Куклев Александр Валентинович. Разработка научных основ и внедрение прогрессивных технологических решений получения стабильно высокого качества слябов непрерывного литья стали ответственного назначения : Дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.02 : М., 2004 385 c. РГБ ОД, 71:05-5/362

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ имени И.П.БАРДИНА»

На правах рукописи

КУКЛЕВ АЛЕКСАНДР ВАЛЕНТИНОВИЧ

РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ И ВНЕДРЕНИЕ ПРОГРЕССИВНЫХ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОЛУЧЕНИЯ СТАБИЛЬНО ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА СЛЯБОВ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ СТАЛИ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

05.16.02 - Металлургия черных, цветных и редких металлов

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

доктора технических наук



Научный консультант -академик РАН Лякишев Н.П.

Москва - 2004

2 СОДЕРЖАНИЕ

Стр.
Введение 7

1. Основные направления совершенствования технологии
непрерывной разливки стали в условиях действующего
производства 12

1. Анализ типичных дефектов слябов при непрерывном литье ... 13
2. Совершенствование использования промежуточного ковша ... 16 1.3! Модернизация погружных стаканов 24
3. Использование теплоизолирующих и шлакообразующих смесей 29
4. Совершенствование конструкции кристаллизатора и механизма его качания 31
5. Использование обжатия сляба с не полностью затвердевшей осевой зоной 36
6. Оптимизация системы вторичного охлаждения сляба 44

1.8. Выводы и задачи исследований 48

2. Разработка технологии рафинирования стали от неметаллических

включений в промежуточном ковше и в кристаллизаторе УНРС 51

1. Особенности подготовки металла к разливке 52
2. Основные закономерности и уравнения состояния расплава *55*
3. Физическое моделирование гидродинамики промежуточного ковша и кристаллизатора 58
4. Экспериментальные исследования потоков расплава и перемещения шлаковых включений в промежуточном

ковше на гидравлическом стенде 64

1. Результаты экспериментального исследования **гидродинамических процессов в промежуточном ковше** емкостью 15 т на гидравлическом стенде 67
2. Результаты экспериментального исследования

**з**

гидродинамических процессов в промежуточном ковше
емкостью 50 т на гидравлическом стенде 80

2.5. Численное моделирование гидродинамики промежуточного

ковша 88

2.6. Рекомендации для промышленных испытаний 15 т и 50 т

промежуточного ковша УНРС 104

2.7. Физико-математическое моделирование гидродинамических

процессов в кристаллизаторе 109

2.7.1. Результаты экспериментального исследования потоков

расплава и перемещения примесных образований на

гидравлическом стенде 112

2.7.2. Численное моделирование гидродинамических и тепловых

процессов в кристаллизаторе 119

2.8. Рекомендации для промышленных испытаний погружных

стаканов 127

Выводы по главе 137

3. Промышленные испытания разработанной технологии
рафинирования металла в промежуточном ковше и
в кристаллизаторе УНРС 139

3.1. Промышленные испытания промежуточного ковша в

ЭСПЦ ОАО «Северсталь» 140

3.2. Промышленные испытания промежуточного ковша в

ККЦ ОАО «Северсталь» 143

3.3. Испытание промежуточного ковша с туннельными

вставками-вихрегасителями 155

3.4. Определение параметров конструкции промежуточных

ковшей с перегородками 156

1. Промышленные испытания опытных погружных стаканов 158
2. Разработка теплоизолирующей смеси для защиты

4

металла в промежуточном ковше 166

3.7. Разработка составов шлакообразующих смесей для

отливки слябов толщиной 150,175 и 200 мм 169

Выводы по главе 174

4. Совершенствование технологии начальной стадии
формирования сляба в кристаллизаторе 176

1. Теоретический анализ тепловой работы кристаллизатора 176
2. Оптимизация конструкции тонкостенного кристаллизатора

