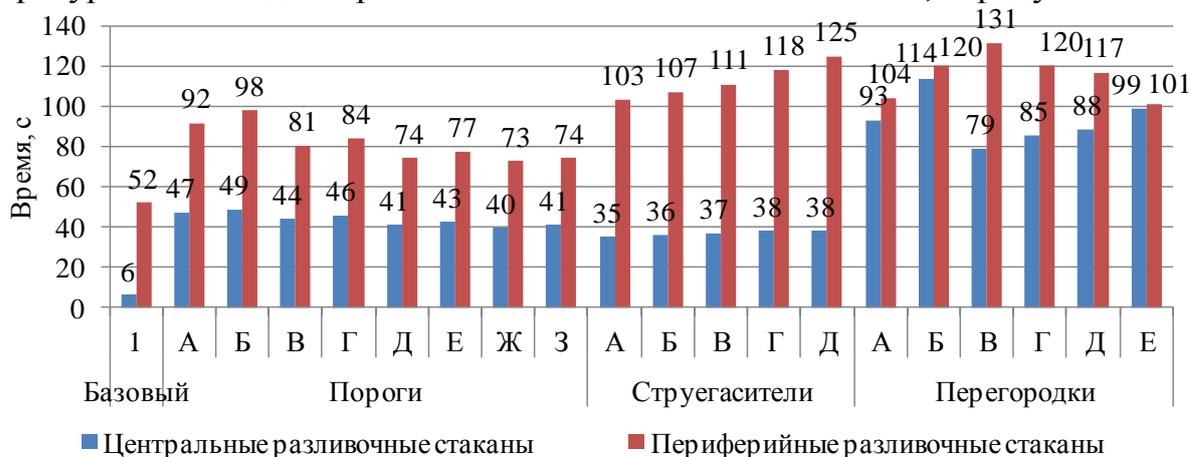


Рисунок 6 – Минимальное время достижения потока разливающих стаканов при использовании различных вариантов внутренней конфигурации промежуточного ковша

