

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
ГУ «Институт прикладной математики и механики»

На правах рукописи



Иванова Анна Александровна

**ПРОГНОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ МЕТАЛЛОВ**

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Донецк – 2018

Работа выполнена в Государственном учреждении «Институт прикладной математики и механики», г. Донецк

Научный консультант: **Бирюков Алексей Борисович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Недопекин Федор Викторович**
доктор технических наук, профессор,
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донецкий национальный университет», г. Донецк, профессор кафедры «Физики неравновесных процессов, метрологии и экологии»

Лукин Сергей Владимирович
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Череповецкий государственный университет», г. Череповец, заведующий кафедрой «Теплоэнергетики и теплотехники»

Бабанин Анатолий Яковлевич
доктор технических наук,
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка, доцент кафедры «Технической эксплуатации и сервиса автомобилей, технологических машин и оборудования»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород

Защита состоится 19 декабря 2018 в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 01.016.03 при ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» по адресу: 283001, г. Донецк, пр. Театральный, 13, ауд. 264.

Тел. факс: +38(062)302-06-00, e-mail: d0101603-donnu@ya.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке организации по адресу: 283001, г. Донецк-01, ул. Университетская, 24, <http://science.donnu.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.016.03
доктор технических наук, профессор



Толстых Виктор Константинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Непрерывная разливка является одним из самых прогрессивных способов производства заготовок из металлов и сплавов. Разработка новых и совершенствование существующих технологий в непрерывной разливке остро востребовано во всех странах-производителях металлургической продукции. В производственной цепочке машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) находится между сталеплавильным агрегатом и прокатным станом, от эффективности её работы зависит производительность всей технологической линии, а также качество и себестоимость конечной продукции. Совершенствование технологии непрерывной разливки, основанное на изучении механизмов и закономерностей процессов тепло- и массопереноса, необходимо для повышения качества производимой продукции, увеличения производительности и безаварийной работы металлургического оборудования, что в свою очередь влияет на ресурсосбережение и безопасность.

В Советском Союзе, и позже в постсоветских странах, изучением тепловых процессов, происходящих при непрерывной разливке, занимались такие известные учёные как Г.П. Иванцов, А.И. Вейник, И.П. Бардин, В.С. Рутес, М.Я. Бровман, В.Ю. Авдонин, Б.Т. Борисов, В.А. Ефимов, В.А. Емельянов, Ю.А. Самойлович, Д.П. Евтеев, Е.М. Китаев, Р.Т. Сладкошteeв, В.М. Нисковских, Л.С. Рудой, В.Г. Лисиенко, В.И. Дожди́ков, А.И. Цаплин, В.И. Тимошпольский, А.Н. Шичков, Н.В. Телин, В.М. Паршин, Б.Я. Любов, Н.И. Шестаков, А.Д. Акименко, М.С. Бойченко, А.В. Третьяков, Б.И. Краснов, В.А. Карлик, А.А. Целиков, З.К. Кабаков, А.И. Манохин, Л.Н. Сорокин, П.Н. Вабищевич, Ф.В. Недопекин, В.В. Белоусов, Д.А. Дюдкин, А.Н. Смирнов, В.И. Лебедев, А.Л. Кузьминов и др. Среди зарубежных исследователей в этой области наиболее известными являются З. Юнханс, М. Флемингс, Б. Дж. Томас, Дж. Сенгупта, Дж. Бентсман, М. Рауденски, К. Бернхард, Ю. Баст, Б. Шарлер, М. Беллет, М. Раппаз, И.В. Самарасекера, Д.М. Стефанеску, В. Волчинский и другие. Исследованиям динамики кристаллизационных процессов с плоским фронтом и двухфазной зоной на различных этапах затвердевания посвящены работы В.А. Журавлева, Д.В. Александрова, В. Курца, В.В. Мансурова, Дж.Д. Ханта и других.

Несмотря на множество реализованных исследований тепловых процессов с фазовыми превращениями, происходящих при непрерывной разливке, достаточно большое количество задач в этой области всё ещё остаются открытыми, а вместе с развитием технологии возникают новые. К таковым относятся теоретические, компьютерные и экспериментальные исследования механизмов и закономерностей тепло- и массопереноса в задачах определения тепловых взаимосвязей между металлургическим оборудованием и непрерывным слитком в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения (ЗВО), а также способы оптимизации параметров тепловых технологических процессов кристаллизации непрерывных слитков в МНЛЗ при динамических режимах. Одной из наиболее сложных и важных задач улучшения качества продукции

технологического процесса непрерывной разливки является повышение структурной однородности получаемой заготовки.

В настоящее время наиболее эффективным научным инструментом для решения инженерных задач является метод компьютерного моделирования, который основывается на математических методах и позволяет заменить дорогостоящие натурные эксперименты, проводимые при разработке и проектировании новых МНЛЗ, а также во время пуско-наладочных работ. Использование прогнозных моделей позволяет в режиме производственного функционирования МНЛЗ подбирать наиболее рациональные в текущий момент времени управляющие параметры технологического процесса непрерывной разливки. Прогнозное моделирование подразумевает, что компьютерный прогноз должен рассчитываться в несколько раз быстрее режима реального времени с тем, чтобы оставалось достаточно времени на отработку принятого решения, а, следовательно, сложность расчёта по модели должна учитывать вычислительную мощность компьютерной техники.

Цель работы – развитие теории и методов моделирования механизмов и закономерностей процессов теплопереноса для оперативного наблюдения и оценки тепловых процессов кристаллизации слитков и разработки научных основ совершенствования технологии непрерывной разливки.

Объект исследования: тепловые процессы в технологиях непрерывной разливки металлов и сплавов.

Предмет исследования: математические и компьютерные модели температурных полей непрерывного слитка и стенок кристаллизатора МНЛЗ.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- анализ существующих методов моделирования температурного поля непрерывного слитка;
- разработка новых методов моделирования температурного поля с определением положения в нём двухфазной зоны;
- разработка прогнозной модели для определения рациональных параметров охлаждения кристаллизатора;
- исследование поведения границ фазового перехода в кристаллизующемся металле в зависимости от динамики процесса разливки;
- разработка методики оптимального размещения форсунок в ЗВО;
- определение числовых характеристик теплового поля, которые могут служить критериями качества непрерывного слитка;
- определение оптимальных для повышения качества продукции режимов расхода воды в ЗВО при переходных процессах;
- исследование влияния тепловых режимов на формирующуюся кристаллическую структуру непрерывного слитка.

Методы исследования. Работа выполнена на основе теоретических, натурных и лабораторных исследований. Методами математического и компьютерного моделирования были исследованы тепловые процессы охлаждения, происходящие в непрерывном слитке, во время его движения в

области кристаллизатора и в зоне вторичного охлаждения (ЗВО), а также тепловые процессы в рабочей стенке кристаллизатора. Экспериментальные данные были получены на действующих промышленных МНЛЗ и использованы для настройки разработанных компьютерных моделей в соответствии с условиями реального производства, а также для проверки разработанных теории и методов определения рациональных параметров работы металлургического оборудования. В лабораторных условиях исследовались характеристики форсунок ЗВО для выработки методов их рационального размещения и соответствующего функционирования в динамике процесса непрерывной разливки. Соответствие результатов прогнозного моделирования и полученных в реальных производственных условиях структур слитков в зависимости от параметров протекания теплового процесса проверялось в лабораторных условиях, где были специально подготовлены темплеты для исследования получаемых структур непрерывнолитых заготовок.

Научная новизна работы.

1. Впервые разработана математическая модель температурного поля непрерывнолитой заготовки с определением положения границ двухфазной зоны по условиям Стефана, сформулированным отдельно для ликвидуса и солидуса, которая позволяет рассчитывать геометрию двухфазной области, а также скорости продвижения изотерм и границ фазового перехода и градиенты температур вблизи фазового перехода.
2. Впервые предложена методика расчёта положения границы раздела фаз, заданного условием Стефана, и температуры в узлах вблизи фазового перехода по специальному равномерному шаблону, который позволяет устанавливать для расчёта положения границы тот же шаг по времени, что и для основной явной конечно-разностной схемы расчёта поля температур.
3. Выполнено системное сопоставление моделей температурного поля с расчётом границ фазового перехода по условиям Стефана, по квазиравновесной модели, по методу введения функции состава гетерогенной смеси, а также по разработанному новому методу нахождения положения двухфазной зоны внутри непрерывного слитка. Проведённый анализ позволяет выбрать наиболее подходящий с точки зрения конкретной задачи метод учёта тепловыделения при кристаллизации для определения текущей конфигурации области непрерывного слитка, содержащей одновременно жидкую и твёрдую фазы металла.
4. Получили развитие методы диагностики теплового состояния кристаллизатора и части слитка, находящейся в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ, основанные на прогнозной модели, включающей решение дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности с условиями Стефана и граничными условиями третьего рода, в которых введена специальная величина коэффициента теплопередачи от наружной поверхности корки к охлаждающей воде, определяемая в режиме реального времени из плотности теплового потока, итогового коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе, коэффициента теплоотдачи от корочки заготовки к внутренней поверхности кристаллизатора и эффективной толщины газового зазора в зависимости от

текущих значений перепада температуры охлаждающей воды и её расхода и геометрических параметров гильзы кристаллизатора.

5. Впервые определены средние температуры поверхности на участках влияния секций ЗВО как числовые характеристики температурного поля, обоснована рациональность их использования с точки зрения чувствительности к изменениям управляющих параметров процесса разлива и на их базе разработана методика оценки температурного состояния слитка, как на этапе проектирования, так и в процессе функционирования системы автоматического управления МНЛЗ.

6. Впервые предложена методика определения оптимального с точки зрения минимизации температурных градиентов размещения форсунок вдоль технологической линии вторичного охлаждения, заключающаяся в нахождении оптимального распределения температуры вдоль поверхности слитка и определении соответствующего распределения коэффициента теплоотдачи по ширине слывовой МНЛЗ путем решения обратной задачи теплопроводности с учетом фазовых превращений в слитке с помощью разработанной математической модели.

7. Усовершенствована методика определения оптимальных расходов воды в ЗВО путём замены алгоритмов разомкнутого управления и/или регулирования прогнозными расчётами, дающая возможность максимально строгого соблюдения температурного режима непрерывного слитка при управлении вторичным охлаждением в переходных процессах разлива, а также имитационного моделирования на этапе проектирования конструкции и системы автоматического управления МНЛЗ.

8. Разработана новая методика, основанная на математическом моделировании температурного поля и анализе качественного поведения кривых скорости продвижения изотермы ликвидус и температурных градиентов на границе фазового перехода, позволяющая определять режимы функционирования МНЛЗ для формирования необходимой структуры непрерывнолитой заготовки.

Практическое значение полученных результатов.

1. Разработан способ вычисления положения неизвестной границы фазового перехода в задаче Стефана, позволяющий производить расчёты быстрее, чем в режиме реального времени, что делает возможным использование соответствующей математической модели в системе автоматического управления производственным процессом непрерывной разлива.

2. Разработана математическая модель расчёта положения двухфазной зоны с использованием условий Стефана позволяющая непосредственно во время производственного процесса наблюдать температурное поле непрерывного слитка в любых точках и положение двухфазной зоны в любом сечении.

3. Проведено системное сопоставление различных моделей температурного поля с наличием фазового перехода, которое позволяет выбирать структуру математической модели, наиболее соответствующую требованиям конкретной практической задачи, в частности быстродействие для прогнозных моделей,

вычисление производных при расчётах скоростей и температурных градиентов или имитационное моделирование, замещающее натурные эксперименты.

4. Разработанная прогнозная модель, основанная на данных системы диагностики о текущих значениях плотности теплового потока, коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе, коэффициента теплоотдачи от корочки заготовки к внутренней поверхности кристаллизатора и эффективной толщины газового зазора в зависимости от текущих значений перепада температуры охлаждающей воды и её расхода и геометрических параметров гильзы кристаллизатора, позволяет в режиме реального времени определять тепловое состояние слитка в кристаллизаторе и стенок кристаллизатора.

5. Проведённые исследования поведения формы двухфазной зоны и глубины жидкой лунки в зависимости от динамики процесса разливки позволяют вырабатывать рекомендации по подбору конструктивных и технологических параметров при разработке новых, а также модернизации существующих МНЛЗ, с целью повышения производительности при наиболее строгом соблюдении требований к температурному режиму разливки.

6. Разработанная математическая модель положения двухфазной зоны внутри слитка может функционировать параллельно с реальным процессом разливки и позволяет рассчитывать толщину формирующейся оболочки слитка и длину жидкой фазы вдоль технологической оси, а также скорости продвижения изотерм и границ фазового перехода и градиенты температур вблизи фазового перехода и на основе этих данных принимать оперативные решения по изменению технологических параметров.

7. На основе предложенной методики расчета оптимальных параметров форсуночного охлаждения могут быть автоматически подобраны такие конструктивные параметры форсуночного охлаждения в ЗВО, которые будут соответствовать наименьшим термическим напряжениям, а, следовательно, обеспечивать наилучшее возможное качество металла, производимого машиной непрерывного литья заготовок.

8. Определены пригодные для использования при управлении процессом разливки характеристики температурного поля непрерывного слитка наиболее чувствительные к изменениям управляющих параметров (расходов охлаждающей воды) и соответствующие технологическим требованиям обеспечения качественной продукции.

9. На основе предложенной компьютерной прогнозной модели температурного поля непрерывного слитка разработана методика, позволяющая определять оптимальные режимы расхода воды в ЗВО при переходных процессах в разливке.

10. Разработанная прогнозная математическая модель теплового поля и температурных градиентов, позволяет определять режимы функционирования МНЛЗ для получения необходимой структуры непрерывнолитой заготовки.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований прошли проверку в промышленно-лабораторных условиях ЗАО «КОРАД» (Москва), лабораторных условиях Института металлургии и материаловедения Польской

академии наук, в промышленных условиях концерна производств «Польская медь» и на Енакиевском металлургическом заводе, внедрены или рекомендованы к внедрению на производстве ЗАО "КОРАД", в сталелитейном производстве Енакиевского металлургического завода, а также могут быть использованы организациями, занимающимися проектированием и производством МНЛЗ, автоматизацией и разработкой режимов функционирования МНЛЗ.

Документы, подтверждающие внедрение результатов работы:

1. Акт об использовании на производстве результатов научно-исследовательской работы «Методика расчета оптимальных параметров форсуночного охлаждения непрерывнолитого сляба» ЗАО "КОРАД", Москва, РФ, 2012.
2. Акт об использовании на производстве результатов научно-исследовательской работы «Математическое моделирование температурного поля и формы жидкой лунки непрерывнолитой сортовой заготовки», Филиал №2 Енакиевский металлургический завод ЗАО «ВТС», Енакиево, 2018.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель температурного поля непрерывнолитой заготовки с определением положения границ двухфазной зоны по условиям Стефана, сформулированным отдельно для ликвидуса и солидуса;
- методика расчёта положения границы фазового перехода, заданного условием Стефана, и температуры в узлах вблизи границы раздела фаз по специальному равномерному шаблону, который позволяет устанавливать для расчёта положения свободной границы тот же шаг по времени, что и для основной явной конечно-разностной схемы расчёта поля температур;
- прогнозная модель для диагностики теплового состояния кристаллизаторов МНЛЗ и определения положения границы фазового перехода в слитке внутри кристаллизатора;
- критерии качества температурного поля непрерывного слитка;
- методика определения оптимального (для получения наилучшего качества производимого металла) размещения форсунок вдоль технологической линии вторичного охлаждения;
- методика определения оптимальных расходов воды в ЗВО для прогнозного управления тепловым состоянием непрерывного слитка при переходных режимах разливки;
- методика прогноза формирования кристаллической структуры непрерывнолитой заготовки в зависимости от динамики теплового процесса разливки.