с щелевыми каналами 187

1. Влияние износостойкого покрытия внутренних стенок кристаллизатора на его тепловую работу 193
2. Анализ и оптимизация формирования оболочки слитка вслябовом кристаллизаторе 199

4.4.1 .Модель усадки стали с учётом теплообмена и

деформирования 200

4.4.2. Разработка оптимальной геометрии боковых стенок

слябового кристаллизатора 205

4.5. Разработка оптимальных режимов качания кристаллизатора ... 209
4.5.1.Критерии стабильности процесса вытягивания слитка

из кристаллизатора 210

1. Динамический анализ процесса качания кристаллизатора ... 215
2. Методика расчета оптимальных параметров

закона качания кристаллизатора 219

Выводы по главе 224

5. Разработка технологии повышения качества осевой зоны

сляба обжатием его в двухфазном состоянии 225

5.1. Теоретическая модель обжатия сляба с незатвердевшей

сердцевиной 225

5.2. Методика расчета температурного состояния непрерывного

**5**слитка 227

1. Методика расчета обжатия слитка в роликах тянущей клети ... 237
2. Математическая модель разрушения кристаллизующихся металлических сплавов 245
3. Разработка алгоритма определения давлений и перемещений

в парах роликов при «мягком обжатии» сляба 248

5.6. Расчет деформации непрерывнолитого сляба при заданном
давлении обжатия 255

5.7. Разработка модели влияния формирующейся макроструктуры
затвердевающего непрерывного слитка на образование
дефектов осевой зоны сляба 263

5.7.1. Анализ тепловых процессов и установление зависимости

размерных параметров дендритной структуры от режимов
непрерывной разливки стали 263

5.7.2. Расчет параметров осевой химической неоднородности

и осевой рыхлости сляба 265

Выводы по главе 268

б. Экспериментальное исследование технологии мягкого

обжатия промышленных слябов 269

1. Методика проведения промышленного эксперимента 269
2. Измерения геометрии слябов, разлитых при промышленных испытаниях системы 271
3. Исследование макроструктуры опытных слябов 272
4. Зависимости деформации обжатия слябов от скорости вытягивания 278
5. Зависимость перемещения валков от величины давления в

гидроцилиндрах тянущей клети 281

6.6. Зависимости перемещений валков от глубины жидкой фазы

в слитке 282

**6**

6.7. Исследование обжатия сляба с жидкой сердцевиной при

заданном значении датчиков перемещения 290

6.8. Статистический анализ факторов, оказывающих наибольшее

влияние на осевую рыхлость и осевую химическую
неоднородность 294

1. Осевая рыхлость 295
2. Осевая химическая неоднородность 299

6.9. Анализ эффективности влияния мягкого обжатия на параметры

макроструктуры непрерывнолитого сляба 303

Выводы по главе 308

7. Разработка рациональной технологии вторичного

охлаждения непрерывного сляба 310

7.1. Расчетно-экспериментальная методика определения
характеристик теплоотдачи сляба при водовоздушном
охлаждении **311**

7.2. Адаптация расчетно-экспериментальной методики к

условиям промышленной УНРС 316

7.3. Расчет охлаждения сляба и определение допустимых

скоростей разливки 320

7.4. Влияние термоциклирования на качество поверхности сляба ... 328
Выводы по главе 338

8. Техническая и экономическая эффективность внедрения

разработанных технологических решений 339

Основные результаты и выводы 342

**Список использованных источников 348**

Приложение **374**

7 ВВЕДЕНИЕ

Основным направлением развития черной металлургии в современных условиях является повышение качества продукции, снижение себестоимости продукции, энергопотребления и экологической нагрузки на окружающую среду. На решение этих проблем существенное влияние оказывает развитие технологии непрерывной разливки стали. Технические достижения в этой области позволили производить широкий сортамент сталей повышенного качества. Однако, требования к качеству стальной продукции со стороны потребителей, в первую очередь к стальному листу, в последние годы значительно возросли. Это связано с появлением промышленного оборудования нового поколения, надежно работающего в более жестких условиях.