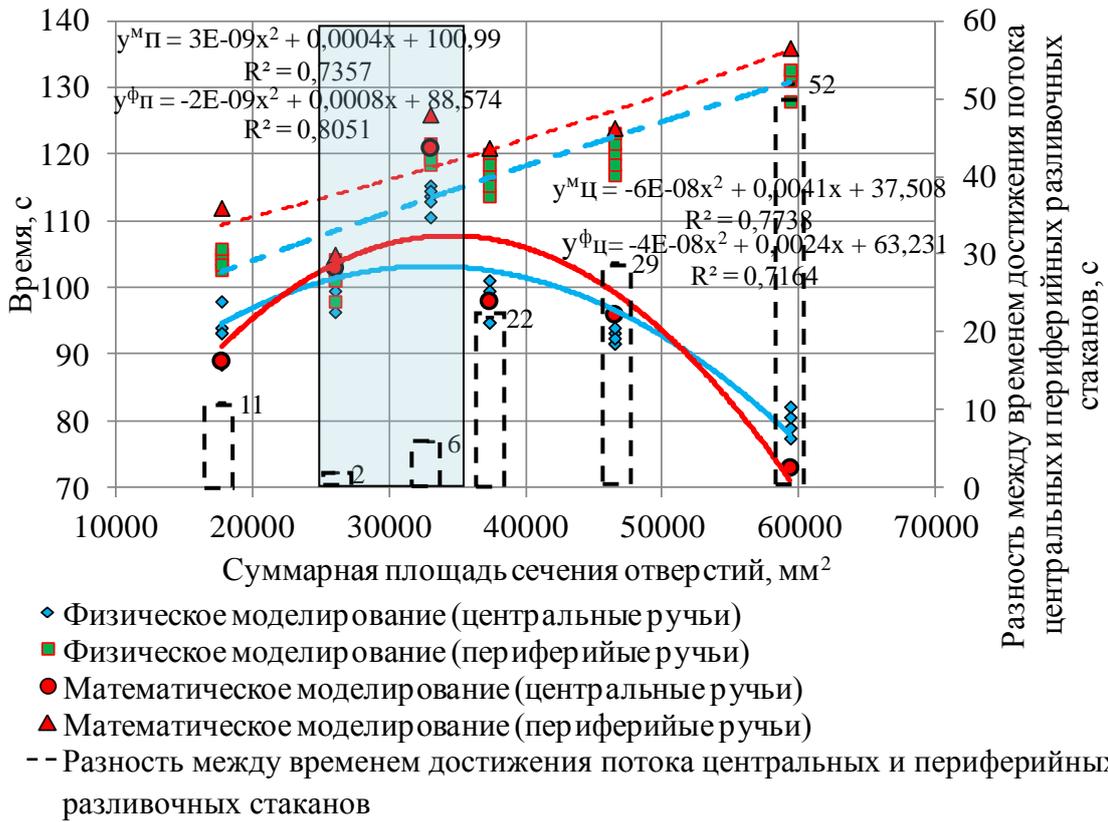


Рисунок 7 – Сравнение отношения минимального времени достижения порции жидкости разливных стаканов к площади живого сечения отверстий перегородок при физическом и математическом моделировании

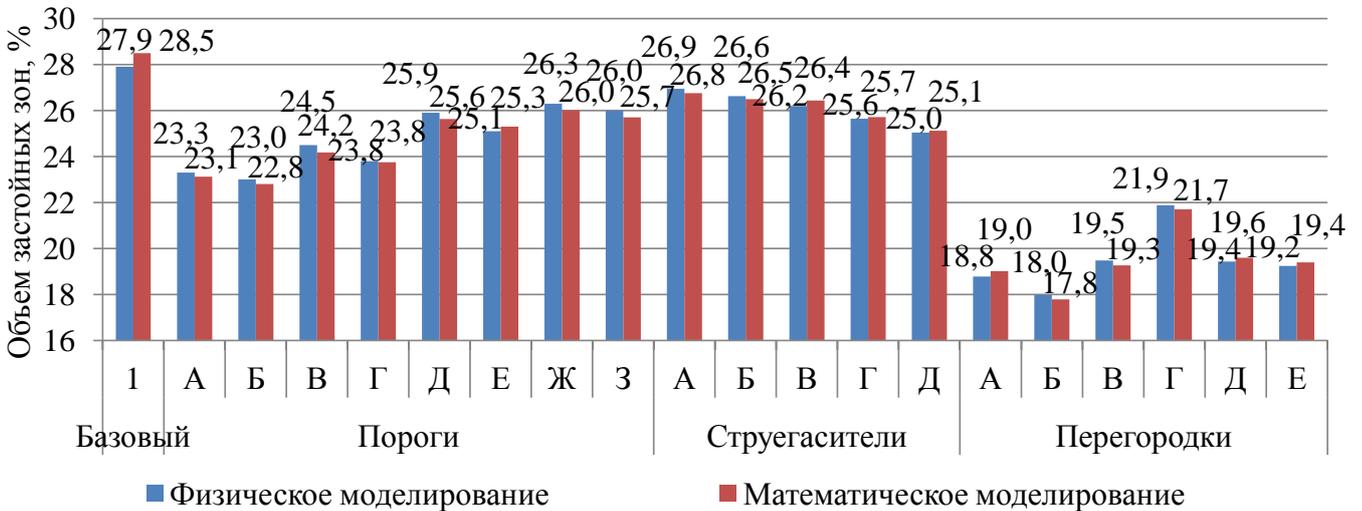


Рисунок 8 – Объём застойных зон промежуточного ковша при использовании различных вариантов внутренней конфигурации промежуточного ковша

В промышленных условиях при установке перегородок в приемной камере металл, циркулирует в замкнутой области, активно перемешиваясь, что способствует укрупнению неметаллических включений. Попадая через переливные отверстия в разливные камеры, поток металла направлен к поверхности раздела металл-ассимилирующий шлак и движется вдоль нее, что способствует рафинированию расплава.