Личный вклад соискателя. Диссертантом лично разработаны методика и алгоритмы расчёта положения границы раздела фаз, заданного условием Стефана, и температуры в узлах вблизи фазового перехода, позволяющие устанавливать для расчёта положения границы тот же шаг по времени, что и для основной явной конечно-разностной схемы расчёта поля температур. Разработана математическая модель температурного поля непрерывнолитой заготовки с определением положения границ двухфазной зоны по условиям

Стефана, сформулированным отдельно для ликвидуса и солидуса, которая позволяет рассчитывать геометрию двухфазной области, а также скорости продвижения изотерм и границ фазового перехода и градиенты температур вблизи фазового перехода. Исследована чувствительность глубины жидкой лунки и формы двухфазной зоны к изменениям технологических, конструктивных и теплофизических параметров процесса непрерывной разливки, позволяющая вырабатывать стратегию усовершенствования технологии разливки, направленную на повышение производительности и качества непрерывнолитой заготовки. Разработаны критерии качества температурного поля непрерывнолитой заготовки. Самостоятельно разработаны алгоритмы и создано программное обеспечение для расчётов по представленным в диссертационной работе математическим моделям.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 5-й научно-практической конференции с международным участием «Математическое и имитационное моделирование систем МОДС'2010» (Киев, 2010); 13-й, 14-й и 15-й международной научно-технической конференциях «Моделирование, идентификация, синтез систем управления» (Москва – Донецк, 2010, 2011 и 2012); 18th Conference On Applied And Industrial Mathematics CAIM 2010 (Iasi, Romania, 2010); Международной научной конференции «Современные проблемы математики и её приложения в естественных науках и информационных технологиях» (ХАРЬКОВ, 2011); Международной научной конференции «Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта ISDMCI '2011», (Евпатория, 2011); Научно-технической конференции «Инновационные технологии внепечной металлургии чугуна и стали» посвященной 140-летию ДМЗ (Донецк, 2011); XIII International Scientific Conference "New Technologies and Achievements in Metallurgy and Material Engineering" (Częstochowa, Polska, 2012); 20th Conference on applied and industrial mathematics CAIM 2012, (Chisinau, Republic of Moldova, 2012); 22nd International conference on metallurgy and materials (Brno, Czech Republic, 2013); 15th IFAC symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Minerals and Metals Processing (MMM2013), (San Diego, California, 2013); V Международной научно-технической конференции "Металлургические процессы и оборудование" (Донецк, 2013); Международной научной конференции «Современная информатика: проблемы, достижения, и перспективы развития», посвященная 90-летию академика В.М. Глушкова. (Киев, 2013); 54th International Scientific Conference "Solidification and Crystallization of Metals 2013" (Kielce-Cedzyna, Poland, 2013); ICIPE2014 8th International Conference on Inverse Problems in Engineering, (Krakow, Poland, 2014); 8th European Continuous Casting Conference (Graz, Austria, 2014); METEC & 2nd ESTAD 2015 European Steel Technology and Application Days (Dusseldorf, Germany, 2015); Международной научно-практической конференции "Математика в производственных процессах", (Санкт-Петербург, Россия, 2015); XIX и XX Международных научно-практических конференциях «Металлургия: технологии, инновации, качество» (Новокузнецк, Россия, 2015 и 2017); XVI International

Scientific Conference „Quality Assurance In Foundry “ (Arlamów, Poland, 2016); XV Минском международном форуме по тепломассообмену (Минск, 2016); 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy ICCGE-18 (Nagoya, Japan, 2016); 57 th International Scientific Conference "Solidification and Crystallization of Metals 2016" (Kielce - Cedzyna, Poland, 2016); XVII Międzynarodowa Konferencja Naukowa "Zapewnienie jakości w odlewnictwie i spawalnictwie" (Grand Hotel Permon, Słowacja, 2017), XVII международной научной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали» (Старый Оскол, РФ, 2017), International Scientific Conference on "Achievements in Mechanical and Materials Engineering" AMME`2017 (Gliwice - Wisła, Poland, 2017), XI International Conference on Computational Heat, Mass and Momentum Transfer ICCHMT`2018 (Cracow, Poland, 2018), VII Krajowa Konferencja “Nowe Materiały – Nowe Technologie w Przemysle Okrętowym”, Akademia Morska, Szczecin, Poland, 11-14 June, 2018.

Публикации. Основные материалы диссертации изложены в 48 работах (из них 22 написано без соавторов, 1 монография, 16 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых изданий, рекомендованный ВАК для публикации материалов диссертации на соискание ученой степени доктора наук, 16 тезисов докладов на научных конференциях).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка используемых источников и приложений, представлена на 327 страницах основного текста и содержит 131 рисунок, 7 таблиц, 348 библиографических источников, и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 «ОБЗОР МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕПРЕРЫВНОМ СЛИТКЕ И КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ» приведен аналитический обзор публикаций посвящённых исследованиям проблем повышения качества непрерывнолитых заготовок, как в чёрной, так и цветной металлургии, связанных с соблюдением тепловых режимов. Поскольку наилучшим инструментом для наблюдения поля температур непрерывного слитка и стенок кристаллизатора является математическое моделирование, к настоящему времени разработано большое количество математических моделей тепловых процессов с наличием фазовых превращений. Однако практически отсутствуют исследования по системному сопоставлению особенностей моделирования процесса затвердевания металла при помощи различных подходов. В связи с этим при решении конкретной практической задачи возникает проблема выбора структуры модели, в частности с соблюдением требований к прогнозным моделям. При этом остаётся актуальной задача разработки новых способов моделирования поля температур с наличием фазового перехода, снимающих проблемы ограничения величины расчётного шага по времени и неустойчивости при численном дифференцировании.

При использовании математических моделей для определения температурных полей слитка в кристаллизаторе и стенок кристаллизатора остро стоит вопрос о соответствии задаваемых граничных условий теплообмена реальным условиям протекания процесса. Кроме того, открытой является проблема восстановления граничных условий теплообмена для моделирования теплового состояния заготовки в режиме реального времени.

Поскольку в ряде случаев совершенствование технологии связано с увеличением производительности при соблюдении высокого качества выпускаемой продукции, требуются исследования реакции глубины и формы жидкой лунки на изменения различных параметров тепловых процессов с фазовыми переходами внутри непрерывного слитка. Также, при разработке прогнозной модели нужно определить чувствительность формы жидкой лунки к параметрам математической модели, которые в силу ограниченности информации могут быть заданы неточно.

При проектировании и эксплуатации зоны вторичного охлаждения (ЗВО) слитка, возникает задача организации форсуночного охлаждения. Для её решения необходимо идентифицировать коэффициент теплоотдачи как параметр граничных условий, зависящий от выбора типа форсунок и способа их размещения в ЗВО. Для того чтобы по разработанному ранее критерию оптимальности распределения температуры поверхности слитка под форсунками в ЗВО решать задачу оптимизации форсуночного охлаждения, необходима прогнозная модель, которая позволит проводить такую оптимизацию не только на этапе конструирования, но и на МНЛЗ, имеющих регулировку позиционирования форсунок, во время процесса разлива.

Отдельной проблемой является динамическое регулирование расходов воды в ЗВО. Для выбора рационального распределения интенсивности охлаждения в ЗВО в переходных режимах необходима прогнозная математическая модель, включение которой в контур управления позволит соблюдать необходимый температурный режим поверхности слитка.

Одной из наиболее сложных и важных задач при производстве непрерывнолитой заготовки является повышение её качества при определённой кристаллической структуре. Для выработки соответствующих режимов разлива необходима прогнозная математическая модель, позволяющая определять динамику изотермы ликвидус внутри заготовки, а также вычислять температурные градиенты вблизи границ фазового перехода.

В результате выполнения аналитического обзора сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

В главе 2 «СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ГРАНИЦЫ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В НЕПРЕРЫВНОМ СЛИТКЕ» проанализированы математические модели температурного поля непрерывного слитка с различными способами расчёта положения области фазового перехода.

В 3D-модели нестационарного теплопереноса внутри слитка распределение температуры описывается уравнением:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + v(\tau) \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{c(T)\rho(T)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \right\}, \quad (1)$$

где $v(\tau)$ – скорость вытягивания слитка, м/с; $T = T(\tau, x, y, z)$ – температура в жидкой и твёрдой фазах, К; c – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; λ – теплопроводность разливаемого металла, Вт/(м·К).

На основе анализа способов моделирования кристаллизации непрерывного слитка было установлено, что динамика жидкого металла не имеет сколь угодно заметного влияния на параметры процесса разливки, изучению которых посвящена данная диссертационная работа, в частности на глубину жидкой лунки и температуры поверхности слитка. Поэтому было принято решение не включать в модель уравнения динамики жидкого металла и диффузии компонент сплава, поскольку расчёты по моделям с такими уравнениями требуют больших вычислительных мощностей, а для прогнозных моделей крайне важна скорость вычислений.

Граничные условия:

1. Температура внутри струи поступающего расплава:

$$T|_{z=0} = T_p, \quad 0 \leq x \leq p, \quad 0 \leq y \leq p, \quad (2)$$

где T_p – температура поступающего расплава, p – полуширина струи.

2. Считается, что поле температур симметрично относительно основных осевых сечений слитка, для прямоугольного и квадратного сечений оно моделируется в одной четверти координатной плоскости поперечного сечения (рис.1), тепловой поток на осях которой равен нулю:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = 0. \quad (3)$$

3. Если разливка производится под шлаком, то тепловой поток от верхней границы металла в кристаллизаторе считается равным нулю, в противном случае учитываются потери тепла от зеркала металла только за счёт излучения, поскольку конвекция при таких условиях играет незначительную роль:

$$-\lambda(T) \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = C_n \left[\left(\frac{T_{\text{ос.зр}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T|_{z=0}}{100} \right)^4 \right], \quad (4)$$

где C_n – приведённый коэффициент излучения, $T_{\text{ос.зр}}$ – абсолютная температура окружающей среды над зеркалом расплава, $T|_{z=0}$ – абсолютная температура излучающего жидкого расплава.

4. Теплообмен на поверхности слитка формулируется в виде граничных условий третьего рода с учётом наличия между слитком и стенкой

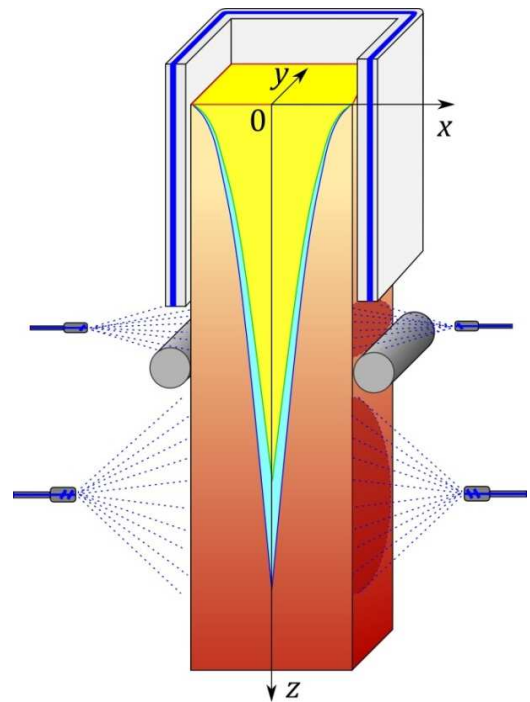


Рисунок 1. Схема моделируемой области.

кристаллизатора зазора, заполненного шлаковым гарниссажем с воздушными включениями (например, для прямоугольного сечения по широкой грани):

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=a-\delta_1} = \frac{\lambda_3}{\delta_1} (T|_{x=a} - T|_{x=a-\delta_1}) + \sigma_n \left[\left(\frac{T|_{x=a}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T|_{x=a-\delta_1}}{100} \right)^4 \right], \quad (5)$$

$$0 < y \leq b - \delta_2, \quad 0 < z \leq Z,$$

где a, b – характерные размеры кристаллизатора (зависят от высоты $a(z), b(z)$); δ_1 – эффективная толщина зазора по широкой грани, $\delta_1 = \delta_1(y, z)$; δ_2 – эффективная толщина зазора по узкой грани, $\delta_2 = \delta_2(x, z)$; λ_3 – коэффициент теплопроводности смеси в зазоре, Вт/(м·К); $T|_{x=a-\delta_1}, T|_{x=a}$ – температура поверхностей слитка и кристаллизатора по широкой грани, К; σ_n – приведённый коэффициент излучения, (Вт/(м² · К⁴)). Аналогично задаются условия по узкой (второй в случае квадратного сечения) грани.

5. В зоне вторичного охлаждения (ЗВО) теплоотдача на поверхности слитка формулируется в виде граничных условий третьего рода:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} = \alpha(\vec{t}, \vec{k}, \vec{G}, \vec{P}) \cdot [T_{o.c.} - T(\tau, l, y, z)] + \sigma_n (T_{o.c.}^4 - T^4(\tau, l, y, z)), \quad (6)$$

где α – коэффициент конвективной теплоотдачи, $\vec{t}$ – вектор, определяющий типы форсунок, $\vec{k}$ – координаты форсунок, $\vec{G}$ – расходы охлаждающей воды, $\vec{P}$ – давление воздуха, $T_{o.c.}$ – температура окружающей среды, l – полутолщина слитка, σ_n – приведённый коэффициент излучения.

6. При $z = z_s$ тепловой поток считается равным нулю:

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_s} = 0. \quad (7)$$

Условия на границе раздела фаз (классическая задача Стефана):

– условие равенства температур

$$T(\tau, x, y, z)|_{\xi_-} = T(\tau, x, y, z)|_{\xi_+} = T_{kr}, \quad (8)$$

– уравнение, описывающее движение неизвестной границы между жидкой и твердой фазами металла (условие Стефана):

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_{\xi_+} - \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_{\xi_-} = \mu \rho (T_{kr}) \left(\frac{\partial \xi}{\partial \tau} + v \cdot \frac{\partial \xi}{\partial z} \right), \quad (9)$$

где ξ – граница раздела фаз является поверхностью, движущейся во времени, в случае рассмотрения четверти сечения разбивается на две части (рис.2), μ – скрытая теплота кристаллизации, (Дж/кг); T_{kr} – температура кристаллизации (средняя из интервала ликвидус – солидус), $\vec{n}$ – нормаль к поверхности раздела фаз (рис.2).

