

УДК  
ГРНТИ  
Инв. №

**УТВЕРЖДЕНО:**

Исполнитель:  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И.Носова»

От имени Руководителя организации

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
М.П.

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 1 этапа Государственного контракта  
№ П2402 от 18 ноября 2009 г. и Дополнению от 19 марта 2010 г. № 1/П2402,  
Дополнению от 27 июля 2010 г. № 2, Дополнению от 14 марта 2011 г. № 3,  
Дополнению от 29 июня 2011 г. № 4

Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова»

Программа (мероприятие): Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.2 Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.

Проект: Совершенствование методов сбора, регистрации, обработки, хранения, передачи и защиты информации для повышения эффективности управления металлургическими агрегатами, направленного на повышение производительности, качества продукции и экологических показателей.

Руководитель проекта:

\_\_\_\_\_/Ячиков Игорь Михайлович  
(подпись)

**Магнитогорск**  
**2013 г.**

## Реферат

Отчет 191 с., 1 ч., 62 рис., 8 табл., 110 источн., 0 прил.

математические модели технологических процессов , комплексное исследование металлургических процессов , программное обеспечение информационных систем , математическое обеспечение информационных систем , информационные системы технологических процессов , системы сбора, регистрации, обработки и передачи информации , достоверность информации

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 1 этапу Государственного контракта № П2402 "Совершенствование методов сбора, регистрации, обработки, хранения, передачи и защиты информации для повышения эффективности управления металлургическими агрегатами, направленного на повышение производительности, качества продукции и экологических показателей." (шифр "НК-425П") от 18 ноября 2009 по направлению "Обработка, хранение, передача и защита информации" в рамках мероприятия 1.2.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.", мероприятия 1.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук" , направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий." федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Цель работы - Создание информационного и математического обеспечения новых комплексных информационных технологий и систем для повышения эффективности управления металлургическими агрегатами

Методы аналитического и численного решения уравнений  
Био-Савара-Лапласа, Максвелла, Новье – Стокса.

Методы статистической обработки и анализа данных с учетом временных трендов

Методы системного исследования сложных процессов, функционального моделирования, синтеза и анализа сложных систем

Методы аналитического и численного решения уравнений теплопроводности и массопереноса в цилиндрической системе координат с граничными условиями первого и второго рода.

Методы аналитического и численного решения уравнение теплопроводности с граничными условиями второго и четвертого рода в декартовой системе координат

Методы аналитического и численного решения уравнений теплопроводности и массопереноса в цилиндрической системе координат с граничными условиями первого и второго рода.

Статистические методы распознавания изображений с низкой контрастностью.

Информационные технологии сбора и хранения данных.

Информационные технологии обработки данных с использованием локальных моделей.

1. Система информационных и функциональных моделей сложных металлургических процессов: позволяет выполнить оценку роли элементов металлургического процесса в общей цепочке производства, теоретически обосновать необходимость математического моделирования процессов, выделить информационные потоки и взаимосвязи между ними;

2. Система математических моделей для исследования сложных металлургических процессов: позволяет провести комплексного теоретического описание металлургических процессов и выполнить имитационное моделирование в условиях близких к действующему производству

**СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ**  
по Государственному контракту П2402 от 18 ноября 2009 на выполнение поисковых  
научно-исследовательских работ для государственных нужд

Организация-Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Руководитель темы:

кандидат технических наук, доцент \_\_\_\_\_ Ячиков И. М.  
подпись, дата

Исполнители темы:

кандидат технических наук, доцент \_\_\_\_\_ Логунова О. С.  
подпись, дата

кандидат технических наук, без ученого звания \_\_\_\_\_ Кочержинская Ю. В.  
подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания \_\_\_\_\_ Зарецкий М. В.  
подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания \_\_\_\_\_ Ларина Т. П.  
подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания \_\_\_\_\_ Суханова М. Н.  
подпись, дата

Соисполнители:

кандидат технических  
наук, без ученого звания

\_\_\_\_\_ Егорова . А.  
подпись, дата

кандидат технических  
наук, без ученого звания

\_\_\_\_\_ Кухта . А.  
подпись, дата

без ученой степени, без  
ученого звания

\_\_\_\_\_ Ячиков . А.  
подпись, дата

## Содержание

Определения .....	7
Обозначения и сокращения.....	8
Введение.....	9
Основная часть .....	14
1 Аналитический обзор.....	14
1.1 Системный анализ полного цикла металлургических процессов (агломерационно-доменное, сталеплавильное и прокатные производства), включающий исследование информационных и материальных потоков процесса .....	14
1.2 Разработка математического обеспечения управления информационными потоками сбора, обработки и хранения информации.....	21
1.3 Разработка структурной модели сбора, первичной обработки и хранения структурированной информации, поступающей с металлургических агрегатов.....	28
1.4 Традиционные пути решения проблемы управления режимами охлаждения непрерывно-литой заготовки .....	44
1.4.1 Теоретические исследования в области моделирования процесса теплопроводности и оптимизации охлаждения заготовок.....	45
1.4.2 Экспериментальные исследования по изучению управляющих воздействий на процесс разливки стали.....	52
1.4.3 Исследования методов получения экспертных оценок по электронным изображениям.....	62
2 Выбор обоснованного варианта направления исследований .....	65
3 План проведения экспериментальных и теоретических исследований	67
4 Результаты экспериментальных и теоретических исследований.....	70

4.1 Разработка математических динамических моделей процессов химической и механической трансформации материалов в металлургических агрегатах .....	70
4.2 Разработка математической модели теплопереноса в токонесущих расплавах металлургических агрегатов .....	77
4.2.1 Моделирование электромагнитных полей и ОЭМС в ванне ДППТ .....	77
4.2.2 Геометрические характеристики ванны ДППТ .....	79
4.2.3 Геометрия подового электрода .....	82
4.2.4 Воздействие дуги на расплав в условиях ДППТ .....	85
4.2.5 Математическая модель распределения потенциалов и токов в ванне .....	92
4.2.6 Математическая модель распределения магнитного поля в ванне ДППТ .....	98
4.2.7 Объемные электромагнитные силы в ванне .....	103
4.2.8 Циркуляция расплава в ванне ДППТ с осесимметричным подовым электродом.....	107
4.2.9 Математическая модель теплопереноса в ванне ДППТ с учетом ЭВТ .....	117
4.2.10 Математическая модель массопереноса в ванне ДППТ	125
4.3 Разработка математической модели теплового состояния расплава в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок.....	127
4.3.1 Методы воздействия на процессы затвердевания в кристаллизаторе с целью повышения качества слитка .....	127
4.3.2 Основные процессы при затвердевании стали .....	129
4.3.3 Естественные гидродинамические процессы при затвердевании слитка в кристаллизаторе .....	132



4.3.4 Цели моделирования. Основные допущения и ограничения модели .....	135
4.3.5 Математическая модель теплового состояния заготовки в кристаллизаторе при наличии гидродинамических процессов .....	137
4.3.6 Эффективный коэффициент теплопроводности циркулирующего расплава .....	143
4.4 Разработка модели прямой и обратной связи информационных потоков с различных металлургических агрегатов полного цикла производства металла.....	145
4.5 Разработка статистической модели оценки и прогнозирования качества непрерывно-литой заготовки.....	154
4.5.1 Анализ изображения как математическая задача.....	154
4.5.2 Математическая модель для описания изображения серного отпечатка темплета от непрерывно-литой заготовки прямоугольного сечения .....	165
4.5.3 Аналитическое выделение точек и областей пониженной яркости на изображении серного отпечатка темплета непрерывно-литой заготовки.....	174
Заключение .....	179
Список использованных источников .....	180

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяются следующие термины с соответствующими определениями:

- *информация* – коммуникация и связь, в ходе которой устраняется неопределенность (Клод Шеннон);
- *полный информационный поток* – это поток, воздействующий на объект за период его перехода в новое целевое состояние;
- *технологический процесс* – последовательность технологических операций, необходимых для выполнения определенного вида работ;
- *модель* – формализованное представление реального объекта, процесса или явления, выраженное различными средствами: математическим соотношением, числами, текстами, графиками, рисунками, словесным описанием, материальным объектом;
- *математическая модель* – система математических соотношений, описывающих процесс или явление;
- *структурная модель* – условное изображение системы управления;
- *функциональная модель* – описание вычислений в системе, показывающая, каким образом выходные данные вычисляются по входным данным, не рассматривая порядок и способ реализации вычислений. Функциональная модель состоит из набора диаграмм потока данных, которые показывают потоки значений от внешних входов через операции и внутренние хранилища данных к внешним выходам. Функциональная модель описывает смысл операций объектной модели и действий динамической модели, а также ограничения на объектную модель;
- *информационная модель* – это совокупность информации, характеризующая свойства и состояние объекта, процесса или явления или описание моделируемого объекта на одном из языков кодирования информации.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В таблице приведены сокращения принятые в данном отчете о НИР.

*Таблица – Обозначение сокращений, принятых в отчете о НИР*

<i>Сокращение</i>	<i>Расшифровка обозначения</i>
ОАО «ММК»	Открытое акционерное общество «Магнитогорский металлургический комбинат»
ТИ	Технологическая инструкция
ТС	Техническое соглашение
ГОСТ	Государственный стандарт
ОСТ	Отраслевой стандарт
СТП	Стандарт предприятия
СТО	Стандарт отраслевой
ТУ	Технический условия
ТП	Технический протокол
ОЭМС	Объемные электромагнитные силы
ДППТ	Дуговая печь постоянного тока
МНЛЗ	Машина непрерывного литья заготовок
НЛЗ	Непрерывно-литая заготовка
г/к	Горячекатаный
х/к	Холоднокатаный
н/л	Низколегированный
н/у	Низкоуглеродистый
ЭВТ	Электровихревые течения
ВУМ	Высокоуглеродистые материалы
ЭСПЦ	Электросталеплавильный цех
АСУ ТП	Автоматизированные систему управления технологическими процессами

## **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из основных факторов, способствующих повышению эффективности функционирования металлургических агрегатов, является обеспечение оптимальности технологических режимов работы оборудования с использованием автоматизированных систем управления (АСУ). Совершенствование средств информатизации и компьютеризации в системе автоматизированного управления металлургическими производствами обуславливает повышенные требования к математическому, информационному и программному обеспечению АСУ технологическими процессами (ТП).

Качество собранной информации и последующая интеграция позволяют эффективно воздействовать на объект управления и достигать поставленной цели. Одним из результатов эффективного управления ТП считают повышение качества и объемов выпуска готовой продукции.

В области теории и практики АСУ металлургических производств накоплен значительный положительный опыт. Вопросы повышения эффективности управления отражены в трудах зарубежных и российских исследователей. Труды Бутковского А. Г., Растригина Л. А., Сиразетдинова Т. К., Лионса Ш. Л., Ногина В. Д., Девятова Д. Х. и других определили развитие теории управления и методов оптимизации. В области обработки и анализа изображений можно отметить труды Горелика А. Л., Рудакова П. И., Павлидиса Т., Прэтта У., Hall C. F., Hall E. L. и др.

В металлургической промышленности достаточно широко распространены различные технологии использованием больших электрических токов, протекающих через ванну расплава. Типичными примерами являются электрометаллургия, электрошлаковый и вакуумно-дуговой переплав. В этих случаях металлургические расплавы представляют собой высокотемпературные токонесущие жидкости. Их поведение описывается законами магнитной гидродинамики, одно из направлений которой связано с

явлениями, возникающими при взаимодействии проходящего через расплав электрического тока, с его собственным магнитным полем. Эти явления сначала в советской, а далее и в российской научной литературе, получили название «электровихревых течений» (ЭВТ). В их изучение большой вклад внесли Бояревич В.В., Власюк В.Х., Дементьев С.Б., Капуста А.Б., Чайковский А.И., Чудновский А.Ю., Щербинин Э.В., Шилова Е.И. и др.

Наиболее активно ЭВТ изучаются в электролизерах для получения алюминия и в установках электрошлакового переплава, где высокая проводимость расплава сочетается с электрическими токами в десятки килоампер. В последнее время интерес к изучению ЭВТ усилился в связи с появлением дуговых печей постоянного тока (ДППТ), в которых они используются для перемешивания расплава, а в перспективе могут быть применены в качестве эффективного инструмента для целенаправленного управления потоками жидкого металла и воздействия на процессы теплообмена (ТМО). Существенный вклад в изучение ТМО при перемешивании расплава в различных металлургических агрегатах внесли Явойский В.И., Новиков Ю.П., Лисиенко В.Г., Закамаркин М.К., Казаков С.В., Пилюшенко В.Л., Кубланов В.Я. и др.