В четвертой главе приведены исходные условия проведения промышленного исследования, результаты анализа распределения примесей в непрерывнолитой заготовке, анализ загрязненности непрерывнолитой заготовки неметаллическими включениями. Представлены результаты анализа качества рельсовой металлопродукции.

Разливка стали в электросталеплавильном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК» осуществляется на четырехручьевой машине непрерывного литья заготовок № 1 с получением заготовок сечением 300×360 мм. В зависимости от марки стали и температуры металла в промежуточном ковше скорость разливки составляет 0,4-0,8 м/мин.

Для оценки равномерности распределения примесей по сечению непрерывнолитой заготовки выполнен расчет значений степени ликвации.

Установлено, что склонность к ликвации различных элементов, содержащихся в стали не одинакова, для темплета вырезанного из третьей заготовки первого ручья (3-1) распределяется следующим образом: сера (37,5 %), фосфор (25,0 %), кремний (16,1 %), марганец (9,9 %), углерод (6,1 %); из заготовки (3-3) распределяется следующим образом: сера (50 %), фосфор (34,4 %), кремний (19,4 %), марганец (12,3 %), углерод (9,8 %). При этом степень ликвации на заготовке (3-1), полученной с использованием в промежуточном ковше полнопрофильных перегородок разработанной конструкции снизилась по углероду в 1,2 раз, марганцу и кремнию в 1,7 раза, фосфору в 1,5 раз и сере в 1,4 раза, а на третьей заготовки третьего ручья (3-3) снизилась в 2,5; 2,7; 2,1; 2,1; 2,8 раза соответственно, относительно значений, полученных на заготовке с МНЛЗ при базовом варианте конструкции внутреннего объема промежуточного ковша.

Для исследования загрязненности металла неметаллическими включениями (ГОСТ 1778-70) были вырезаны 6 образцов из различных зон непрерывнолитой заготовки (центральная зона, зона столбчатых кристаллов, корковая зона) с заготовки (3-1) и заготовки (3-3), разлитой на МНЛЗ при базовом и сравнительном вариантах конфигурации внутреннего объема промежуточного ковша. Исследования проводились на нетравленных шлифах с использованием металлографического микроскопа ЛабоМет-И1 при увеличении в 100 крат в соответствии с ГОСТ 1778-70. По результатам исследования установлено, что в образцах наблюдалось преимущественное наличие оксидов точечных, выявлено присутствие силикатов недеформирующихся и сульфидов, при этом наибольшая загрязненность неметаллическими включениями наблюдалась в центральной зоне, а наименьшая – в корковой. При использовании в промежуточном ковше полнопрофильных перегородок, разработанной конструкции, наблюдается снижение загрязненности в различных зонах непрерывнолитых заготовок, полученных с центральных (3-3) и периферийных (3-1) ручьях неметаллическими включениями (оксиды точечные, силикаты недеформирующихся, сульфиды). При этом балл загрязненности оксидами точечными снизился с 3а до 1а.

При анализе статистических данных установлено, что брак по неметаллическим включениям выявленный на установке автоматизированного эхо-импульсного контроля рельсов SONOTRON TM/24 («мокрого»

ультразвукового контроля (МУЗК)) в соответствии с ТИ 899-РБЦ-19 за 2016 г. составил 2,64 %, а за 2017 г. 3,72 %, что в среднем за два года составило 3,18 %.

Металлографические исследования внутренних дефектов, выявленных при текущем контроле на установке УКР-64Э ЛНК 100 м, проводились в испытательном центре АО «ЕВРАЗ ЗСМК» по 5 пробам длиной 260 - 300 мм, вырезанных из четырёх рельсов типа Р65 стали марки Э76ХФ плавов 25580, 25572 и 14476. Химический анализ проводился в различных секторах неметаллических включений. Установлено, что в секторах пробы № 4 основными составляющими являются оксиды кремния и кальция. В пробе № 5 установлены оксиды алюминия, кремния и кальция.