Задаётся начальное положение границы раздела фаз ξ :

$$\xi|_{\tau=0} = \xi_0 \quad (10)$$

и «граничное» условие на уровне мениска:

$$\xi(\tau, x, z)|_{z=0} = \xi(x), \quad \xi(\tau, y, z)|_{z=0} = \xi(y). \quad (11)$$

Заданы **начальные условия** для всего поля температур:

$$T(0, x, y, z) = T_0(x, y, z). \quad (12)$$

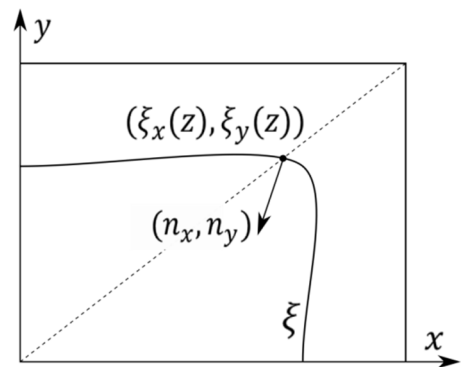


Рисунок 2 Положение свободной границы в поперечном сечении.

Для численного решения поставленной задачи применяется явная конечно-разностная схема с равномерным шаблоном. При этом возникают особенности вблизи свободной границы связанные с дополнительными и достаточно сильными ограничениями величины расчётного шага по времени. Предложена новая методика расчёта положения границы раздела фаз и температуры в узлах основной сетки вблизи фазового перехода по специальному равномерному шаблону, которая позволяет оставаться на том же уровне ограничения шага по времени, что и для основной явной схемы.

Квазиравновесная модель включает в основное уравнение теплопроводности выделение\поглощение тепла в двухфазной зоне (ДФЗ). Математически это формулируется следующим образом: в уравнении (1) вместо удельной теплоёмкости используется эффективная теплоёмкость

$$c_{ef}(T) = c(T) - \mu \cdot \frac{df_s}{dT}, \quad (13)$$

где f_s – доля твёрдой фазы при температуре выше ликвидуса равна нулю, ниже солидуса – равна единице, а в интервале $[T_S, T_L]$ может определяться линейной $f_s = (T_L - T)/(T_L - T_S)$, параболической или другой зависимостью от температуры.

При расчётах по этой модели происходят резкие скачки результатов вычисляемых температур в расчётном узле сетки в моменты его перехода границ двухфазной и однофазной зон, что соответственно сказывается на определении границ ДФЗ (рис.3). Многочисленные разработанные методы сглаживания теплофизических параметров на границах ДФЗ позволяют лишь незначительно исправить ситуацию. Как следствие затруднено вычисление градиентов и других величин, связанных с численным дифференцированием.

Кроме того, чем меньше интервал между температурой солидуса и ликвидуса, тем сильнее необходимо измельчать сетку, что приводит к большим объёмам вычислений и неприемлемо для прогнозных моделей, и соответственно данная модель не подходит для расчёта кристаллизации чистых металлов.

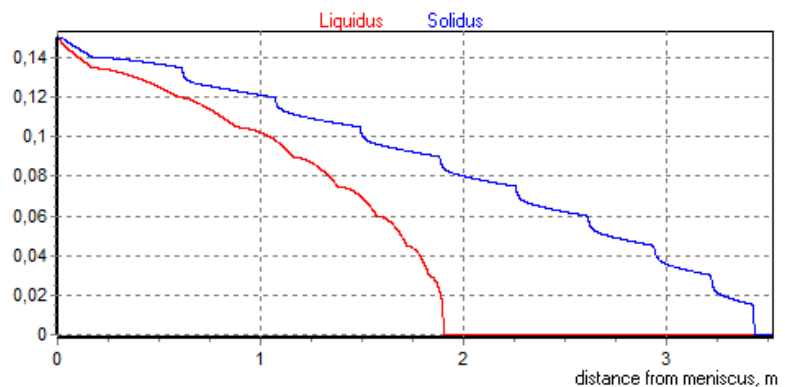


Рисунок 3. Результаты вычисления границ ДФЗ по квазиравновесной модели на разностной сетке с крупным шагом.

Модель с определением положения ДФЗ методом задания функции состава гетерогенной смеси была предложена А. И. Бородиным в 2011 году. Температура T^* двухфазной смеси считается постоянной. В жидкой и твёрдой

фазах температурное поле пересчитывается по классическому уравнению теплопроводности (1) с граничным условием второго рода – известным тепловым потоком в точке A (рис.4) со стороны жидкой фазы и в точке B – со стороны твёрдой фазы. На участке (A, A') пересчитывается состав гетерогенной смеси из уравнения

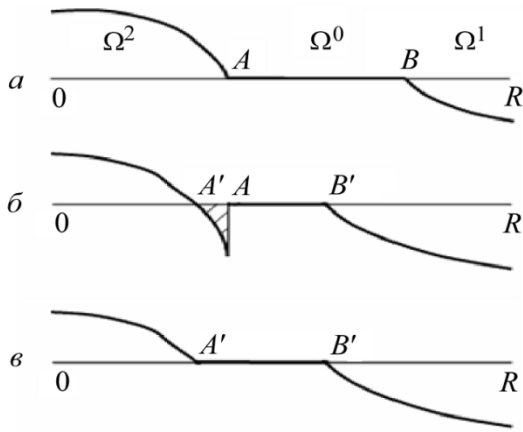


Рисунок 4. Схема расчёта одного шага по времени по модели с функцией состава гетерогенной смеси

$$\int_{A'}^A \rho_2 c_2 [T(r, \tau + \Delta\tau) - T^*] dr = -\mu \eta \int_{A'}^A \rho(\eta) dr, \quad (14)$$

где η – массовая доли твёрдой фазы в (A', A) ; $\rho(\eta)$ – плотность двухфазной смеси в (A', A) . Доля твёрдой фазы η_1 в (A', Ξ') определяется из численного аналога уравнения

$$\int_{A'}^{B'} \rho(\eta_1) dr = \int_{A'}^A \rho(\eta) dr + \int_A^{B'} \rho(\eta_0) dr, \quad (15)$$

где η_0, η_1 – массовая доля твёрдой фазы в предыдущий и рассчитываемый моменты времени соответственно. Ξ' определяется из значения теплового потока в Ξ со стороны твёрдой фазы и уравнения

$$-q(B, \tau) \Delta\tau = -\mu(1 - \eta_0) \int_B^{B'} \rho(\eta_0) dr. \quad (16)$$

Если предположить, что внутри ДФЗ температура распределена линейно, то система уравнений из условий Стефана для границ ДФЗ и для внутренних точек возможной кристаллизации приводится к системе двух уравнений (остаются два условия Стефана для границ ДФЗ). Из этого предположения следует, что кристаллизация происходит в два этапа: на первом фронте кристаллизуется некоторая часть расплава, на втором оставшаяся (рис.5). Тогда часть скрытой теплоты кристаллизации выделится на первом фронте, и оставшаяся часть – на втором. На границах ДФЗ выполняется условие равенства температур

$$\begin{aligned} T(\tau, x, y, z)|_{l_-} &= T(\tau, x, y, z)|_{l_+} = T_l, \\ T(\tau, x, y, z)|_{s_-} &= T(\tau, x, y, z)|_{s_+} = T_s, \end{aligned} \quad (17)$$

где l – граница между жидкой фазой и ДФЗ, l_+ – со стороны жидкой фазы (выше температуры ликвидуса), l_- – со стороны ДФЗ (ниже температуры

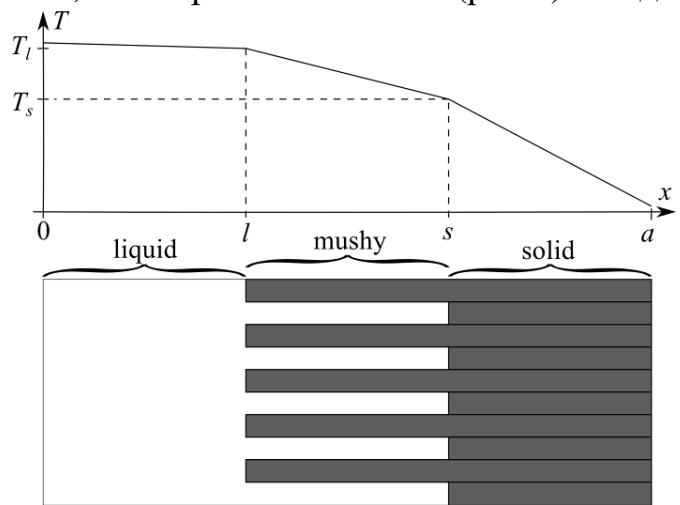


Рисунок 5. Три возможных состояния вещества и соответствующая им температура.

ликвидуса); аналогично s – граница между твёрдой фазой и ДФЗ, s_- – со стороны твёрдой фазы (ниже температуры солидуса), s_+ – со стороны ДФЗ (выше температуры солидуса).

Положение ликвидуса тогда можно описать условием Стефана:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{l_+} - \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{l_-} = \mu_l \rho_l \left(\frac{\partial l}{\partial \tau} + v(\tau) \cdot \frac{\partial l}{\partial z} \right), \quad (18)$$

где μ_l – часть скрытой теплоты кристаллизации, выделяющаяся на фронте ликвидуса, $\mu_l = \mu - \mu_s$, μ_s – часть скрытой теплоты кристаллизации, выделяющаяся на фронте солидуса; ρ_l – плотность при температуре ликвидуса.

Аналогично задаётся условие изменения положения солидуса. Задаются начальные положения ликвидуса и солидуса.

Сравнительные графики результатов расчёта по перечисленным моделям для одинаковых исходных данных представлены на рис. 6, 7.

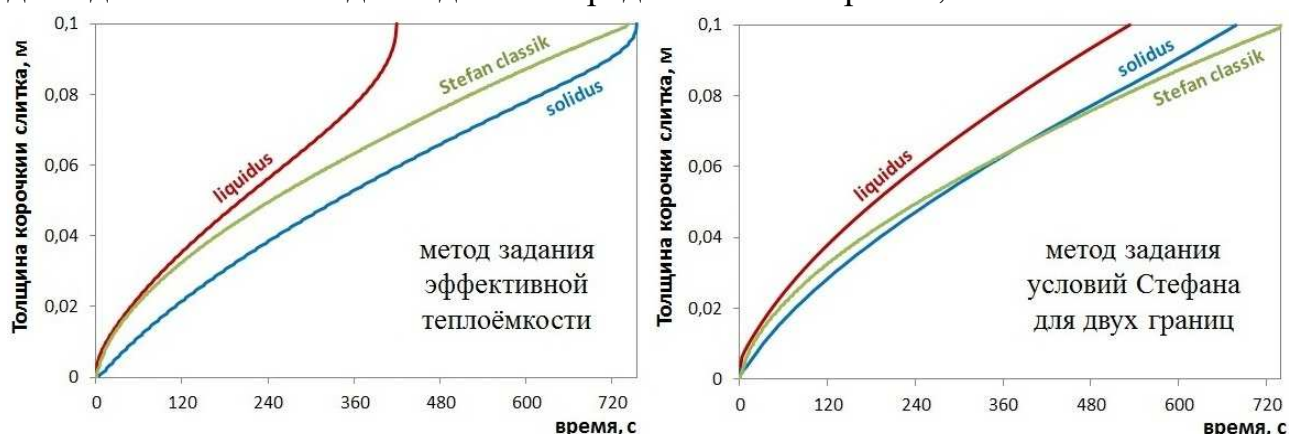


Рисунок 6. Сравнение результатов расчёта по классической модели Стефана, по методу задания эффективной теплоёмкости и по модели с заданием условий Стефана для границ ДФЗ.

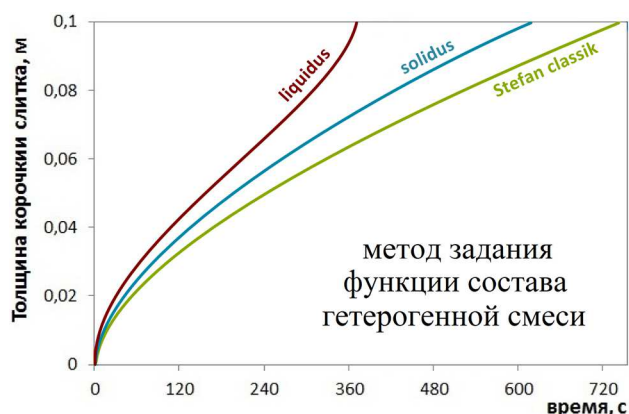


Рисунок 7. Сравнение результатов расчёта по классической модели Стефана и по методу задания функции состава гетерогенной смеси.

Расчётные границы ДФЗ при задании функции состава гетерогенной смеси в своём продвижении существенно опережают границу, полученную из классического условия Стефана. В значительно меньшей степени этот дефект наблюдается в методе с условиями Стефана для двух границ ДФЗ, поскольку предположение о постоянстве температуры ДФЗ в методе задания функции состава гетерогенной смеси является более грубым, чем предположение о

линейном характере распределения температуры внутри ДФЗ в модели с условиями Стефана для двух границ ДФЗ.

Преимущества и недостатки рассмотренных способов моделирования положения ДФЗ, а также рекомендации по применению этих способов для решения различных задач приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты сравнительного анализа моделей ДФЗ.

Название	Преимущества	Недостатки	Рекомендации
Классическая задача Стефана	даёт гладкое решение на сетке с крупным шагом, большая скорость расчётов, точные результаты при расчётах кристаллизации чистых металлов	чем больший диапазон ликвидус-солидус имеет сплав, тем ниже точность определения положения границы фазового перехода	подходит для прогнозных моделей, для исследований, допускающих приблизительное определение положения границы фазового перехода
Модель квазиравновесной ДФЗ	простота вычислений, большое количество исследований с подтверждением адекватности результатов	резкие скачки вычисляемых температур при переходах границ через расчётные узлы, невозможность вычисления величин, связанных с производными	для исследований в режиме офлайн на сетках с мелким шагом; сложно применима для прогнозных моделей; непригодна для расчётов при узком диапазоне ликвидус-солидус
Метод задания функции состава гетерогенной смеси	не требуется сглаживания теплофизических параметров на границах зоны фазового перехода	большая погрешность, связанная с предположением о постоянстве температуры ДФЗ	подходит для расчётов при узком диапазоне ликвидус-солидус
Метод задания двух условий Стефана для границ ДФЗ	гладкое решение соответствующего конечно-разностного аналога поставленной задачи на разностной сетке с любым шагом по пространству	погрешность вычислений связанная с предположением о линейном распределении температуры в ДФЗ	пригоден для прогноз-ной модели, рассчитывающей тепловое состояние на горизонте прогнозирования со скоростью в несколько раз превышающей режим реального времени

В главе 3 «ПРОГНОЗНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОХЛАЖДЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА» представлена трехмерная математическая модель нестационарного температурного поля непрерывнолитой заготовки и стенок кристаллизатора. Модель учитывает зависимости теплофизических параметров от температуры, наличие зазора между поверхностью слитка и стенкой кристаллизатора, характер водяного охлаждения кристаллизатора.