Основными проблемами действующих информационных систем являются:

- 1) отсутствие системы методов комплексного сбора информации о протекании процессов восстановления чугуна, выплавки полупродукта, доводки стали и ее разлива непрерывным способом;
- 2) отсутствие системы математических моделей для получения информации о процессах расплавления и затвердевания расплава на различных этапах производства металлургической продукции;
- 3) недостаточное формализованное описание производственных многостадийных процессов с учетом их декомпозиции на этапы, выявление и клас-

сификация возможных целей управления, расширение области применения методов оптимизации;

4) отсутствие комплекса пакетов прикладных программ для интеллектуальной поддержки управления металлургическими процессами, выбора новых технологий и конструкций металлургических агрегатов.

**Целью** исследования является создание информационного и математического обеспечения новых комплексных информационных технологий и систем для повышения эффективности управления металлургическими агрегатами.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

– теоретико-информационный анализ агрегатов технологических линий получения металлургической продукции на крупных металлургических предприятиях для определения источников, способов получения и методов обработки информации в АСУ ТП;

– математическое описание процессов тепло- и массопереносов в тонесущих расплавах и кристаллизаторе машин непрерывного литья заготовок, как источников получения информации в ходе вычислительного эксперимента;

– математический анализ изображений серных отпечатков с низкой контрастностью и объектами нерегулярной формы, включающий получение изображения в электронной форме, удаление шумов, сегментацию изображения и классификацию объектов, разработку эргатической подсистемы управления качеством непрерывно-литой заготовки по серному отпечатку темплета.

С увеличением объема и точности информации, получаемой с первого уровня автоматизации промышленных агрегатов, возрастает возможность их использования на последующих уровнях, в целях улучшения качества выпускаемой металлургическими предприятиями продукции. Своевременный автоматизированный анализ показателей приводит к снижению

количества внеплановых ремонтов и уменьшению аварийных ситуаций что очень важно для непрерывного производственного цикла.

Рост точности измерительной аппаратуры и увеличение количества измеряемых параметров приводит к усилению требований по качеству методик обработки и анализа данных с целью получения новых знаний.

Стабильно высокий мировой спрос на качественную металлургическую продукцию мотивирует новые исследования в области качества и снижения брака.

Научная значимость проблемы состоит в следующем:

1. Создание математического обеспечения новых комплексных информационных технологий и систем для повышения эффективности функционирования металлургических агрегатов, включающих:

- создание математических моделей тепловых и гидродинамических процессов, протекающих в ваннах металлургических агрегатов;
- разработка статистических и нейросетевых моделей оценки и прогнозирования качества готовой продукции без снижения производительности.

2. Формирование информационного обеспечения с повышенными свойствами релевантности, своевременности, достоверности адекватности, полученного на основе математического моделирования и вычислительного экспериментов.

При исследовании указанных проблем были использованы методы:

- аналитического и численного решения уравнений Био-Савара-Лапласа, Максвелла, Новье – Стокса;
- статистической обработки и анализа данных с учетом временных трендов;
- системного исследования сложных процессов, функционального моделирования, синтеза и анализа сложных систем;

- аналитического и численного решения уравнений теплопроводности и массопереноса в цилиндрической системе координат с граничными условиями первого и второго рода;
- аналитического и численного решения уравнение теплопроводности с граничными условиями второго и четвертого рода в декартовой системе координат;
- аналитического и численного решения уравнений теплопроводности и массопереноса в цилиндрической системе координат с граничными условиями первого и второго рода;
- распознавания изображений с низкой контрастностью.

Реализация этих методов потребовала использования современных информационных технологии сбора и хранения данных и обработки данных с использованием локальных моделей, программного и технического обеспечения автоматизированных информационных систем.