Эффективность различных конфигураций внутреннего объема промежуточного ковша оценивалась по количеству отбракованных рельсов на ЛНК-100 м на установке автоматизированного эхо-импульсного контроля рельсов SONOTRON TM/24 по проведенным опытно – промышленным исследованиям без использования огнеупорных элементов в промежуточном ковше (сравнительная серия); с использованием струегасителя (рисунок 9, а); с использованием полнопрофильных перегородок (рисунок 9, б).

Из результатов опытно-промышленных исследований (рисунок 10) следует, что в сравнительной серии количество отбракованных рельсов по дефектам неметаллические включения достигает 90 шт. или 7 %, при этом количество дефектных рельсов произведенных из заготовок разлитых на центральных ручьях составляет 62 шт. (4,8 %) и периферийных ручьях 28 шт. (2,2 %). Количество отбракованных рельсов произведенных из заготовок, разлитых на центральных ручьях в 2,2 раза больше чем разлитых на периферийных ручьях. Такое неравномерное распределение брака рельсов по неметаллическим включений по центральным и периферийным ручьям свидетельствует о «коротких путях» по которым неметаллические включения с потоком расплава попадают в центральные разливочные стаканы, что подтверждает результаты моделирования.



а



б

а – струегаситель; б – перегородка (после эксперимента, серия 20 плавов);

Рисунок 9 – Промежуточный ковш МНЛЗ №1 ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК», оборудованный огнеупорными элементами

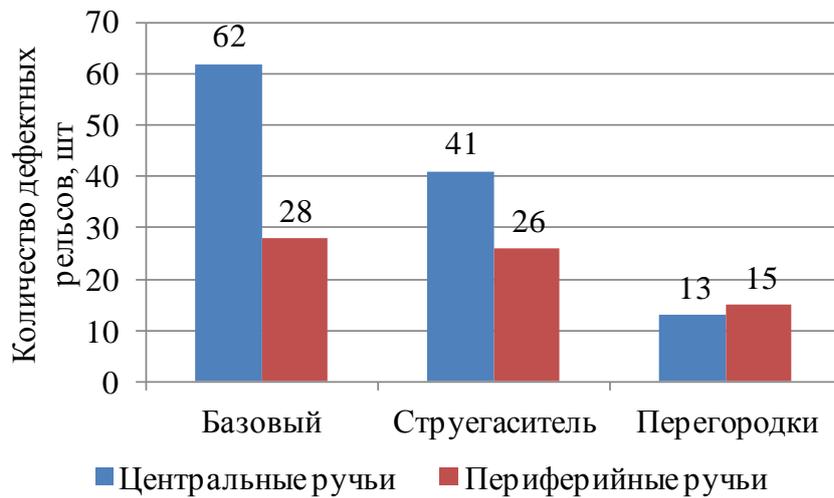


Рисунок 10 – Количество дефектных рельсов в серии по центральным и периферийным ручьям при различных вариантах внутренней конфигурации промежуточного ковша

При использовании струегасителя общее количество отбракованных рельсов снижается до 67 шт. (5,2 %) или на 25,6 % при сопоставлении со сравнительной серией, также снижается соотношение по центральным (41 шт.) и периферийным (26 шт.) ручьям до 1,58, что свидетельствует о более благоприятных условиях для ассимиляции неметаллических включений рафинировочным шлаком, при которых основной поток расплава взаимодействует с рафинировочным шлаком в центральной области промежуточного ковша.

При установке полнопрофильных перегородок количество отбракованных рельсов в серии составило 28 шт. (2,19 %). Количество дефектных рельсов произведенных из заготовок, разлитых на центральных и периферийных ручьях составило 13 и 15 шт. соответственно, а их соотношение 0,87, что позволяет сделать вывод о более рациональных гидродинамических условиях в промежуточном ковше при установке полнопрофильных перегородок разработанной конструкции. При данных условиях отсутствуют короткие пути, неметаллические включения двигаясь в потоке расплава вблизи поверхности рафинировочного шлака в значительной степени им ассимилируются.