Так, для реализации принятой программы освоения новых месторождений нефти и газа, строительства новых и реконструкции существующих газо- и нефтепроводов необходимы трубы диаметром 1620 мм для работы под давлением 120 бар в условиях низких температур северных районов России. При этом требуется свести риск аварийного разрыва трубы к минимуму, так как авария таких трубопроводов приводит к значительному экологическому и экономическому ущербу. Для производства труб требуется лист с повышенными требованиями к макроструктуре и качеству поверхности.

Аналогичные высокие требования предъявляются к качеству листа для судостроения. Строительство буровых платформ для освоения шельфа северных морей и крупнотоннажных морских судов, в том числе нефтеналивных, требует лист повышенной прочности, ударной вязкости и свариваемости с однородностью свойств в Z направлении, что должно обеспечить надежность их эксплуатации и снизить риск морских аварий и катастроф.

**8**

Другой вид продукции с повышенным требованием к качеству металла - холоднокатаный лист для автомобилестроения. Для создания конкурентоспособного легкового автомобиля необходимо снизить вес несущего кузова и его элементов, повысить его коррозионную стойкость и улучшить внешний вид.

В то же время приходится признать, что используемые в настоящее время на металлургических заводах России УНРС не позволяют достигнуть требуемых показателей по качеству и сортаменту металла. В последние десятилетия наблюдается отставание отечественных разработок в области создания УНРС от мирового уровня. Это привело к тому, что российские металлургические заводы стремятся получить импортные УНРС, в том числе не самые современные. Такое положение недопустимо, так как оно консервирует техническое отставание, как отечественной черной металлургии, так и отечественного тяжелого машиностроения. Вышеуказанными обстоятельствами обусловлена актуальность темы диссертационной работы.

В настоящей работе представлены эффективные пути преодоления такого отставания и результаты многолетних комплексных наукоемких технологических разработок по узловой модернизации существующих машин непрерывной разливки стали, позволяющие вывести производство непрерывнолитых слябов на мировой уровень.

Целью работы и ее основным содержанием являлось создание технологии непрерывной разливки трубной стали, стали для судостроения и автостроения с улучшенной макроструктурой и высоким качеством поверхности; разработка необходимых для реализации новой технологии математических моделей протекания процессов формирования непрерывно литой заготовки, анализ которых позволил выработать новые конструкции основных элементов УНРС и алгоритмы их функционирования, обеспечивающие стабильно высокое качество получаемых слябов.

**9**

Работа включает в себя теоретические, расчетные, лабораторные и промышленные исследования, на основе которых разработан комплекс технологических и технических решений, позволивших создать путем реконструкции существующих слябовых УНРС принципиально новую отечественную УНРС, обеспечивающую высокую производительность ответственных марок сталей при существенном улучшении качества как внутренней структуры, так и поверхности слябов.

На защиту выносятся следующие основные результаты, обладающие научной новизной:

1. Методика и результаты физического и математического моделирования движения жидкой стали в промежуточном ковше и в кристаллизаторе с учетом содержащихся в расплаве неметаллических включений и разработка на их основе новых конструкций промковша и погружных стаканов, обеспечивающих эффективное рафинирование стали.
2. Методика подбора оптимального состава шлакообразующих смесей для защиты металла в промежуточных ковшах и в кристаллизаторах, а также конкретные новые композиции промышленных смесей.

3. Математическая модель и методика расчета формирования оболочки
непрерывнолитого сляба в кристаллизаторе и разработка на их основе новой
конструкции тонкостенного кристаллизатора с щелевыми каналами
охлаждения, износостойким покрытием, переменной конусностью,
оснащенного рессорным механизмом качания, для которого установлены
оптимальные режимы качания, обеспечивающие стабильность процесса
литья и высокое качество поверхности заготовки.

4. Методика и результаты физического и математического
моделирования теплогидравлической работы системы вторичного
водовоздушного охлаждения непрерывнолитой заготовки и разработка новой
конструкции распыляющих форсунок, а также их оптимального
расположения вдоль поверхности слябовой заготовки.