По результатам исследования выполнено:

- построение системы информационных и функциональных моделей сложных металлургических процессов, которые позволяют выполнить оценку роли элементов металлургического процесса в общей цепочке производства;
- теоретическое обоснование необходимости математического моделирования процессов;
- выделение информационных потоков взаимосвязи между ними при передаче информации между различными переделами металлургического предприятия;
- построение системы математических моделей для исследования сложных металлургических процессов: позволяет провести комплексного теоретическое описание металлургических процессов.



## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

### *1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР*

#### **1.1 Системный анализ полного цикла металлургических процессов (агломерационно-доменное, сталеплавильное и прокатные производства), включающий исследование информационных и материальных потоков процесса**

Использование в практике управления промышленными предприятиями и технологическими процессами системного подхода позволяет учесть множество факторов самого различного характера и найти пути и методы эффективного воздействия на них.

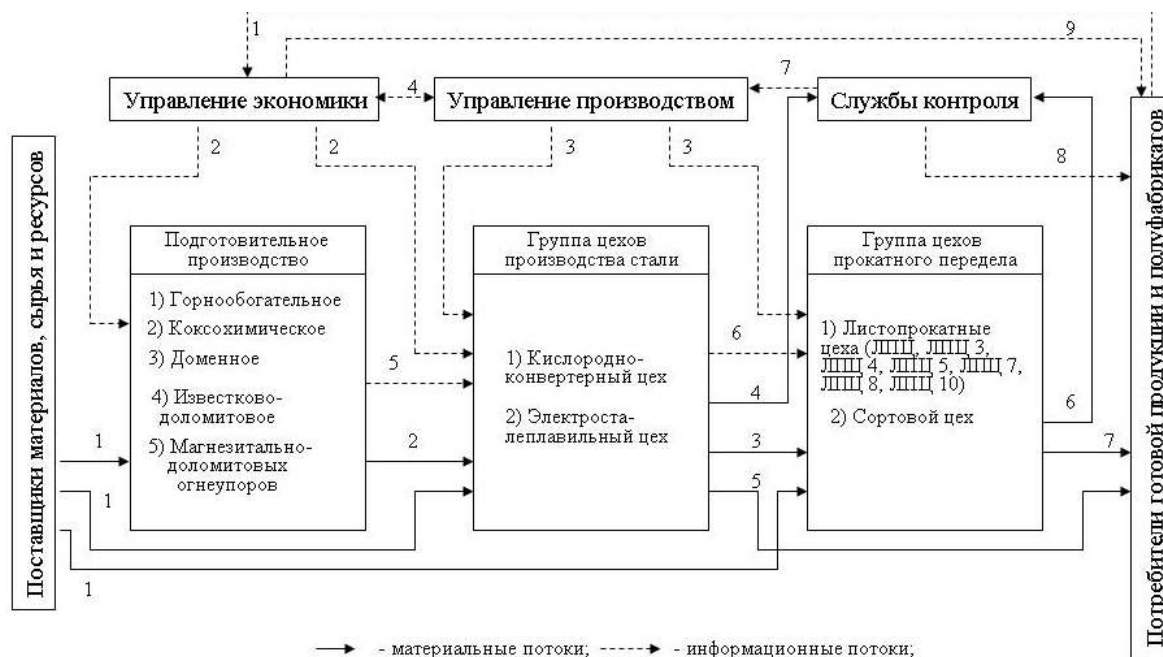
Системный подход позволяет исследовать анализ и синтез сложных объектов с единой системной точки зрения, выявляя важнейшие черты функционирования систем. С его помощью обеспечивается основа для представления внешних и внутренних факторов в виде единого целого и в тоже время дает возможность определить функции подсистем.

Всеми признаками системы обладают агрегаты для непрерывной разливки стали в производственных цехах крупных металлургических предприятий. Для управления такими агрегатами используется информация различной природы. Полноценное использование этой информации позволяет более эффективно организовать управление производством металлургической продукции повышенного качества.

Организационная структура управления может быть построена исходя из системного рассмотрения процессов сбора, передачи и анализа информации для выработки и принятия решений.

Организация технологического процесса требует исследования формирующихся информационных потоков согласно структуре предприятия и его подразделений. На рисунке 1.1 приведена укрупненная структура крупнейшего предприятия металлургической отрасли в России – ОАО

«Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»). На ряду с потоками материальных и энергетических ресурсов все процессы сопровождаются связанными информационными потоками.