На основе анализа результатов промышленных экспериментов, физического и математического моделирования для осуществления прогнозных расчетов количества отбракованных по неметаллическим включениям рельсов (Б, %) получено соотношение:

$$B = -19,479 \cdot V_{ив} + 5,604 \cdot V_{ис} + 15,632 \cdot V_з, \quad (1)$$

$$V_{ив} + V_{ис} + V_з = 1, \quad (2)$$

где $V_{ив}$, $V_{ис}$, $V_з$ – объемные доли зон идеального смешения, идеального вытеснения и застойные зоны, соответственно.

На базе полученного соотношения (1) разработана номограмма для прогнозирования количества отбракованных рельсов на основе данных о структуре потоков в промежуточном ковше (рисунок 11).

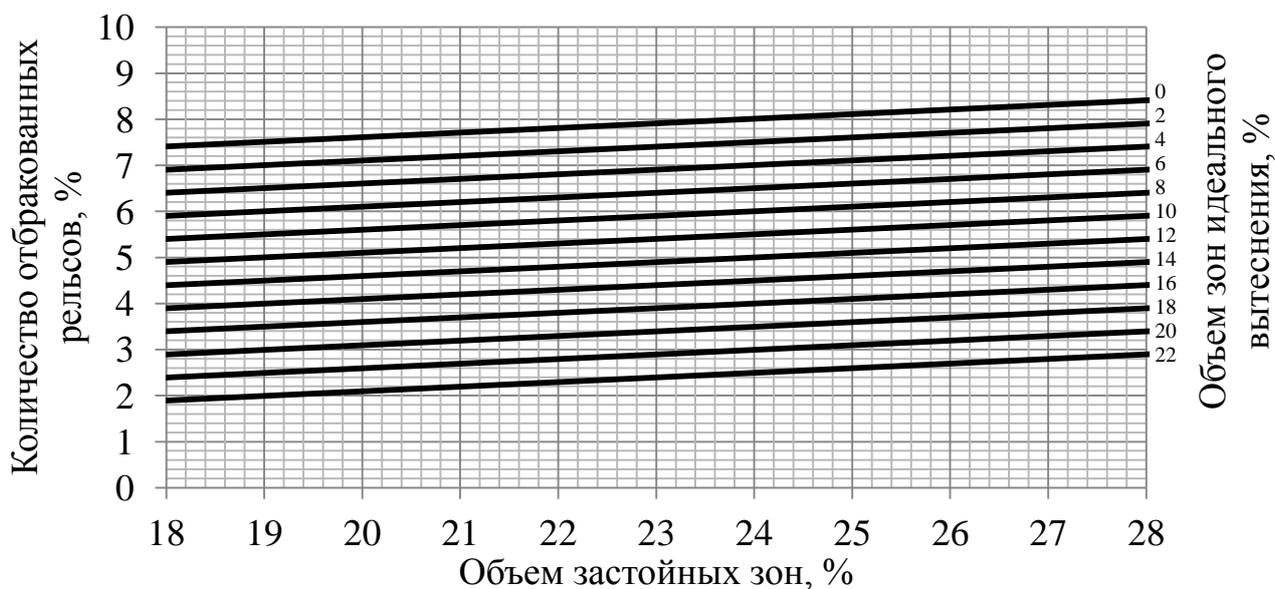


Рисунок 11 – Номограмма для прогнозирования количества отбракованных рельсов на основе данных о структуре потоков в промежуточном ковше

Таким образом, при использовании полнопрофильных перегородок разработанной конфигурации количество бракованных рельсов снизилось с 3,18 % до 2,19 %. Прогнозируемый годовой экономический эффект от снижения брака рельсов по дефекту неметаллические включения в ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» составляет 42,5 млн. руб.

Заключение содержит основные выводы по работе.