**10**

5. Анализ влияния цикличности изменения температуры поверхности
заготовки в зоне вторичного охлаждения, а также состояния рабочей
поверхности стенок кристаллизатора на качество поверхности сляба и
разработка рациональных режимов мягкого водовоздушного охлаждения,
предотвращающего развитие поверхностных дефектов.

6. Математическая модель и методика расчета температурного и
деформированного состояния при обжатии заготовки с не полностью
затвердевшей сердцевиной, обеспечивающие прогнозирование качества
макроструктуры сляба.

7. Алгоритм осуществления мягкого обжатия сляба с помощью новой
тянуще-обжимной клети в зависимости от скорости разливки и марочного и
размерного сортамента слябов, гарантирующий устранение осевой рыхлости
и осевой химической неоднородности,

8. Результаты промышленного внедрения и освоения новой технологии
мягкого обжатия сляба и рекомендации по ее совершенствованию.

В работе предложены новые научно-обоснованные технологические решения, достоверность которых подтверждена использованием строгих физико-математических методов исследования и результатами лабораторных и промышленных экспериментов.

Работа выполнена в Центре непрерывной разливки стали ФГУП ЦНИИЧЕРМЕТ им. И.П.Бардина в соответствии с планами научно-технических и хоздоговорных работ с различными отечественными и зарубежными предприятиями и организациями. Результаты диссертационной работы докладывались на многих научно-технических конференциях и конгрессах сталеплавильщиков, опубликованы в научных журналах и трудах, наиболее важные результаты защищены патентами Российской Федерации.

Практическая ценность диссертационной работы состоит в создании на основе полученных научных результатов новой УНРС мирового уровня на ОАО «Северсталь», показавшей высокую производительность и высокое

**11**

качество отливаемых слябов. Разработанные технические и технологические решения обладают общностью и универсальностью и могут быть применимы для широкого класса УНРС как слябовых, так и блюмовых.

Содержание диссертационной работы представляет собой решение крупной научной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение для совершенствования технологии непрерывной разливки стали и конструкции УНРС, эффективного контроля и управления технологическим процессом литья, существенного повышения качества металлопродукции .

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

Осуществление поставленных в данной работе задач по созданию технологии непрерывной разливки сталей ответственного назначения, обеспечивающей стабильно высокое качество продукции и увеличение производительности УЫРС, оказалось возможным при радикальной модернизации действующей УНРС №1 ЭСПЦ ОАО «Северсталь» на основании научных и практических результатов, полученных в ходе проведения теоретических и экспериментальных исследований.

1. С помощью гидравлических моделей разработана методика и определены зависимости распределения скоростей потоков металла в промежуточных ковшах УНРС различной конструкции, закономерности всплывания модельных твердых и жидких включений и поведения покровного шлака в промежуточных ковшах УНРС, условий образования вихрей на свободной поверхности металла.
2. На основании физического и математического моделирования разработаны и внедрены новые конструкции полнопрофильных перегородок с отверстиями и туннельные вставки — вихрегасители, обеспечивающие наилучшие условия удаления неметаллических включений и подавления образования вихревых воронок и захвата ими покровного шлака промежуточного ковша.
3. Разработаны оптимальная форма 15 т промежуточного ковша для вертикальной УНРС и 50 т ковша для криволинейной УНРС , а также усовершенствованные составы огнеупора для торкретирования футеровки промежуточного ковша и теплоизолирующей шлаковой смеси.
4. **Проведены** промышленные **испытания** разработанной технологии **в** кислородно-конверторном цехе ОАО «Северсталь» при производстве стали для автолиста и в электросталеплавильном цехе ОАО «Северсталь» при производстве стали для толстого листа.