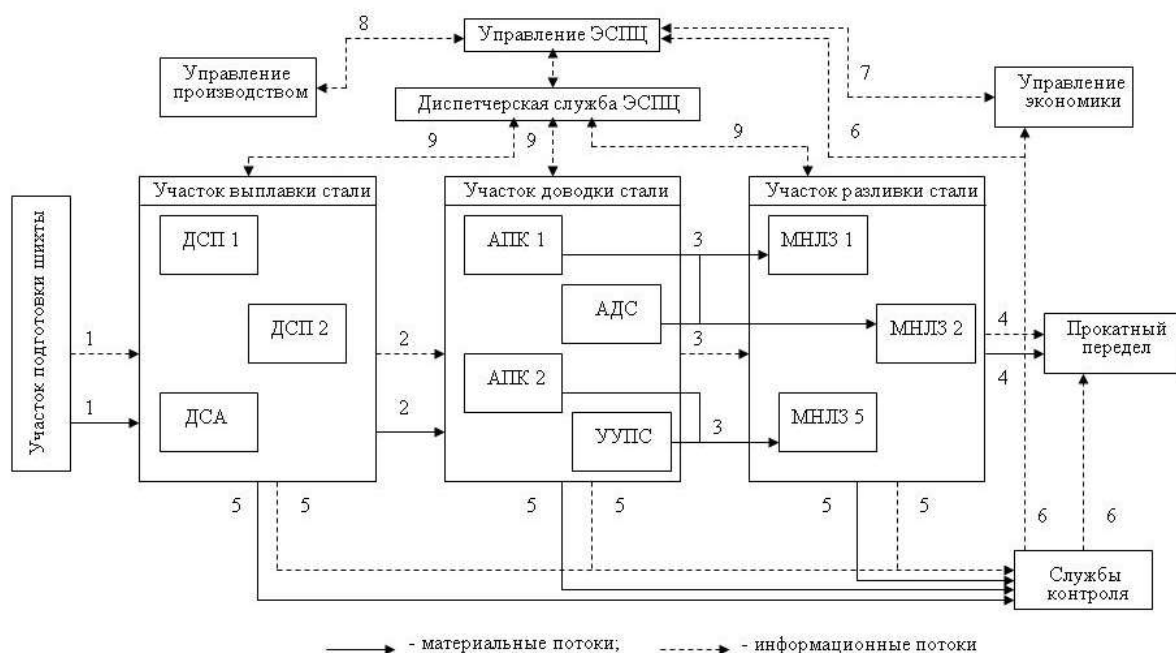


*Рисунке 1.1 – Укрупненная схема материальных и информационных потоков в производстве ОАО «ММК»*

От поставщиков материалов, сырья и ресурсов передаются материалы для всех основных переделов предприятия (1). От подготовительного производства передаются шихтовые материалы для выплавки стали (2). Полупродукт (непрерывно-литая заготовка передается как прокатному переделу (3), так и внешним потребителям в различные страны (5). В службы контроля одновременно передаются технологические пробы химического состава и образцы для контроля качества (4). Цеха листопрокатного передела также передают готовую продукцию потребителям (7) и образцы для контроля качества в службу контроля (6). Все указанные материальные потоки сопровождаются экономической или технологической информацией: 1 – информация о требованиях к заказу по производству металлопродукции; 2 – нормы расходных материалов на производство продукции; 3 – технологические инструкции о ведении металлургических процессов; 4 –

информация о нормах расхода материалов и о требованиях к технологии производства; 5 – информации о качестве шихтовых материалов для выплавки стали; 6 – информация о марке стали и технологических режимах производства; 7, 8 – информация о качестве готовой продукции; 9 – информация о выполнении заказов на производство продукции.

На рисунке 1.2 приведена укрупненная схема информационных и материальных потоков для электросталеплавильного цеха (ЭСЦ) ОАО «ММК». В производственной структуре ЭСЦ можно выделить три основных этапа металлургического передела – выплавка, доводка и разливка стали.