В приложениях приведены расчет экономического эффекта при использовании в промежуточном ковше полнопрофильных перегородок разработанной конструкции, справка о применении в производстве и акт внедрения в учебный процесс результатов работы.

Заключение

В процессе выполнения диссертационной работы, получены следующие основные результаты:

1) Для оценки эффективности гомогенизации расплава стали по химическому составу и температуре адаптирован метод исследования распределения времени пребывания жидкости в проточном реакторе непрерывного действия, основанный на определении объемов жидкого металла, образующих характерные зоны: застойную (отсутствует циркуляция расплава), идеального вытеснения (режим течения расплава приближен к ламинарному) и идеального смешения (область с равномерным перемешиванием расплава).

2) Разработан лабораторно-экспериментальный комплекс для исследования гидродинамических процессов в промежуточном ковше МНЛЗ (Патент РФ №164038).

3) На основе результатов физического и математического моделирования гидродинамических процессов в промежуточных ковшах трапецевидной формы четырехручьевых МНЛЗ с различной конфигурацией внутреннего пространства установлено что:

– использование порогов и струегасителей различных конфигураций позволяет увеличить минимальное время пребывания порции расплава в объеме промежуточного ковша в 2,5 и 2,8 раза и уменьшить объем застойных зон в 1,2 и 1,1 раза соответственно.

– при разделении внутреннего объема промежуточного ковша полнопрофильными перегородками с переливными отверстиями создается контур активной циркуляции, охватывающий значительную область промежуточного ковша, при этом разница в значениях минимального времени достижения основного потока расплава центральных и периферийных разливочных стаканов не зависит от скорости разливки, определяется общей площадью отверстий в перегородках и при ее увеличении с 17671 мм² до 59376 мм² изменяется от 2 до 52 с, достигая минимального значения при 25997 мм².

4) Установлены зависимости и научно обоснованы закономерности влияния конструктивных параметров (высоты порогов и струегасителей, суммарной площади сечений, количества и компоновки отверстий перегородок) на минимальное время достижения расплава разливочных стаканов, степень гомогенизации и структуру потоков в объеме промежуточного ковша для использования в инженерных расчетах при проектировании конфигурации внутреннего объема промежуточных ковшей.

5) Разработана номограмма для определения требуемой структуры потоков металлического расплава (объемов зон: застойной, идеального вытеснения и идеального смешения) в промежуточном ковше при производстве металлопродукции с регламентированным уровнем загрязненности неметаллическими включениями.

6) В результате промышленной апробации разработанной конструкции полнопрофильных перегородок в промежуточных ковшах четырехручьевого блюмовой МНЛЗ при непрерывной разливке рельсовой стали марки Э76ХФ с получением заготовок сечением 300×360 мм условиях ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» установлено, что их применение позволяет снизить:

– степень ликвации в металле периферийных ручьев по углероду в 1,2 раз, марганцу и кремнию в 1,7 раза, фосфору в 1,5 раз и сере в 1,4 раза, а с центральных ручьев в 2,5; 2,7; 2,1; 2,1; 2,8 раза соответственно;

– балл загрязненности металла оксидами точечными с 3а до 1а;

– количество отбракованных рельсов в серии с 7,0 % до 2,19 %;

– количество дефектных рельсов, произведенных из заготовок, разлитых на центральных и периферийных ручьях в 4,8 и 1,9 раза соответственно, а их соотношение с 2,2 до 0,87.

7) Результаты диссертационной работы приняты к промышленному внедрению для совершенствования технологии непрерывной разливки рельсовой стали в электросталеплавильном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Протопопов, Е.В. Исследование процессов течения металлического расплава в промежуточном ковше МНЛЗ методами вычислительной гидродинамики / Е.В. Протопопов, **В.В. Числавлев**, С.В. Фейлер // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2015. – № 4. – С. 19-23.

2. Разработка конструкции огнеупорных элементов для рафинирования стали при непрерывной разливке / **В.В. Числавлев**, С.В. Фейлер, Д.В. Бойков, Д. Т. Неунывахина // Новые огнеупоры. – 2017. – № 11. – С. 22-26.