343

1. Применение полнопрофильных перегородок при производстве стали для толстого листа в ЭСПЦ позволили на 20 % снизить зачистку слябов по дефекту «неметаллические включения», в 1,5 раза уменьшить отсортировку толстого листа по дефекту «раскатанное загрязнение» и в 2,5 раза отсортировку при ультразвуковом контроле.
2. Применение полнопрофильных перегородок при производстве стали для холоднокатаного листа в ККЦ позволили увеличить процент слябов с показателем макроструктуры «точечная неоднородность» не более 1,0 балла и в 3 раза снизить отсортировку холоднокатаного листа марок 08Ю, 08пс и др. по дефектам металлургического происхождения (неметаллические включения и плена).
3. Применение туннельных вставок совместно с полнопрофильными перегородками позволило на 21 % (по сравнению с промежуточным ковшом с только одними полнопрофильными перегородками) снизить зачистку слябов и на 32,5 % отсортировку холоднокатаного листа по металлургическим дефектам (с 0,33 до 0,22 *%).*
4. Физическим моделированием на гидравлическом стенде установлены базовые параметры конструкции погружных стаканов, которые были затем оптимизированы с помощью численного моделирования гидродинамики жидкой стали при истечении из отверстий стаканов в кристаллизатор, а также проведено численное моделирование влияния скоростей и траекторий течения расплава на распределение тепловых потоков на поверхности кристаллизатора.
5. Наилучшие результаты показывают разливочные стаканы с овальными боковыми отверстиями высотой 90 мм и шириной 60 мм при ломанной или сглаженной верхней кромкой (до -15° на выходе) и наклонной **вверх** до +10° **нижней кромкой** и с донышком, имеющим форму обратного конуса с углом при вершине 5..Л00, при заглублении не менее 200 мм.

344

1. Разработаны новые конструкции погружных стаканов и состав шлакообразующей смеси для разливки сталей ответственного назначения при повышенных скоростях вытягивания сляба.
2. Испытания опытных погружных стаканов в ЭСПЦ показали общее снижение зачистки поверхности слябов с 18,3% до 11,9% по неметаллическим включениям и паукообразным трещинам, также снизилась отсортировка толстого листа по дефектам поверхности и возросла стойкость стаканов. Опытные стаканы оказали слабое влияние на изменение макроструктуры слябов. Несколько снизились показатели осевой рыхлости.
3. Испытания опытных погружных стаканов в ККЦ выявили общую тенденцию формирования широкой и менее плотной зоны точечной неоднородности и увеличение максимальной глубины залегания дефектов, что создает предпосылки к уменьшению вероятности выкатывания дефекта на поверхность холоднокатаного листа.
4. На основе физико-математического моделирования разработаны основные элементы новой технологии и конструкции тонкостенного кристаллизатора с щелевыми каналами охлаждения и новым рессорным механизмом качания с гидравлическим приводом.
5. Установлено, что тепловая работа кристаллизатора с щелевыми каналами и однократным использованием воды значительно эффективнее кристаллизатора со сверлеными каналами с петлевой схемой охлаждения тем, что при этом обеспечивается более интенсивное охлаждение и более равномерный теплоотвод от слитка к стенке кристаллизатора.
6. Проведена оптимизация геометрических параметров щелевых каналов ***ь* стенках кристаллизатора, а также толщины** и **материала плит.** Рекомендована толщина 55 мм, материал - холоднокатаная медь с серебром.