Уравнение теплопроводности для стенки кристаллизатора:

$$\frac{\partial T(\tau, x, z)}{\partial \tau} = \frac{1}{c_m(T)\rho_m(T)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_m(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_m(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \right\}, z_0 < z < Z, a < x < a + a_m,$$

где a_m – толщина стенки кристаллизатора вдоль широкой грани. Аналогично задаются условия для стенки кристаллизатора вдоль узкой грани. Положение ДФЗ рассчитывается по методу задания двух условий Стефана для границ ДФЗ.

Граничные условия для стенки кристаллизатора:

$$\begin{aligned} \lambda_m(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=a+a_m} &= \alpha_B (T_B - T|_{x=a+a_m}), z_0 < z < Z, \\ \lambda_m(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=Z} &= \alpha_2 (T_{\text{окр.ср.2}} - T|_{z=Z}), a < x < a + a_m, \\ -\lambda_m(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_0} &= \alpha_3 (T_{\text{окр.ср.3}} - T|_{z=z_0}), a < x < a + a_m, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_m(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=a} &= \frac{\lambda_{\Gamma 3}}{\delta_1} (T|_{x=a-\delta_1} - T|_{x=a}) + \sigma_n \left[\left(\frac{T|_{x=a-\delta_1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T|_{x=a}}{100} \right)^4 \right], 0 < z \leq Z, \\ -\lambda_m(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=a} &= \alpha_4 (T_{\text{окр.ср.1}} - T|_{x=a}) + C_n \left[\left(\frac{T_{\text{окр.ср.1}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T|_{x=a}}{100} \right)^4 \right], z_0 < z < 0 \end{aligned}$$

где α_B – коэффициент теплоотдачи от стенки кристаллизатора к охлаждающей воде, Вт/(м²·К); T_B – температура охлаждающей воды, $\alpha_{2,3,4}$ – коэффициенты теплоотдачи от стенки корпуса кристаллизатора в окружающую среду, $T_{\text{окр.ср.2,3,4}}$ – температура окружающей среды. $z \in (0, Z)$ соответствует участку поверхности стенки кристаллизатора обращенной к слитку ниже уровня мениска, $z \in (z_0, 0)$ – участку выше уровня мениска.

Температура охлаждающей воды в канале кристаллизатора описывается следующим балансовым уравнением:

$$c_B S_B v_B \frac{\partial T_B(\tau, z)}{\partial z} = P_c \alpha_1 (T_B(\tau, z) - T|_{x=d}) - P_{\text{вн}} \alpha_{\text{вн}} (T_B(\tau, z) - T_{\text{вн}}),$$

где c_B – объёмная теплоёмкость воды, Дж/(К·м³); S_B – сечение для прохода воды, м²; v_B – скорость воды, м/с; P_c – периметр стенки кристаллизатора, м; $P_{\text{вн}}$ – периметр внешней стенки, м; $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициент теплоотдачи от воды к внешней стенке, Вт/(м²·К); $T_{\text{вн}}$ – температура внешней стенки.

Известна температура охлаждающей воды на входе в канал кристаллизатора:

$$T_B(0, Z) = T_{\text{вв}}(\tau)$$

и её начальное распределение внутри канала:

$$T_B(0, z) = T_{\text{в0}}(z).$$

Поставленная задача решается методом конечных разностей. Результаты расчётов визуализируются на экране оператора в виде цветowych диаграмм и графиков (рис. 8 и 9) в режиме реального времени.

В условиях недостаточной информации о коэффициентах теплоотдачи и величине

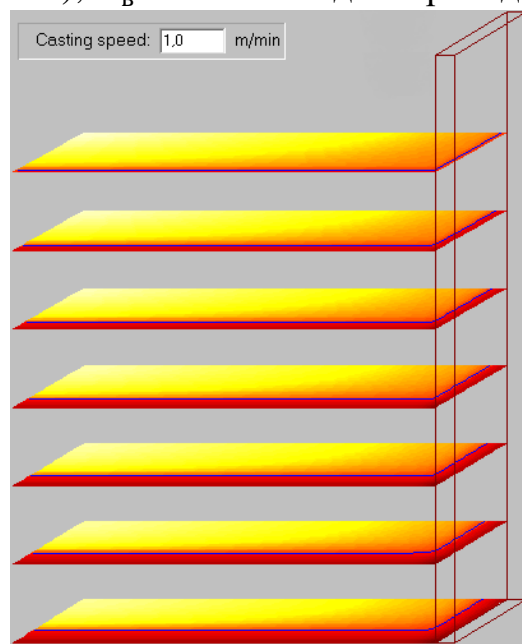


Рисунок 8. Температурное поле в поперечных сечениях слэбовой заготовки.

зазора между слитком и стенкой кристаллизатора для моделирования теплового состояния сортовой заготовки используется система диагностики теплотехнических процессов. Было предложено ввести понятие коэффициента теплопередачи от наружной поверхности корки к охлаждающей воде:

$$\bar{k}_{\text{пов}} = 1 / \left(\frac{1}{k_{\text{ср}}} + \frac{\delta_{\text{ср}}}{\lambda_k} \right) \quad (19)$$

где $k_{\text{ср}}$ – среднее значение коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе, Вт/(м²·К); $\delta_{\text{ср}}$ – средняя толщина корки металла в кристаллизаторе, м; λ_k – коэффициент теплопроводности корки заготовки при ее средней температуре, Вт/(м·К). $k_{\text{ср}}$ определяется по сигналам датчиков системы диагностики (текущих значений перепада температуры охлаждающей воды в кристаллизаторе и её расхода.), по специально разработанным зависимостям.

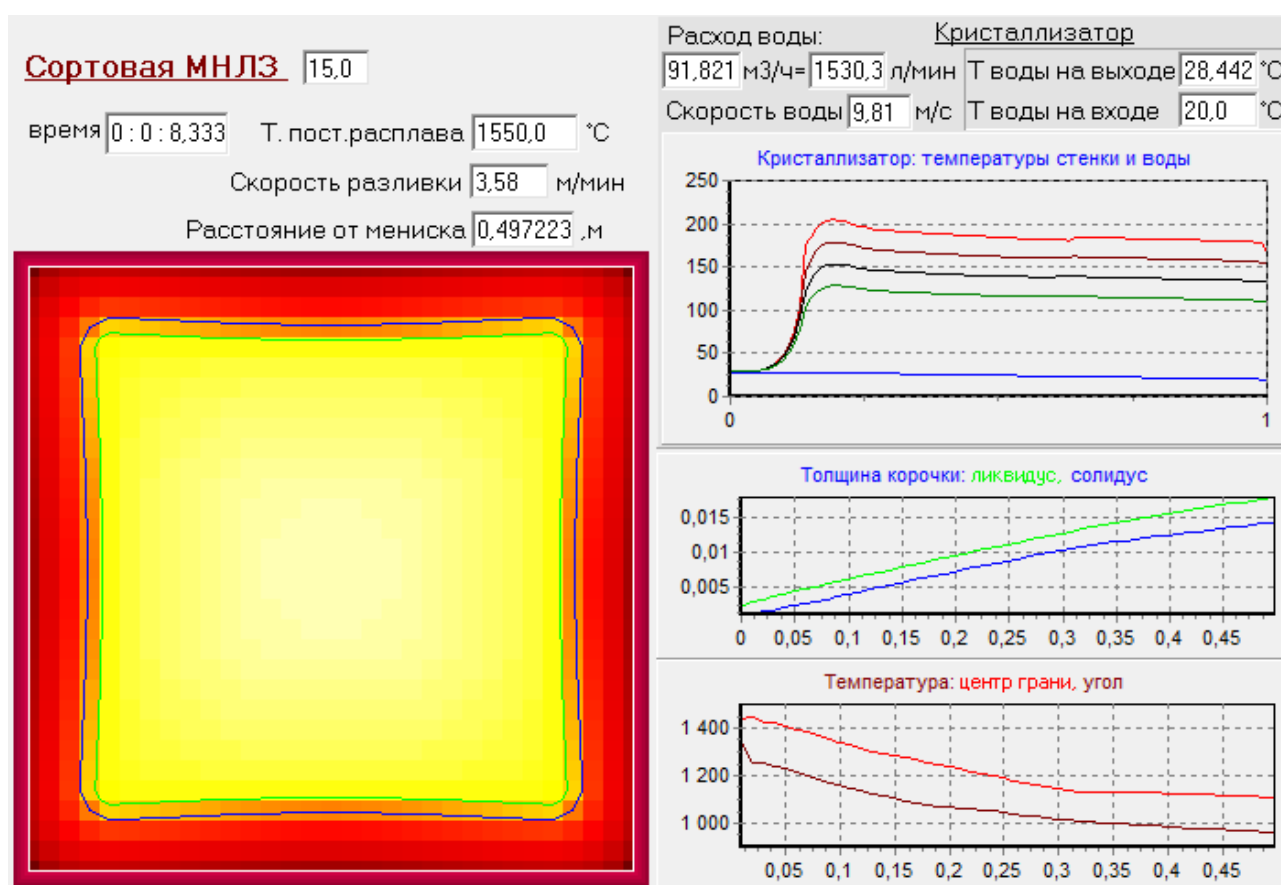


Рисунок 9. Визуализация расчётов температурного поля заготовки и стенок кристаллизатора сортовой МНЛЗ ЕМЗ

Результаты моделирования (рис. 10-12) хорошо согласуются с данными, полученными в производственных условиях. Модель позволяет в режиме реального времени определять тепловое состояние слитка в кристаллизаторе и стенок кристаллизатора.

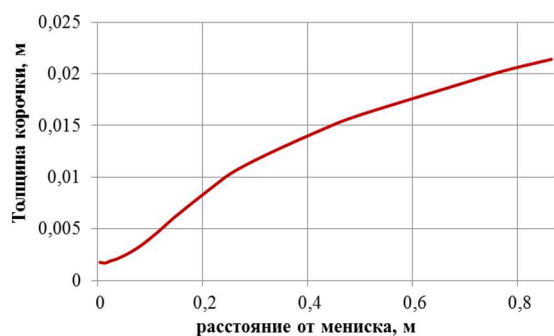


Рисунок 10. Толщина корочки слитка по высоте кристаллизатора

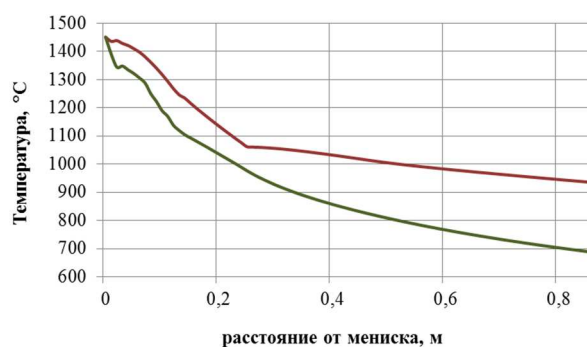


Рисунок 11. Температура поверхности слитка по центру грани и углу

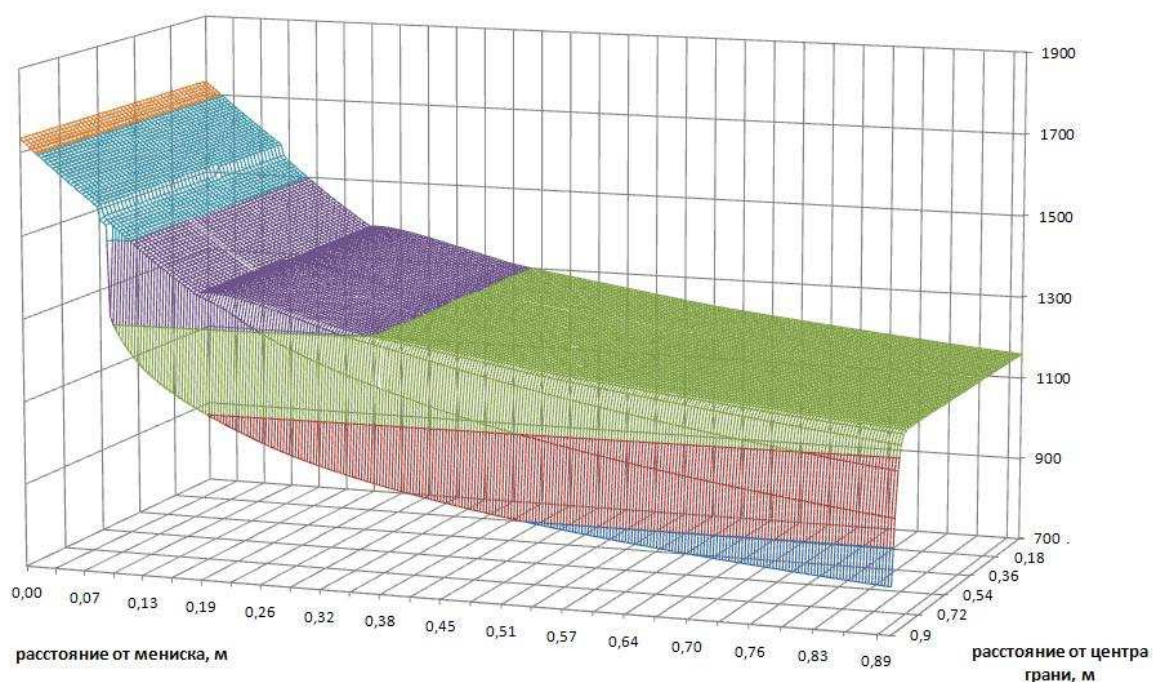


Рисунок 12. Температура широкой грани слитка в кристаллизаторе (от угла до центра грани)

В главе 4 «ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ ЖИДКОЙ ЛУНКИ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ» выполнено исследование влияния различных параметров процесса непрерывной разливки на глубину и форму жидкой лунки внутри слитка. Информацию о степени влияния одних параметров изучаемой системы на другие дают функции чувствительности, данные, для нахождения которых были получены с помощью математического моделирования. Было выполнено исследование для слябовой заготовки толщиной 200 мм и сортовой заготовки (квадрат 150 мм) с определением границы фазового перехода по классическому условию Стефана (8), (9). Результаты представлены на рисунках 13 – 15.