3. **Числавлев, В.В.** Разработка конструкции огнеупорных элементов для рафинирования стали в промежуточном ковше МНЛЗ / **В.В. Числавлев**, С.В. Фейлер, Д.В. Бойков, Д.Т. Неунывахина // Новые огнеупоры. – 2017. – № 3. – С. 73-74.

Статьи в иностранных журналах:

4. Design Engineering Of Refractory Components For Use In Refining Continuous-Cast Steel / **V.V. Chislavlev**, S.V. Feiler, D.V. Boikov, D.T. Neunyvakhina // Refractories and Industrial Ceramics. – 2017. – Vol. 58. – No. 6. – P. 603-607.

5. Protopopov E. V. Physical modeling of the processes of metal melt movement during continuous casting / E.V. Protopopov, **V.V. Chislavlev**, S.V. Feiler // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 411. - P. 1-5 (012001). – Bibliography: p. 5 (3 titles). – Режим доступа: <http://library.sibsiu.ru>.

Труды периодических изданий и научно-практических конференций:

6. **Числавлев, В.В.** Моделирование процессов массопереноса при непрерывной разливке рельсовой стали / **В.В. Числавлев**, С.В. Фейлер // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество: труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции, 14-16 октября. – Новокузнецк: СибГИУ, 2014. – С. 213-219.

7. **Числавлев, В.В.** Исследование гидродинамических процессов при непрерывной разливке рельсовой стали / **В.В. Числавлев**, С.В. Фейлер // Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука инновации»: материалы инновационного конвента. – Кемерово; Новокузнецк: СибГИУ, 2014. – С. 381-384.

8. **Числавлев, В. В.** Совершенствование технологии рафинирования стали при непрерывной разливке в ЭСПЦ ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» / **В.В. Числавлев**; конс. С.В. Фейлер // Тезисы XIII Международной научно-технической конференции молодых специалистов. – Новокузнецк, 2015. – С. 31-32.

9. Протопопов, Е.В. Моделирование процессов гидродинамики в промежуточном ковше четырехручьевого МНЛЗ / Е. В. Протопопов, С.В. Фейлер, **В.В. Числавлев** // Литье. Металлургия. 2015: материалы XI Международной научно-практической конференции, 26-28 мая 2015 г. – Запорожье, 2015. – С. 377-379.

10. Протопопов, Е.В. Разработка математической модели гидродинамики металлического расплава в промежуточном ковше четырехручьевого машины непрерывного литья заготовок / Е.В. Протопопов, **В.В. Числавлев**, С.В. Фейлер, Д.Т. Неунывахина // Вестник горно-металлургической секции Российской

академии естественных наук. Отделение металлургии: сборник научных трудов. – Москва; Новокузнецк: СибГИУ, 2015. – Вып. 34. С. 24-29.

11. **Числавлев, В.В.** Физическое моделирование процессов гидродинамики в промежуточном ковше при непрерывной разливке рельсовой стали / **В.В. Числавлев**, С.В. Фейлер // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции. – Екатеринбург, 2015. С. 76-79.

12. **Числавлев, В.В.** Оптимизация процессов рафинирования рельсовой стали в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок / **В.В. Числавлев**, Д.Т. Неунывахина, С.В. Фейлер // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 13-15 мая 2015 г. – Новокузнецк: СибГИУ, 2015. – Вып. 19. – Ч. 2: Технические науки. – С. 109-112.

13. Фейлер, С.В. Лабораторно-экспериментальный комплекс для изучения процессов гидродинамики при непрерывной разливке стали / С.В. Фейлер, **В.В. Числавлев** // Современные вопросы теории и практики обучения в вузе : сборник научных трудов. – Новокузнецк : СибГИУ, 2015. – Вып. 18. - С. 62-72.