345

1. Исследовано влияние никелевого покрытия внутренних стенок кристаллизатора на его тепловую работу. Установлено, что величина теплового потока, отводимого от слитка уменьшается на 15% , а температура меди на уровне мениска снижается на 42 С.
2. Разработана модель взаимодействия формирующейся оболочки сляба со стенкой кристаллизатора с учетом тепловых, механических и кристаллизационных процессов, позволившая рассчитать реальную усадку слитка и изменение зазора между оболочкой и стенкой.
3. Выполнена оптимизация геометрии узких стенок кристаллизатора в виде нелинейной конусности, позволившая увеличить их стойкость и улучшить качество поверхности сляба. Разработан алгоритм подстройки узких стенок при изменении ширины сечения сляба **и** марки стали.
4. Разработана динамическая модель кристаллизатора с рессорным механизмом качания **и** гидравлическим приводом, учитывающая влияние шлакообразующей смеси, которая позволила установить оптимальные соотношения частоты и амплитуды качания кристаллизатора в зависимости от скорости разливки и марки стали, обеспечивающие стабильность процесса непрерывной разливки и высокое качество поверхности сляба.
5. Практика эксплуатации новых разработок кристаллизатора и механизма качания на УНРС № 1 ЭСПЦ ОАО «Северсталь» показала, что стойкость кристаллизатора возросла в 1,5 раза; расход чистовой меди сократился в 5 раз; объем ремонтов уменьшился в 2 раза при сохранении высокого качества металла.
6. Разработаны математические модели **и** осуществлены расчеты **затвердевания и одновременного деформирования сляба с не** полностью закристаллизовавшейся осевой зоной **и** возможного при этом образования внутренних трещин, осевой ликвации и пористости.

346

22. Результаты теоретического анализа использованы для разработки
конструкции головного образца тянуще-обжимной клети вертикальной
УНРС ЭСПЦ ОАО «Северсталь» и внедрения впервые в
отечественной металлургии технологии «мягкого обжатия» слябов.

1. Разработан алгоритм мягкого обжатия в двух модификациях: А) управление обжатием сляба, путем задания необходимого давления в гидроцилиндрах прижимных роликов; Б) управление обжатием сляба, путем задания необходимого перемещения прижимных роликов. Алгоритм описывает как стационарный режим работы УНРС, так и динамические режимы разливки.
2. Установлены оптимальные значения усилий на ролики в режиме управления давлением и оптимальные значения обжатий каждой

парой роликов в режиме управления перемещением, а также установлены предельные значения скорости вытягивания сляба и его обжатия в зависимости от толщины сечения и марки стали.

25. Внедрение разработанной технологии мягкого обжатия сляба
позволило улучшить макроструктуру осевой зоны сляба, снизить
такие дефекты, как осевая рыхлость, осевая химическая
неоднородность в среднем на 0,5 балла при одновременном
увеличении рабочей скорости разливки с 0,55 м/мин до 0,72 м/мин.

26. В момент входа жидкой фазы в валки происходит скачок показаний
датчиков перемещения (при задании постоянного давления), или
скачок давления (при задании постоянного перемещения валков), т.е.
показания контрольных приборов системы обжатия могут служить
дополнительным средством контроля положения жидкой фазы.

1. Использование технологии «мягкого обжатия» сляба позволило значительно расширить марочный сортамент низколегированных сталей ответственного назначения и обеспечить производство толстого листа с контролируемыми свойствами в Z - направлении.
2. На основе экспериментальных исследований теплогидравлических

347

характеристик водовоздушных форсунок охлаждения на специально созданном лабораторном стенде и математического моделирования разработана, изготовлена и внедрена новая система вторичного охлаждения УНРС водо-воздушным туманом.

1. Разработана методика расчетно-экспериментального определения истинных величин коэффициента теплоотдачи орошаемой поверхности сляба и определения оптимального расположения двухрядных форсунок вдоль зоны вторичного охлаждения.
2. Разработаны и испытаны новые широкодиапазонные водовоздушные форсунки, обеспечивающие мягкий режим охлаждения, оригинальные конструкции смесительных узлов водовоздушных коллекторов.
3. Проанализированы причины возникновения поверхностных трещин в слябе, разработана методика расчета влияния на их развитие термоциклирования и определены режимы водовоздушного мягкого охлаждения, исключающие развитие поверхностных трещин.
4. Определены рациональные режимы водовоздушного вторичного охлаждения УНРС №1 ЭСПЦ ОАО «Северсталь» и допускаемые

скорости разливки, гарантирующие высокое качество макроструктуры и поверхности слябов для всего марочного и размерного сортамента цеха.