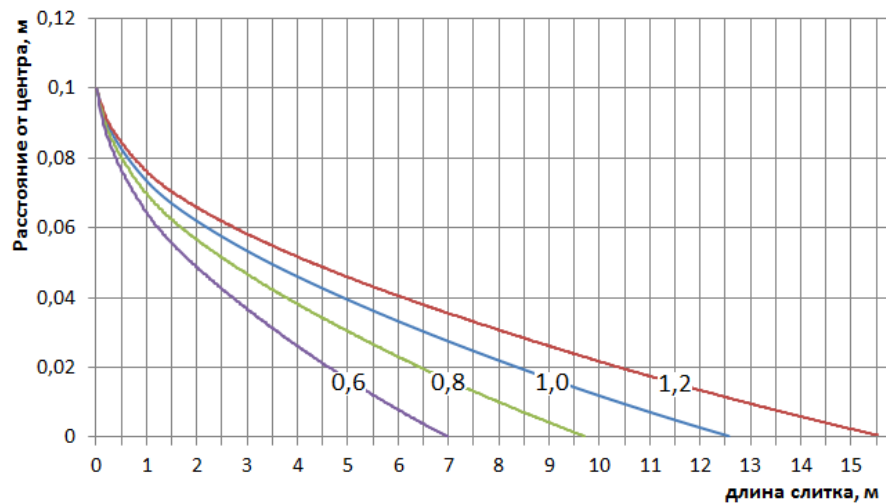


Рисунок 13. Положение границы фазового перехода при различных скоростях вытягивания слитка (от 0,6 до 1,2 м/мин)

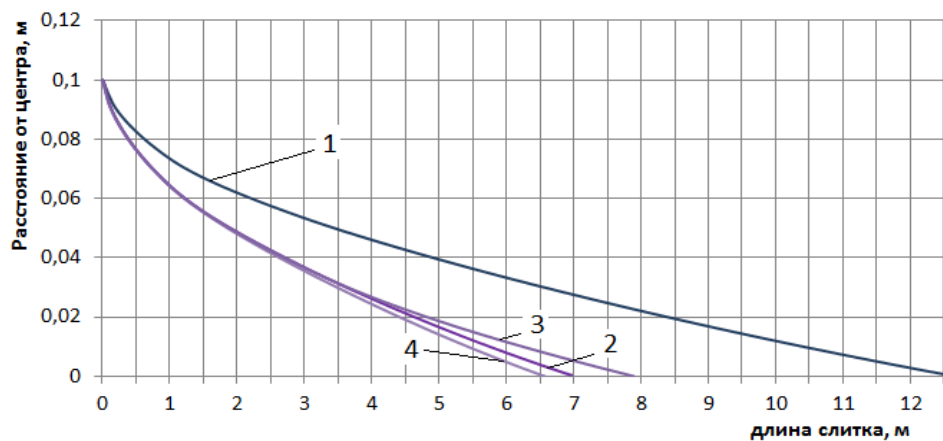


Рисунок 14. Глубина жидкой лунки в зависимости от скорости вытягивания слитка и изменений расхода охлаждающей воды. 1 – скорость вытягивания слитка 1 м/мин и 2 – 0,6 м/мин при базовом режиме охлаждения; 3 и 4 – скорость вытягивания слитка 0,6 м/мин при минимальном и максимальном расходе воды во всех секциях ЗВО соответственно

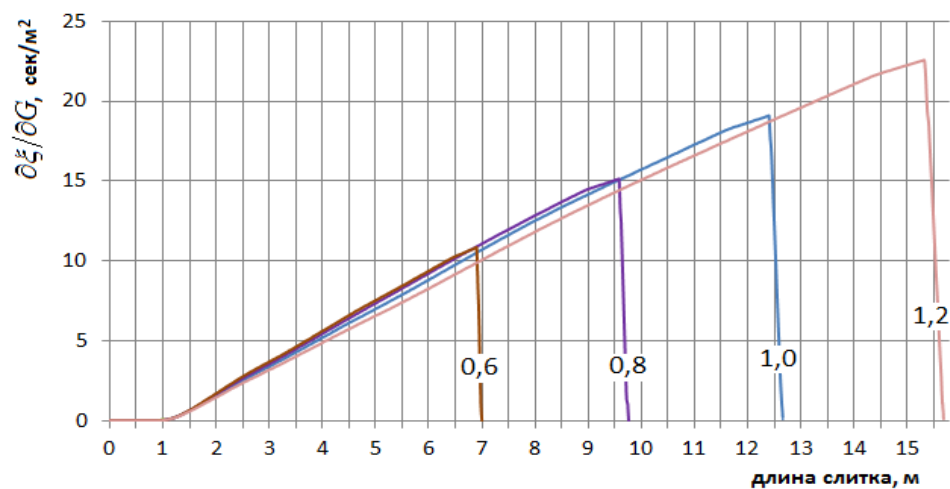


Рисунок 15. Чувствительность формы жидкой лунки к изменениям расхода воды в ЗВО при скоростях разлива (от 0,6 до 1,2 м/мин)

Поскольку для сортовой заготовки 150мм разливаемой на Енакиевском металлургическом заводе была поставлена задача определения положения ДФЗ, была разработана модель, в которой границы фазового перехода определялись из условий Стефана для ДФЗ (17), (18). Результаты моделирования представлены на рис. 16 - 18.

При больших скоростях разливки отмечается бóльшая чувствительность глубины ДФЗ к изменениям режима вторичного охлаждения. Исследования влияние точности задания теплофизических характеристик на результаты моделирования (рис. 18) показали, что ошибка в коэффициенте теплопроводности $\pm 10\%$ соотв. $\pm 9\%$ ошибке определения глубины ДФЗ.

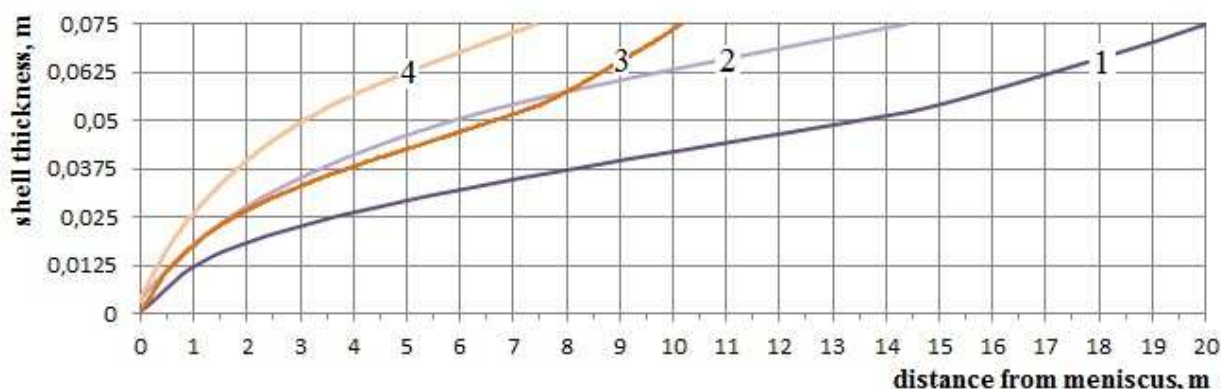


Рисунок 16. Положение ДФЗ в сортовой заготовке. 1, 2 – солидус и ликвидус для скорости 4,5 м/мин, 3 и 4 – для скорости 2,5 м/мин.

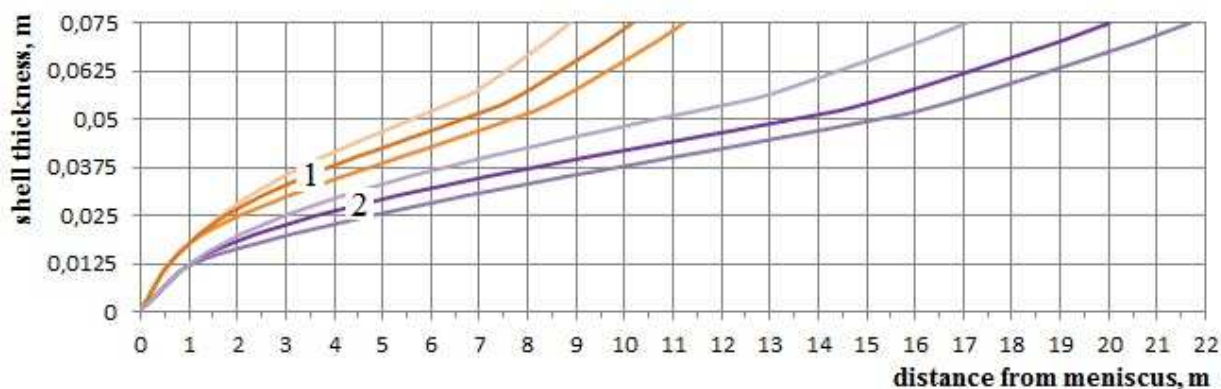


Рисунок 17. Реакция положения солидуса сортовой заготовки (квадрат 150мм) МНЛЗ ЕМЗ на изменение расхода воды вторичного охлаждения от минимального до максимального. 1 – скорость разлики 2.5м/мин, 3 – скорость разлики 4.5м/мин.

Адекватность результатов проверялась в производственных условиях на темплетях (рис. 19), полученных при прохождении ДФЗ далее места порезки. По области выливания с учётом деформации слитка режущими ножницами определялось соответствие вычисленных по модели и реальных положений ликвидуса и солидуса. Результаты моделирования и анализа темплетов согласуются в пределах 4-6%.

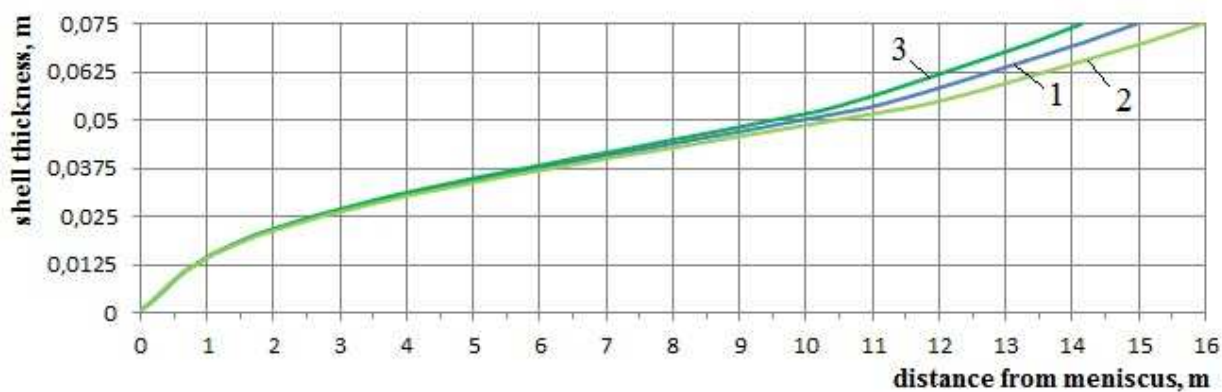


Рисунок 18. Положение солидуса сортовой заготовки (квадрат 150мм) МНЛЗ ЕМЗ при вариациях коэффициента теплопроводности для скорости разливки 3.5м/мин; коэффициент теплопроводности – функция из базы данных для моделируемой марки стали (1), -10% (2), и +10% (3)

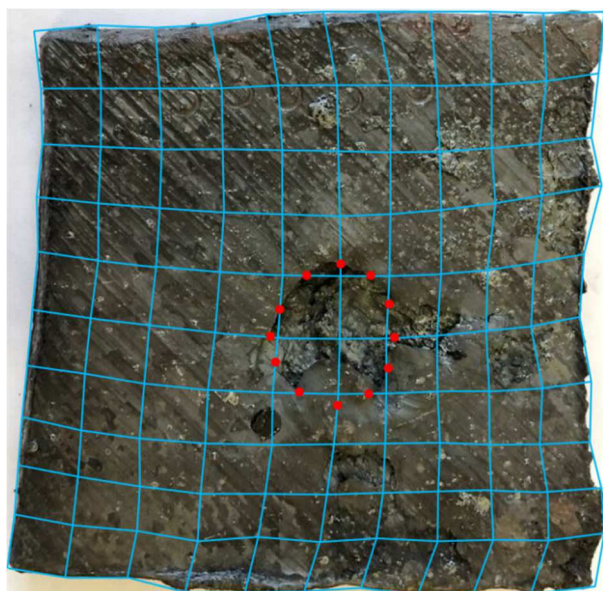


Рисунок 19. Темплет слитка с жидкой лункой прошедшей дальше места порезки.

Анализ результатов численных экспериментов показал, что возможности управления глубиной жидкой лунки за счёт вторичного охлаждения достаточно ограничены. Разработанная прогнозная модель позволяет в режиме реального времени отслеживать и прогнозировать положение точки окончательного затвердевания и на основе этих данных принимать оперативные решения по управлению процессом разливки.

В главе 5 «МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОРСУНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ»

При проектировании машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ)

возникает задача выбора типов форсунок, подающих водо-воздушную смесь, и способа их расстановки в зоне вторичного охлаждения (ЗВО). Требуется подобрать параметры форсуночного охлаждения таким образом, чтобы свести к минимуму температурные напряжения, вызванные неравномерным охлаждением слитка. Для того чтобы в рамках оптимизационной задачи решать прямую задачу вычисления температурного поля поверхности непрерывного слитка, необходимо иметь данные о параметрах модели, в частности о распределении коэффициента теплоотдачи под область воздействия форсунки определённого типа в зависимости от расхода охлаждающей воды. Такого рода задачи относятся к обратным задачам теплопроводности, по другой классификации называемым задачами параметрической идентификации. Они широко применяются при начальной настройке математических моделей в соответствии условиям реального производственного процесса, а также при

разработке адаптивных моделей. Для начальной настройки требуется измерение температуры поверхности слитка в достаточно большом количестве точек. При наличии этих данных задачу внутреннего теплообмена можно решать как задачу Дирихле в классической постановке задачи Стефана (8)-(11) с начальными условиями (12). Для решения применяется метод конечных разностей.

Был выполнен ряд расчетов для заданного распределения коэффициента теплоотдачи и различных координат размещения форсунки. Температура поверхности, полученная в результате, представлена на рис. 20. На основе расчётов на поверхности слитка были выделены участки влияния форсунок.

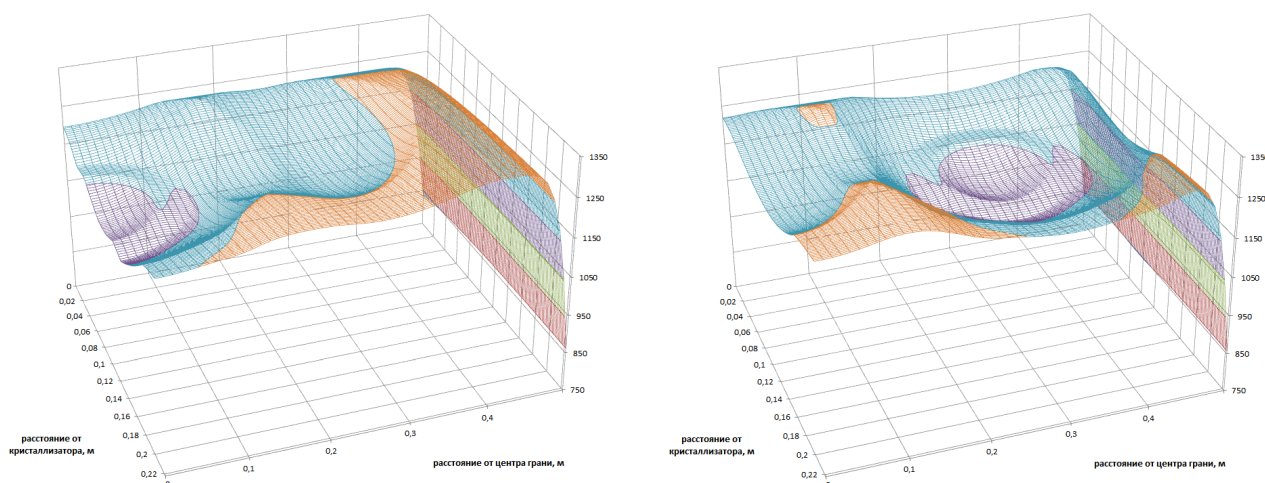


Рисунок 20. Температура поверхности слитка при различных способах расположения форсунок одного ряда в ЗВО.