14. **Числавлев, В.В.** Методика разработки новых устройств и конструктивных элементов металлургических агрегатов / **В.В. Числавлев**, С.В. Фейлер, Д.Т. Неунывахина // Кузбасс: образование, наука, инновации : материалы инновационного конвента, 15.10.2015 г. – Кемерово, 2015. С. 364-367.

15. **Числавлев, В.В.** Моделирование процессов гидродинамики при непрерывной разливке стали / **В.В. Числавлев**, С.В. Глушков, С.В. Фейлер // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 1-3 июня 2016 г. – Новокузнецк: СибГИУ, 2016. – Вып. 20. – Ч. 3: Естественные и технические науки. – С. 175-178.

16. **Числавлев, В.В.** Исследование гидродинамических процессов в промежуточном ковше методами физического моделирования / **В.В. Числавлев**, С.В. Фейлер // Кузбасс: образование, наука, инновации: материалы инновационного конвента, 9 декабря 2016 г. – Кемерово, Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2016. – С. 483-485.

17. **Числавлев, В.В.** Моделирование гидродинамических процессов в промежуточном ковше с использованием полнопрофильных перегородок / **В.В. Числавлев**, С.В. Фейлер // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 16-18 мая 2017 г. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. – Вып. 21. – Ч. 2: Естественные и технические науки. С. 135-138.

18. Гидродинамические процессы в промежуточном ковше при непрерывной разливке рельсовой стали / **В.В. Числавлев**, С.В. Фейлер, Д.В. Бойков, Д.Т. Неунывахина // Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XVII Международной конференции. – Челябинск : ЮУрГУ, 2017. – Ч. 2. – С. 41-50.

19. **Числавлев, В.В.** Исследование процессов гидродинамики металлического расплава в промежуточном ковше машины непрерывного литья

заготовок / **В.В. Числавлев**, С.В. Фейлер // Перспективы развития металлургических технологий: сборник тезисов VIII конференции молодых специалистов, 1 марта 2017 г. – Москва, 2017. – С. 47-48.

20. Протопопов, Е. В. Физическое моделирование процессов движения металлического расплава при непрерывной разливке / Е. В. Протопопов, **В.В. Числавлев**, С.В. Фейлер // Металлургия: технологии, инновации, качество. Металлургия – 2017 : труды XX Международной научно-практической конференции, 15-16 ноября 2017 г. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2017. – Ч. 2. – С. 9-14.

21. Исследование ликвационных процессов при непрерывной разливке рельсовой стали / **В.В. Числавлев**, С.В. Фейлер, М.В. Темлянцев, Д.Т. Неунывахина // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. Вып. 41 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянцев (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2018. С. 80-85.

22. **Числавлев, В.В.** Анализ влияния гидродинамических процессов при непрерывной разливке стали на качество рельсовой металлопродукции / **В.В. Числавлев**, М.В. Темлянцев, С.В. Фейлер // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. Вып. 41 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянцев (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2018. С. 86-89.

Патенты:

23. Пат. 164038 Российская Федерация. МПК G 09В 25/02. Лабораторная установка для моделирования гидродинамики металлического расплава: / Фейлер С.В., Протопопов Е.В., **Числавлев В.В.**, Неунывахина Д.Т.; правообладатель Сиб.гос.индустр. ун-т. – № 2015142557; заявл. 06.10.15; опубл. 20.08.16, Бюл. № 23 - 1с.: 1ил..

24. Пат. 182841 Российская Федерация. МПК G 09В 25/02. Лабораторная установка для моделирования гидродинамики металлического расплава в сталеразливочном ковше: / Фейлер С.В., **Числавлев В.В.**, Протопопов Е.В., Неунывахина Д.Т., Сафонов С.О.; правообладатель Сиб.гос.индустр. ун-т. – № 2017140550; заявл. 21.11.17; опубл. 21.11.17, Бюл. № 25 - 1с.: 1ил..

Подписано в печать 2019 г. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага 80 г/м². Усл. печ. л. . Тираж экз. Заказ № .

654007, Новокузнецк, ул. Кирова, 42.

Издательский центр СибГИУ