На участке влияния группы форсунок одного уровня для температуры поверхности, известной на границе рассматриваемой области, задаётся её среднее значение при условиях непрерывности и минимума производной. Задача поиска такой температуры сводится к классической изопериметрической задаче теории оптимизации, решение которой известно – это параболоид. По известной температуре поверхности на участке, вычисляется соответствующий коэффициент теплоотдачи методом прямого обращения конечно-разностного аналога граничных условий (6). Оптимальным считается распределение коэффициента теплоотдачи (КТ), дающее минимальное среднеквадратичное отклонения моделируемой температуры поверхности от оптимальной.

Эксперименты по определению распределенного КТ по факелу форсунок различной конструкции проводились на стендах ЗАО «КОРАД» (рис. 21, 22). На основе данных о классах точности измерительных приборов и методики оценки погрешности косвенных измерений установлено, что погрешность определения значений коэффициента теплоотдачи составляет 5-10%. В ходе исследования была создана база данных, включающая в себя характеристики более сотни водяных и водовоздушных форсунок.

Выбор оптимального размещения форсунок был проведён для одно-, двух- и трехрядной расстановки. При расчетах для каждой строки базы данных варьировалось расстояние между форсунками, и определялось оптимальное, т.е. такое, при котором форсунки данного типа в данном режиме работы обеспечат

минимальное среднеквадратическое отклонение. Затем сравнивались строки базы данных по значению минимального среднеквадратичного отклонения и выбиралось минимальное значение.



Рисунок 21. Нестационарная установка для исследования коэффициента теплоотдачи под форсунками ЗАО КОРАД.

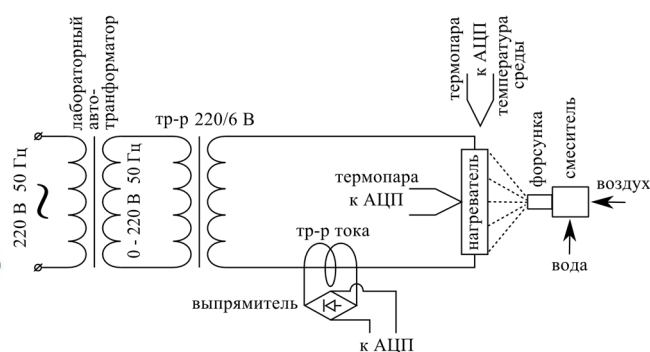
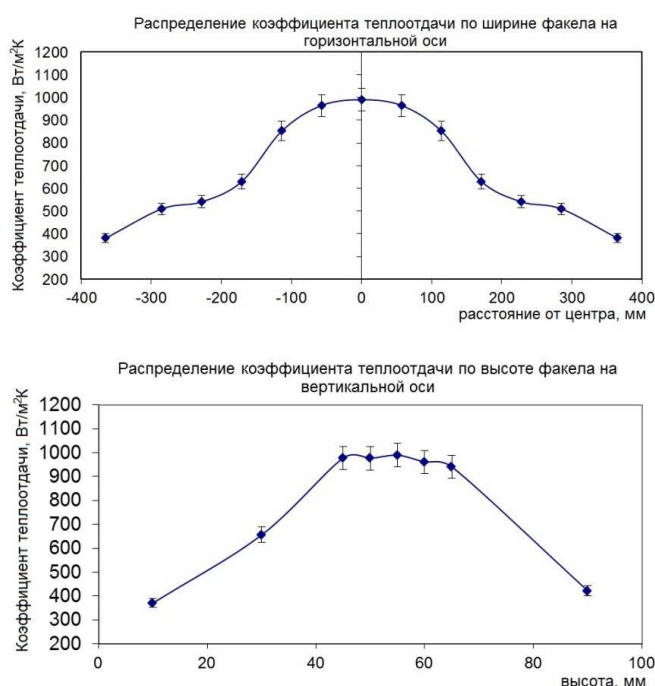


Рисунок 22. Схема установки для определения КТ и результаты экспериментов.

В главе 6 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАСХОДА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ В ЗВО» исследовано влияние режимов водяного охлаждения на температурное поле непрерывнолитой заготовки. В качестве инструмента для исследования использована математическая модель (1)-(7) с условиями для фазового перехода (18). Результаты определения температуры поверхности заготовки в ЗВО для номинального режима охлаждения (стальной сортовой заготовки с размерами поперечного сечения 150x150 мм, высота слитка внутри кристаллизатора 0,862 м, скорость разливки 3,5 м/мин, параметры ЗВО представлены в табл. 2) и нештатного (при засорении двух форсунок) приведены на рис. 23 и рис. 24.

Таблица 2. Параметры секций ЗВО

номер секции	1	2	3	4	5
длина, мм	399	1762	1981	2179	967
число форсунок на каждой грани заготовки	4	11	9	9	4

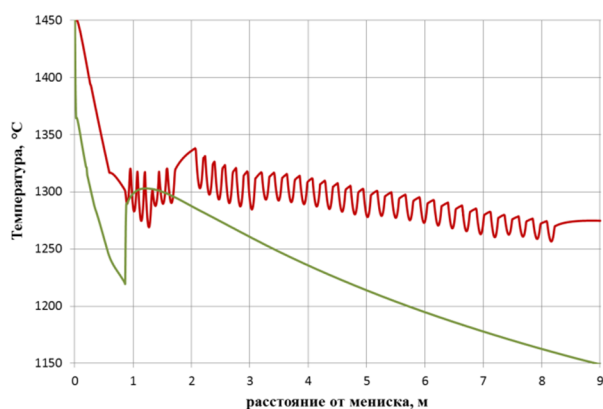


Рисунок 23. Температура центра грани и угла вдоль слитка в случае засорения 8-й и 9-й форсунок

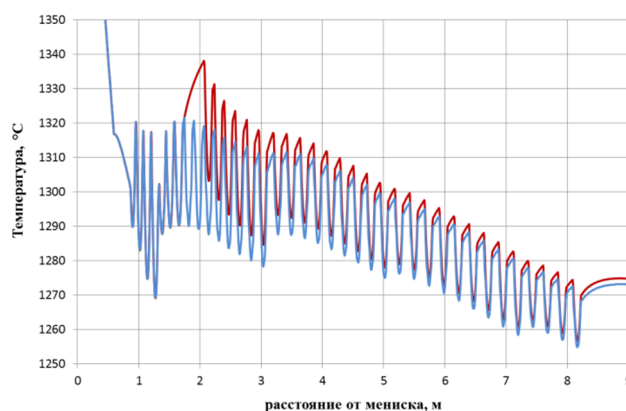


Рисунок 24. Температура центра грани слитка для случаев штатной работы и отключённых 8-й и 9-й форсунок

По результатам моделирования штатных и нештатных режимов функционирования ЗВО были проанализированы существующие интегральные критерии качества и сделан вывод о непригодности их для оценки температурного состояния заготовки с точки зрения соблюдения теплового режима, обеспечивающего производство качественного металла. На основании анализа зависимостей от расходов воды в ЗВО максимального, минимального и среднего значения температуры поверхности, а также теплоотвода, градиента, и интегрально-дифференциальных критериев на участках влияния секций, сделан вывод о том, что управление вторичным охлаждением слитка МНЛЗ по средней температуре поверхности слитка на участках влияния секций ЗВО имеет существенные преимущества по сравнению с управлением по другим рассмотренным числовым характеристикам (рис. 25, 26).

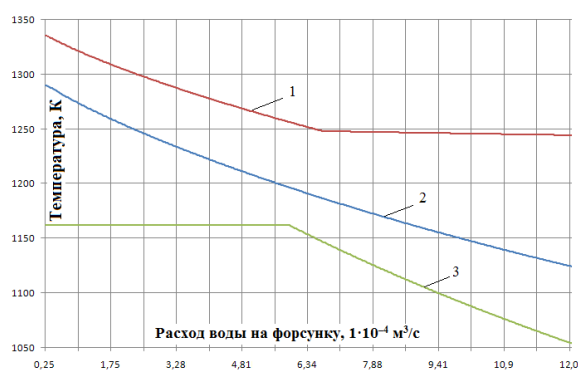


Рисунок 25. Изменение максимальной (1), средней (2) и минимальной (3) температуры поверхности слитка на участке влияния первой секции ЗВО в зависимости от расхода воды.

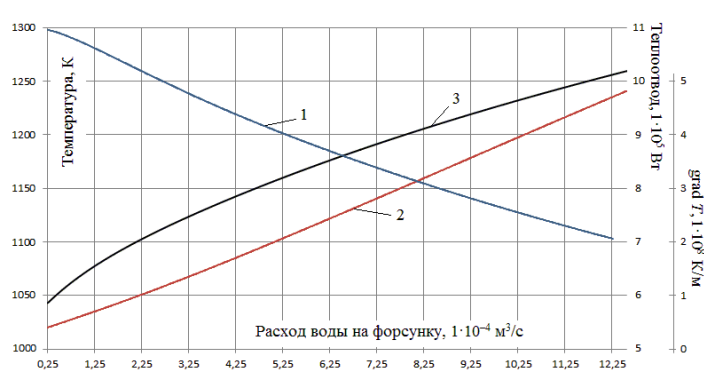


Рисунок 26. Изменение средней температуры поверхности слитка (1), величины максимального температурного градиента (2) и теплоотвода (3) на участке влияния третьей секции ЗВО в зависимости от расхода воды

При разработке алгоритмов управления МНЛЗ следует учитывать, что участок влияния секции ЗВО не совпадает с границами секции, причём участки влияния соседних секций частично пересекаются. Границы участков влияния

определяются по функции чувствительности температуры поверхности. Средняя температура, которую должна обеспечивать САУ, устанавливается для участков влияния секций. На рис. 27 представлен пример прогнозного управления режимами расходов воды для 1-й и 2-й секций слабовой МНЛЗ одного из металлургических комбинатов Донбасса.

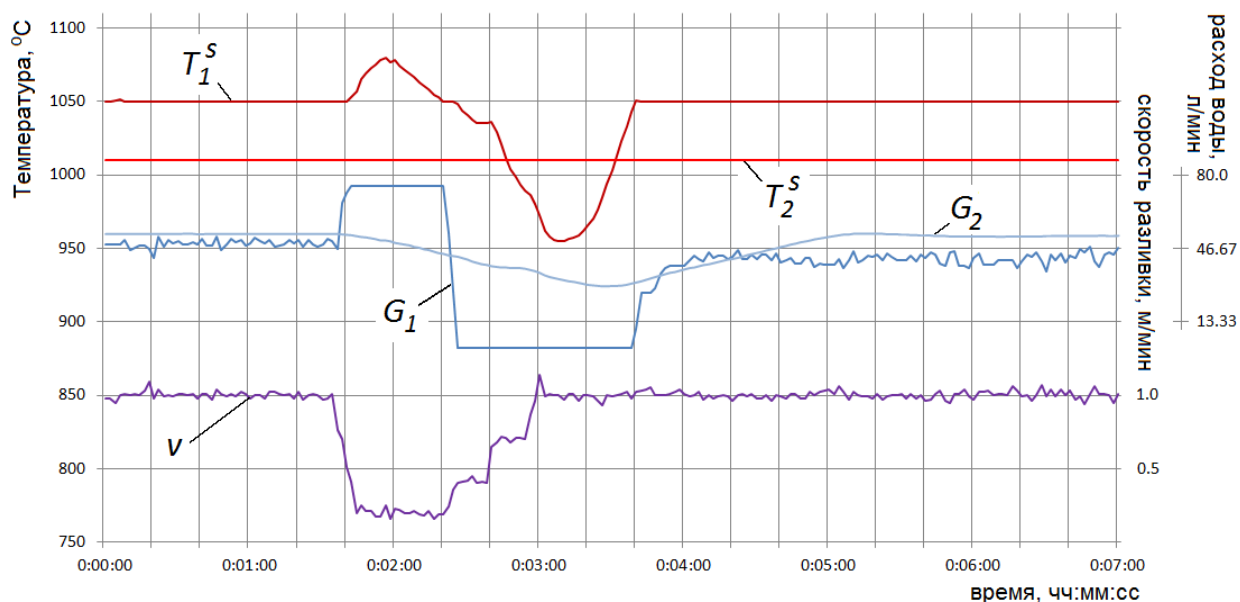


Рисунок 27. Расчёт режима охлаждения по прогнозной модели; v – скорость вытягивания слитка, м/мин; G_1 , G_2 – расход охлаждающей воды в 1-й и 2-й секциях ЗВО, л/мин; T_1^s , T_2^s – средняя температура на участке влияния 1-й и 2-й секций ЗВО, °C.

Таким образом, предложен метод управления режимами расхода воды в ЗВО на основе расчетов по математической модели технологического процесса. Отличием от существующих алгоритмов регулирования является то, что вместо регулятора, корректирующего управляющее воздействие по текущей невязке, применяется прогнозное моделирование. Алгоритм несколько раз рассчитывает будущее развитие процесса для различных входных данных, предсказывает поведение управляемого параметра в зависимости от различных входов и подбирает величины управляющих параметров, минимизирующие разницу между целью и прогнозом.

Таким образом, разработан метод прогнозного управления расходом охлаждающей воды в зоне вторичного охлаждения дающий возможность максимально строгого соблюдения температурного режима непрерывного слитка, а также имитационного моделирования на этапе проектирования МНЛЗ и разработки САУ вторичным охлаждением.

В главе 7 «ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ НЕПРЕРЫВНОГО СЛИТКА» для изучения тепловых процессов внутри непрерывнолитой заготовки при заливке металла в кристаллизатор методами математического моделирования параллельно исследуется динамика температурного поля и поля температурных

градиентов массивного стального слитка, разливаемого в форму-изложницу, и непрерывнолитого латунного слитка.

Была разработана математическая модель для расчётов поля температур слитка круглого сечения. Предполагается, что температурное поле одинаково во всех направлениях от оси слитка, и, таким образом уравнение теплопроводности прогнозной модели сводится к одномерному:

$$c_{ef}(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right] + \frac{\lambda(T)}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r}$$

Разработанный метод основан на математической интерпретации кривых, полученных в результате моделирования температурного поля и температурных градиентов. Впервые было предположено и подтверждено экспериментально, что во время формирования протяженной переходной смешанной структуры столбчатых и равноосных кристаллов значение глобального градиента по двухфазной зоне сохраняется постоянным (рис. 28). Моделирование скорости продвижения изотермы ликвидус (рис. 29), равно как и локальных градиентов температуры в районе ликвидуса и солидуса (рис. 30), позволяет прогнозировать следующие структурные зоны: корковая мелкозернистая зона (chill), зона мелких столбчатых кристаллов (fine columnar - FC), зона столбчатых кристаллов (columnar - C), зона равноосных зерен, (equiaxed - E) (рис. 29).

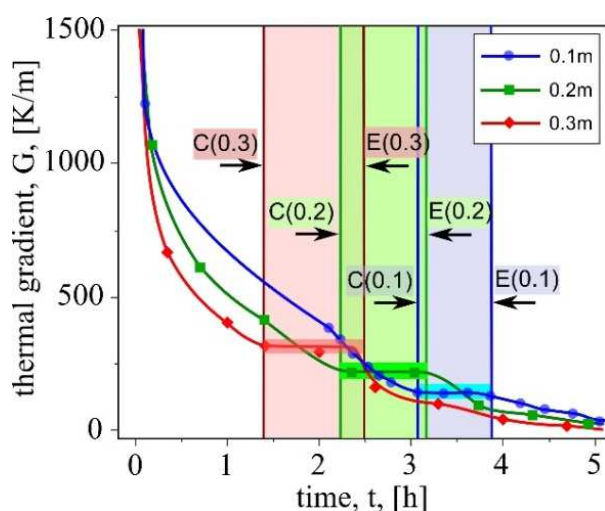


Рисунок 28. Динамика температурного градиента при затвердевании стального слитка различной толщины в форме-изложнице; температурный градиент остается постоянным, когда происходит CET; процесс **C(0.3) – E(0.3)** соответствует периоду $[t_C^R; t_E^R]$.

С помощью данного метода были спрогнозированы структурные переходы от малых столбчатых дендритов к крупным столбчатым дендритам (FCST – fine columnar into columnar) и от крупных столбчатых дендритов к неориентированным равноосным кристаллам (CET – columnar into equiaxed transition). Оба упомянутых перехода показаны на функции скорости продвижения изотермы ликвидус (рис. 29) и функции, представляющей динамику температурного градиента на границе раздела фаз (рис. 30). Сопоставление результатов моделирования и данных анализа макроструктуры темплетов подтвердило предположение о соответствии указанных точек перегиба структурным переходам. Более того, было установлено, что квазистационарный период затвердевания слитка проявляется, когда функция имеет линейный ход (рис. 30).

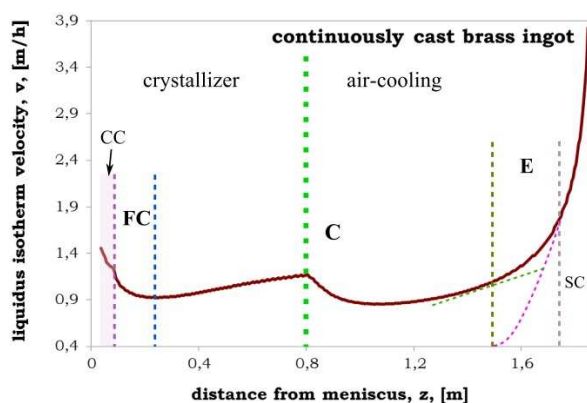


Рисунок 29. Скорость продвижения изотермы ликвидус при затвердевании непрерывнолитого латунного слитка.

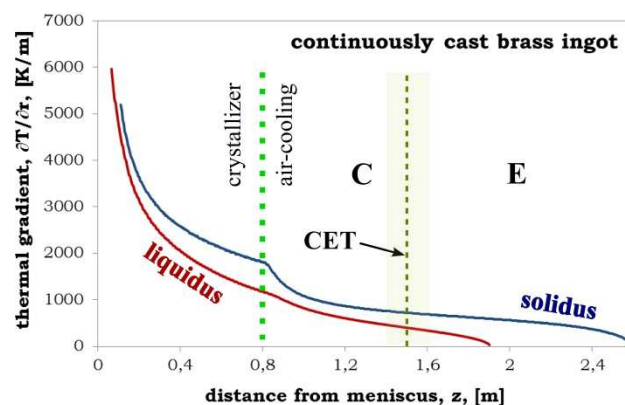


Рисунок 30. Температурный градиент на границе раздела фаз при затвердевании непрерывнолитого латунного слитка.

Адекватность полученных результатов проверялась в лабораторных условиях Института металлургии и материаловедения Польской академии наук по темплетам латунных слитков, полученных в производственных условиях на заводе Легница (рис. 31). Разработанная прогнозная математическая модель теплового поля и температурных градиентов, позволяет определять режимы функционирования МНЛЗ для получения необходимой структуры непрерывнолитой заготовки.

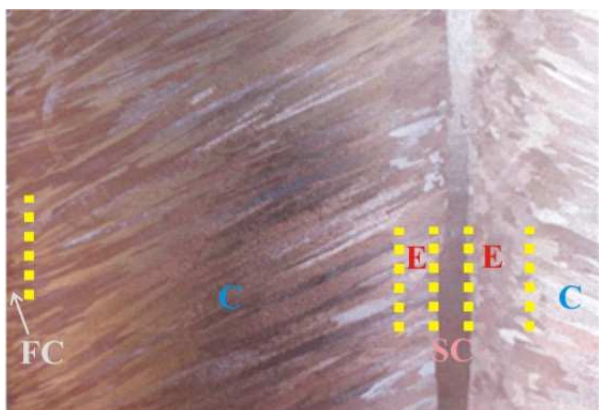


Рисунок 31. Структурные зоны непрерывнолитого латунного слитка. FC – мелкие столбчатые кристаллы (fine columnar), C – столбчатые кристаллы (columnar), E – равноосные неориентированные кристаллы (equiaxed structure); SC – монокристалл (single crystal) растущий вдоль оси слитка.

ВЫВОДЫ

В диссертации решена важная научно-техническая проблема прогнозного моделирования тепловых процессов в непрерывнолитой заготовке, изложены новые научно обоснованные технические решения по исследованию и совершенствованию организации теплотехнической части процесса разлива металлов в машинах непрерывного литья заготовок, вносящие значительный вклад в развитие народного хозяйства. Основные научные результаты заключаются в следующем:

1. На основе анализа исследований в области математического моделирования тепловых процессов в непрерывной разливке показаны

возможности совершенствования способов моделирования температурного поля непрерывного слитка с целью решения на базе разработанных математических моделей задач конструирования МНЛЗ, определения рациональных режимов функционирования, способов повышения качества металлургической продукции и за счёт этого обеспечения ресурсосбережения.

2. Для увеличения скорости расчётов, производимых по моделям кристаллизации, включающим условия Стефана, предложена методика расчёта положения границы раздела фаз и температуры в узлах вблизи фазового перехода по дополнительному равномерному шаблону, который позволяет устанавливать тот же шаг по времени, что и для основной явной конечно-разностной схемы, применяемой при расчётах поля температур. Разработан способ вычисления положения неизвестной границы фазового перехода в задаче Стефана, позволяющий производить расчёты в несколько раз быстрее, чем в реальном режиме времени, что делает возможным использование соответствующей математической модели в системе автоматического управления производственным процессом непрерывной разливки.

3. Впервые разработана математическая модель температурного поля непрерывнолитой заготовки с наличием двухфазной зоны с использованием условий Стефана и новый метод определения положения границ фазового перехода, позволяющий рассчитывать толщину формирующейся оболочки слитка и длину жидкой фазы вдоль технологической оси, а также скорости продвижения изотерм и границ фазового перехода и градиенты температур вблизи фазового перехода при стационарных и нестационарных режимах разливки.

4. Проведено системное сопоставление различных моделей температурного поля с расчётом границ фазового перехода по условиям Стефана, по квазиравновесной модели, по методу введения функции состава гетерогенной смеси, а также по разработанному новому методу нахождения положения двухфазной зоны внутри непрерывного слитка, которое позволяет выбирать структуру математической модели наиболее соответствующую требованиям конкретной практической задачи, в частности быстродействие для прогнозных моделей, вычисление производных при расчётах скоростей и температурных градиентов или имитационное моделирование, замещающее натурные эксперименты.

5. Разработана прогнозная модель для диагностики теплового состояния кристаллизаторов сотовой МНЛЗ и вычисления толщины формирующейся твёрдой корочки слитка, основанная на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности с условием Стефана и задании граничных условий третьего рода, в которых задействована величина теплопередачи от наружной поверхности корки к охлаждающей воде, определяемая в режиме реального времени из плотности теплового потока, итогового коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе, коэффициента теплоотдачи от корочки заготовки к внутренней поверхности кристаллизатора и эффективной толщины газового зазора в зависимости от текущих значений перепада температуры

охлаждающей воды и её расхода и геометрических параметров гильзы кристаллизатора. Модель позволяет в режиме реального времени определять тепловое состояние кристаллизатора.

6. Разработана математическая модель расчёта положения двухфазной зоны кристаллизующейся непрерывнолитой заготовки с использованием условий Стефана, позволяющая устанавливать теплофизические закономерности формирования слитка, определять чувствительность формы жидкой лунки к изменениям различных параметров процесса, а также непосредственно во время производственного процесса наблюдать температурное поле непрерывного слитка в любых точках и положение двухфазной зоны в любом сечении. Исследования поведения формы двухфазной зоны в зависимости от динамики процесса разлива позволяют вырабатывать рекомендации по подбору конструктивных и технологических параметров при разработке новых, а также модернизации существующих МНЛЗ, с целью наиболее строгого соблюдения требований к температурному режиму разлива.

7. Впервые предложена методика определения оптимальной конфигурации форсунок в ЗВО, заключающаяся в определении распределения коэффициента теплоотдачи по ширине слябовой МНЛЗ путем решения обратной задачи теплопроводности с учетом фазовых превращений в слитке с помощью разработанной математической модели. На основе предложенной методики расчета оптимальных параметров форсуночного охлаждения могут быть автоматически подобраны такие конструктивные параметры форсуночного охлаждения в ЗВО, которые будут соответствовать наименьшим температурным градиентам, а, следовательно, обеспечивать наилучшее возможное качество металла, производимого МНЛЗ.

8. Разработана методика оценки температурного состояния слитка, как на этапе проектирования, так и в процессе функционирования системы автоматического управления МНЛЗ. Исследована чувствительность таких числовых показателей температурного поля как максимальное, минимальное и среднее значения температуры поверхности, а также теплоотвод, максимальный градиент, и интегрально-дифференциальные критерии на участках влияния секций к изменениям управляющих параметров (расходов охлаждающей воды) и их соответствие технологическим требованиям обеспечения качественной продукции.

9. Усовершенствована методика определения оптимальных расходов воды в ЗВО, дающая возможность максимально строгого соблюдения температурного режима непрерывного слитка при управлении вторичным охлаждением в переходных процессах разлива, а также имитационного моделирования на этапе проектирования конструкции и системы автоматического управления МНЛЗ. На основе предложенной компьютерной прогнозной модели температурного поля непрерывного слитка разработана методика прогнозного управления режимами расхода воды в ЗВО.

10. На основе анализа качественного поведения кривых скорости продвижения изотермы ликвидус и температурных градиентов вблизи

двухфазной зоны, и структуры соответствующих темплетов, полученных на производстве, разработаны методы определения структуры непрерывного слитка по измеряемым параметрам процесса разлива и методика, позволяющая определять режимы функционирования МНЛЗ для формирования необходимой структуры непрерывнолитой заготовки.

11. Разработанные трёхмерная математическая модель температурного поля непрерывного слитка, алгоритмы численного решения поставленной задачи, а также алгоритм решения обратной задачи теплопроводности с учётом фазовых переходов были использованы при разработке программного обеспечения для автоматического проектирования оптимальной конфигурации зоны вторичного охлаждения (ЗВО) машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) ЗАО "КОРАД", г. Москва, РФ.

12. Результаты исследований, касающиеся влияния разных технологических параметров на тепловое состояние слитка, в частности на глубину и форму жидкой лунки были использованы при выработке практических рекомендаций для совершенствования режимов функционирования сортовой МНЛЗ Енакиевского металлургического завода ЗАО «ВТС».

Внедрение данных технических решений позволяет улучшить качество выпускаемой металлургической продукции при снижении ее себестоимости, увеличить срок службы оборудования и производительность МНЛЗ, обеспечить дополнительное ресурсосбережение.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК ДНР

1. **Иванова, А. А.** Моделирование процесса кристаллизации, идентификация параметров внешнего теплообмена и управление расходами воды в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ / А. А. Иванова // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії №1(18), 2010. – С. 127-131.

2. **Иванова, А. А.** 3-D математическая модель температурного поля непрерывного слитка / А. А. Иванова // Труды ИПММ НАН Украины. – 2011. – Т. 23. – С. 100-109.

3. Бирюков, А. Б. Рациональные параметры тепловой работы зоны вторичного охлаждения слабовых МНЛЗ / А. Б. Бирюков, **А. А. Иванова** // Сталь, № 2, 2015, С. 18-21.

В рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК ДНР, включенных в Международные наукометрические базы

4. **Иванова, А. А.** Критерии качества температурного поля непрерывного слитка / А. А. Иванова // Металлург – 2011. – № 10. – С. 47-53. *переведена на английский*: А. А. Ivanova. Criteria of the quality of the temperature field of a continuous-cast ingot. Metallurgist, Vol. 55, Nos. 9–10, January, 2012. pp. 710-719. (**Scopus**)

5. **Иванова, А. А.** Методика расчета оптимальных параметров форсуночного охлаждения непрерывнолитого сляба / А. А. Иванова, В. А. Капитанов, А. В. Куклев // *Металлург* – 2012. – № 3. – С. 45-49. *переведена на английский*: А. А. Ivanova, V. A. Kapitanov and A. V. Kuklev. Method of calculating the optimum parameters for the air-mist cooling of a continuous-cast slab. *Metallurgist*, Vol.56, Nos. 3 – 4, July, 2012, p.173–179. (**Scopus**)

6. **Anna Ivanova.** Model predictive control of secondary cooling modes in continuous casting. The proceedings of Metal 2013: 22st International Conference on Metallurgy and Materials, May 15th - 17th 2013, Brno, Czech Republic, EU, pp. 11-16. (**Scopus**)

7. **Иванова, А.А.** Прогнозное управление расходом воды в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ / А. А. Иванова // *Металлург* – 2013. – № 7. – С. 34-39. *переведена на английский*: А.А. Ivanova. Predictive Control of Water Discharge in the Secondary Cooling Zone of a Continuous Caster. *Metallurgist*, Vol. 57, Nos. 7–8, November, 2013, p.592–599. (**Scopus**)

8. **A.A. Ivanova.** Calculation of Phase-Change Boundary Position in Continuous Casting. *Archives of Foundry Engineering*, Volume 13, Issue 4/2013, p. 57-62. (**Scopus**)

9. **Ivanova, A.** Model predictive control of continuous ingot solidification. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* Volume 15, Issue PART 1, 2013, p. 444-448. (**Scopus**)

10. Бородин, А. И. Моделирование температурного поля непрерывнолитого слитка с определением положения границы фазового перехода / А. И. Бородин, **А. А. Иванова** // *Инженерно-физический журнал*. 2014, Т. 87, № 2. С. 492-497. *переведена на английский*: А. I. Borodin, А. А. Ivanova. Modeling of the Temperature Field of a Continuously Cast Ingot with Determination of the Position of the Phase-Transition Boundary. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. Vol.87, No 2, March, 2014, pp. 507-512. (**Scopus**)

11. Бирюков, А. Б. Метод определения рациональной интенсивности вторичного охлаждения непрерывнолитой слябовой заготовки / А. Б. Бирюков, **А. А. Иванова** // *Металлург*. 2014. № 11. С. 47-51. *переведена на английский*: А.В. Biryukov, А. А. Ivanova. Method of Determining an Efficient Rate for the Secondary Cooling of a Continuous-Cast Slab. *Metallurgist*, Vol. 58, Nos. 11–12, March, 2015, p.967-972. (**Scopus**)

12. **Иванова, А. А.** Изменение формы жидкой лунки при варьировании параметров непрерывной разливки стали / А. А. Иванова // *Металлург*. 2015. № 4. С. 36-40. *переведена на английский*: А. А. Ivanova. Changes in the Form of the Liquid Crater with Variation of the Process Parameters in the Continuous Casting of Steel. *Metallurgist*, Vol. 59, Nos. 3–4, July, 2015, p.308-314. (**Scopus**)

13. Wołczyński, W., Lipnicki, Z., Bydątek, A.W., **Ivanova A.A.** Structural Zones in Large Static Ingot. Forecasts for Continuously Cast Brass Ingot. *Archives of Foundry Engineering*, Vol.16, Issue 3/2016, pp. 141 – 146. (**Scopus**)

14. Kwapisiński, P., **Ivanova, A.A.**, Kania, B., Wołczyński, W. Some Similarities / Differences between Steel Static and Virtual Brass Static Casting. Archives of Foundry Engineering. Issue 17(1), 2017. pp. 109 – 114. (**Scopus**)
15. Kwapisiński, P., Lipnicki, Z., **Ivanova, A.A.**, Wołczyński, W. Role of the Structural and Thermal Peclet Numbers in the Brass Continuous Casting. Archives of Foundry Engineering. Vol.17 Issue 2/2017. pp. 49 – 54. (**Scopus**)
16. Wołczyński W., **Ivanova A.A.**, Kwapisiński P., Olejnik E. Structural transformations versus hard particles motion in the brass ingots. Arch. Metall. Mater. 62 (2017), 4, 2455-2461. (**Scopus**)

Монография

17. Ткаченко, В.Н. Параметрическая идентификация, анализ и синтез систем управления технологическими процессами / В. Н. Ткаченко, **А. А. Иванова**, А. Л. Красников, А. В. Ткаченко, Н. Н. Чернышев // Славянск: Изд-во ИПММ НАНУ, 2016. – 525с. ISBN 978-966-02-7687-1.

Публикации в других изданиях

18. **Anna Ivanova**. Identification of Convection Heat Transfer Coefficient of Secondary Cooling Zone of Based on Least Squares Method and Stochastic Approximation Method // <http://arxiv.org/abs/1003.4657>
19. **Иванова, А. А.** Метод наименьших квадратов в задаче идентификации параметров внешнего теплообмена зоны вторичного охлаждения МНЛЗ / А. А. Иванова // Материалы международной научной конференции “Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (ISDMCI '2011)”, 16-20 мая 2011 года, г. Евпатория, С. 73-76.
20. **Иванова, А. А.** Моделирование температурного поля непрерывного слитка для различных параметров форсуночного охлаждения / А. А. Иванова // Сборник научных трудов конференции «Инновационные технологии внепечной металлургии чугуна и стали» (Донецк, 25 – 26 октября 2011). С. 249-254.
21. **Anna Ivanova**, Sergey Strichenko. Dependence of billet liquid pool shape on various continuous casting parameters. Proceedings of 8th European Continuous Casting Conference, 23 – 26 June 2014, Graz, Austria, EU, p.1428-1435.
22. Бирюков, А. Б. Диагностика теплотехнических параметров работы кристаллизаторов МНЛЗ / А. Б. Бирюков, **А. А. Иванова** // "Бюллетень научно-технической и экономической информации "Черная металлургия". 2015. № 2(1382). С. 49-54.
23. Бирюков, А. Б. Современные подходы к эффективному управлению теплотехническими процессами в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ / А. Б. Бирюков, **А. А. Иванова** // "Бюллетень научно-технической и экономической информации "Черная металлургия". 2015. №3(1383). С. 46-52.
24. **Anna Ivanova**. Mathematical model of temperature field and mushy zone position of continuous ingot. METEC & 2nd ESTAD 2015 European Steel Technology and Application Days, Dusseldorf, Germany, 15 – 19 June 2015.

25. Бирюков, А. Б. Современные подходы к математическому моделированию теплотехнических процессов в литейно-прокатных модулях на участке МНЛЗ – нагревательное устройство / А. Б. Бирюков, **А. А. Иванова** // "Бюллетень научно-технической и экономической информации "Черная металлургия". 2015. Вып.7 (1387). С. 50-55.

26. Бирюков, А. Б. Сравнительный анализ использования пламенных печей и индукционных подогревателей для тепловой обработки металла в литейно-прокатных агрегатах / А. Б. Бирюков, **А. А. Иванова** // "Бюллетень научно-технической и экономической информации "Черная металлургия". 2015. Вып.12 (1392). С. 40-46.

27. Бирюков, А. Б. Математическое моделирование теплотехнических процессов в литейно-прокатных модулях на участке МНЛЗ – нагревательное устройство / А. Б. Бирюков, **А. А. Иванова** // Металлургия: технологии, инновации, качество. «Металлургия – 2015». Труды XIX Международной научно-практической конференции 15–16 декабря 2015 года (г. Новокузнецк, РФ). С. 135-140.

28. Бирюков, А. Б. Оценка температурного состояния непрерывнолитой заготовки при засорении форсунок зоны вторичного охлаждения / А.Б. Бирюков, **А.А. Иванова**, С.М. Сафьянц // Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство», Старый Оскол, РФ, 23-24 ноября 2017 г. Т.1, С. 7-13.

29. Бирюков, А. Б. Математическое моделирование теплового состояния заготовки, формирующейся в кристаллизаторе, с использованием системы диагностики теплотехнических процессов / А. Б. Бирюков, **А. А. Иванова** // Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XVII Международной конференции: в 2 ч. / под ред. В.Е. Рощина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – Ч. 2. С. 3-10. (также вышла в) "Бюллетень научно-технической и экономической информации "Черная металлургия". 2018. Вып.1 (1417). С. 65-68.

30. Бирюков, А. Б. Современные подходы к диагностике теплотехнических параметров работы литейно-прокатных агрегатов на участке МНЛЗ – нагревательное устройство / А.Б. Бирюков, **А.А. Иванова** // Труды XX Международной научно-практической конференции «МЕТАЛЛУРГИЯ: ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО» «МЕТАЛЛУРГИЯ - 2017» Россия, г. Новокузнецк, СибГИУ, 15-16 ноября 2017 г. С. 348-352. также вышла в // "Бюллетень научно-технической и экономической информации "Черная металлургия". 2018. Вып.2 (1418). С.44-47.

31. Ткаченко, В.Н. Имитационное моделирование процесса управления вторичным охлаждением машины непрерывного литья заготовок. [Текст] / В. Н. Ткаченко, **А. А. Иванова** // Тези доповідей П'ятої науково-практичної конференції з міжнародною участю «Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС'2010» – Київ, 21 – 25 червня 2010 – С. 157 – 159.

32. **Иванова, А. А.** Структура управляющих воздействий и методы управления охлаждением непрерывного слитка / А. А. Иванова // Сборник тезисов Тринадцатой Международной научно-технической конференции «Моделирование, идентификация, синтез систем управления» – Москва – Донецк, 12 – 19 сентября 2010г. – С. 140-141.

33. **Ganna Ivanova.** Operative adaptation of mathematical model of heat and mass transfer of continuous casting. Book of abstract of the 18th Conference on applied and industrial mathematics CAIM 2010 (October 14 – 17, 2010, Iasi, Romania), p.47.

34. **Иванова, А. А.** Прогнозное управление охлаждением непрерывного слитка / А. А. Иванова // Международная научная конференция «Современные проблемы математики и её приложения в естественных науках и информационных технологиях» (ХАРЬКОВ, 17-22 апреля 2011 г). С. 223 – 224.

35. **Иванова, А. А.** Математическая модель для расчета конструктивных параметров форсуночного охлаждения непрерывного слитка / А. А. Иванова // Сборник тезисов XIV Международной научно-технической конференции «Моделирование, идентификация, синтез систем управления» – Москва – Донецк, 11 – 18 сентября 2011г. – С. 149-151.

36. **Ganna Ivanova.** MPC of secondary cooling in continuous casting. // XIII International Scientific Conference "New Technologies and Achievements in Metallurgy and Material Engineering" (Częstochowa, Polska, May 30 – June 01 2012). p. 125 – 128.

37. **Anna Ivanova.** Determination of optimal distribution of external heat extract coefficient in the secondary cooling of continuous casting. THE 20th CONFERENCE ON APPLIED AND INDUSTRIAL MATHEMATICS, Dedicated to Academician Mitrofan M. Cioban, CAIM 2012, Chisinau, Republic of Moldova, August 22-25, 2012

38. **Иванова, А. А.** Оперативная настройка параметров теплоотдачи математической модели температурного поля непрерывнолитой заготовки / А. А. Иванова // Сборник тезисов XV Международной научно-технической конференции «Моделирование, идентификация, синтез систем управления» – Москва – Донецк, 09 – 16 сентября 2012г. – С. 153-154

39. **Иванова, А. А.** Метод наименьших квадратов в решении внутренней обратной задачи теплопроводности / А. А. Иванова // Сборник тезисов Международной научной конференции «Современная информатика: проблемы, достижения, и перспективы развития», посвященной 90-летию академика В.М. Глушкова. (Киев, 12-13 сентября 2013 г.)

40. **Anna A. Ivanova.** Identification of the thermal conductivity coefficient as distributed parameter using least squares method. ICIPE2014 8th International Conference on Inverse Problems in Engineering, May 12–15, 2014, Krakow, Poland, p. 81-82.

41. **Anna Ivanova.** Mathematical model of temperature field and mushy zone position of continuous ingot. METEC & 2nd ESTAD 2015 European Steel Technology and Application Days, Dusseldorf, Germany, 15 – 19 June 2015.

42. **Иванова, А. А.** Математическое моделирование положения двухфазной зоны в непрерывнолитом слитке / А. А. Иванова, А. Н. Курганский. // XV Минский международный форум по тепломассообмену, Минск, 23-26 мая 2016, С. 331-334.

43. Wołczyński, W., Kania, B., Bydąlek, A. W., Kwapisieński, P., **Ivanova, A. A.** Correlation between Thermal Gradients' Field and Structure Formation in Steel Static and Continuously Cast Brass Ingot. 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18) August 7-12, 2016, Nagoya, Japan.

44. Z. Lipnicki, P. Kwapisieński, A.W. Bydąlek, **A.A. Ivanova**, W. Wołczyński. Some similarities and differences between steel static and brass continuous casting. 57th International Scientific Conference "Solidification and Crystallization of Metals 2016" 19 - 21 September 2016, Kielce - Cedzyna, Poland

45. P. Kwapisieński, **A.A. Ivanova**, W. Wołczyński, E. Olejnik. Control of structural zones formation and hard particles motion in the brass ingots. XVII Międzynarodowa Konferencja Naukowa "Zapewnienie jakości w odlewnictwie i spawalnictwie" Grand Hotel Permon, Słowacja, 9-11.05.2017

46. Wołczyński W., Kwapisieński P., **Ivanova A.A.**, Olejnik E. Dominant role of the columnar structure in the brass ingots continuous casting. International Scientific Conference on "Achievements in Mechanical and Materials Engineering" AMME`2017, Gliwice - Wisła, Poland, 22 – 25 October 2017, p.100.

47. **Ivanova A.**, Migorski S., Wyczolkowski R. Numerical identification of temperature dependent thermal conductivity using least squares method. International Conference on Computational Heat and Mass Transfer ICCHMT2018, Cracow, Poland, 23-26 May 2018, p 243-244.

48. W. Wołczyński, **A.A. Ivanova**, P. Kwapisieński. Brass / Steel Ingot Structure via Mathematical Predictions. VII Krajowa Konferencja "Nowe Materiały – Nowe Technologie w Przemśle Okrętowym. Akademia Morska, Szczecin, Poland, 11-14 June, 2018, p.52.

АННОТАЦИЯ

Иванова А.А. Прогнозное моделирование тепловых процессов при непрерывной разливке металлов.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика» - ГУ «Институт прикладной математики и механики», Донецк, 2018.

В диссертации решена проблема прогнозного моделирования тепловых процессов в непрерывнолитой заготовке, изложены новые научно обоснованные технические решения по исследованию и совершенствованию организации теплотехнической части процесса разливки металлов в машинах непрерывного литья заготовок и способов повышения качества металлургической продукции. Предложена методика расчёта положения границы раздела жидкой и твёрдой фаз металла и температуры вблизи фазового перехода внутри слитка. Разработан способ вычисления положения неизвестной границы фазового перехода в задаче Стефана, позволяющий производить расчёты быстрее, чем в

режиме реального времени. Предложена математическая модель температурного поля непрерывнолитой заготовки с использованием условий Стефана для определения положения границ двухфазной зоны. Проведено системное сопоставление различных моделей кристаллизации непрерывных слитков. Разработана прогнозная модель для диагностики теплового состояния кристаллизаторов сортовой машины непрерывного литья и вычисления толщины твёрдой корочки слитка. Исследовано поведение формы двухфазной зоны в зависимости от динамики процесса разливки. Разработана методика определения оптимальной конфигурации форсуночного охлаждения. Представлены новые способы оценки температурного состояния непрерывного слитка. Усовершенствована методика определения оптимальных расходов воды в зоне вторичного охлаждения. Разработаны подходы к определению структуры непрерывного слитка по измеряемым параметрам процесса разливки и методика выработки режимов функционирования машины непрерывного литья для формирования необходимой структуры непрерывнолитой заготовки.

Ключевые слова: непрерывная разливка металлов, кристаллизация слитка, температурное поле, двухфазная зона, моделирование тепловых процессов, оценка теплового состояния.

ABSTRACT

Ivanova A.A. Predictive modeling of thermal processes in the continuous casting of metals.

Dissertation for Doctor of Technical Sciences by specialty 05.14.04 "Industrial Heat Power Engineering" - Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Donetsk, 2018.

In the dissertation the problem of predictive modeling of thermal processes in continuous casting is solved, new scientifically technical solutions for researching and improving the organization of the thermotechnical issue of the metal casting process in machines for continuous casting and ways to improve the quality of metallurgical products are presented. The method of calculating the position of the interface between the liquid and solid phases of the metal and the temperature near the phase transition inside the ingot is proposed. The method for calculating the position of an unknown boundary of a phase transition in the Stefan problem is developed, allowing calculations to be made faster than in real time. The mathematical model of the temperature field of a continuous cast billet is proposed using the Stefan conditions for determining the position of the boundaries of a two-phase zone. The systematic comparison of various models of continuous ingot crystallization has been carried out. The prognostic model has been developed to diagnose the thermal state of the molds of a continuous casting machine and to calculate the thickness of the solid shell of the ingot. The behavior of the shape of the two-phase zone is studied depending on the dynamics of the casting process. The technique for determining the optimum configuration of nozzle cooling has been developed. New methods for estimating the temperature state of a continuous ingot are presented. The method of determining optimal water flow rates in the secondary cooling zone has been improved. The

approaches to determining the structure of a continuous ingot on the measured parameters of the casting process and the procedure for developing the operating modes of a continuous casting machine for forming the necessary structure of a continuous cast billet are developed.

Key words: continuous casting of metals, ingot crystallization, temperature field, two-phase zone, modeling of thermal processes, estimation of the thermal state.