*Рисунок 1.2 – Укрупненная схема материальных и информационных потоков в ЭСЦ ОАО «ММК»*

На рисунке 1.2 введены обозначения: ДСП – дуговая сталеплавильная печь; ДСА – двухванновый сталеплавильный агрегат; АПК – агрегат печь-ковш; АДС – агрегат доводки стали; УУПС – установка усреднительной продувки стали; МНЛЗ – машина непрерывного литья заготовок.

Информационные потоки 7 – 9 на рисунке 1.2 определяют технологию производства и нормы расходов материалов. Информационный поток

6, который формируется в службах контроля (центральная лаборатория контроля и отдел технического контроля) определяет информацию о качестве готовой продукции по отобранным технологическим пробам химического состава (до 12 штук от плавки на различных этапах выплавки и доводки стали) и образцам, по которым выполняется оценка развития внутренних и внешних дефектов непрерывно-литых заготовок.

Все материальные потоки между подразделениями цеха сопровождаются соответствующей информацией (см. таблице 1.1).

*Таблица 1.1 – Обозначения и соответствие информационных и материальных потоков*

<i>Номер потока</i>	<i>Содержание материального потока</i>	<i>Содержание информационного потока</i>
<i>1</i>	<i>Шихтовые материалы для выплавки стали (чугун, металлолом, ферросплавы, шлакообразующие материалы)</i>	<i>Информация о составе и качестве шихтовых материалов для выплавки стали</i>
<i>2</i>	<i>Металл в расплавленном состоянии (плавка) объемом от 160 до 190 т</i>	<i>Информация о химическом составе металла, объеме и температурном режиме</i>
<i>3</i>	<i>Металл в расплавленном состоянии (плавка) объемом от 160 до 190 т</i>	<i>Информация о химическом составе металла, объеме и температурном режиме и расходах ферросплавов</i>
<i>4</i>	<i>Непрерывно-литая заготовка (сортовая заготовка или сляб)</i>	<i>Информация о химическом составе плавки и технологическом режиме разлива</i>
<i>5</i>	<i>Технологические пробы химического состава и поперечные темплеты заготовок</i>	<i>Номер плавки и информация потоков 1 – 4</i>

Вся указанная информация имеет эмпирическую природу и складывается через систему АСУ ТП в хранилище корпоративной информационной системы ОАО «ММК». Часть информации передается посредством

контролирующих приборов – информация о технологических и температурных режимах. Информация о качестве заготовок передается в хранилище после визуальной экспертной оценки с автоматизированных рабочих мест производственных лабораторий.

Несмотря на различную природу информации, которая используется в производственных цехах и лабораториях, вся она является эмпирической. На основе такой информации возможно исследование технологических процессов по принципу «черного ящика» без обоснования причинно-следственных взаимосвязей процессов, способствующих образованию дефектов в непрерывно-литой заготовке. Основным идентификатором информационных структур – это номер плавки, присваиваемой на этапе выплавки. Информация по остальным переделам надстраивается по мере прохождения плавки всех производственных участков (см. рисунок 1.3).



*Рисунок 1.3 – Информационные пирамиды информационных потоков в ЭСПЦ ОАО «ММК»*

На рисунке 1.3 справа показана пирамида аналитической информации, сопровождающая эмпирическую на каждом из этапов передела.

При тщательном исследовании процессов, протекающих при производстве стали, для повышения качества продукции необходимо сопровож-

дать эмпирическую информацию результатами аналитических исследований. Эти исследования позволяют дать качественную и количественную характеристику сложных процессов, таким как формирование тепловых полей в жидком расплаве и затвердевающей заготовке, гидродинамики расплавленного металла. Исследование этих процессов в реальных условиях металлургического производства в большей степени провести невозможно по причинам:

- 1) высоких температур исследуемых объектов (расплав и заготовка);
- 2) недоступности областей измерения с технологической точки зрения;
- 3) высоких материальных затрат на закупку специализированных приборов при их существовании.

Указанные причины приводят к тому, что эти процессы изучаются на основе результатов математического моделирования. На рисунке 1.4 показана схема использования эмпирической и аналитической информации.

На рисунке 1.4 введены обозначения: НИЛ – научно-исследовательская лаборатория; АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом.

Слияние информации различной природы позволяет не только исследовать локальные закономерности отдельных технологий, но синтезировать целостную картину о причине образования внутренних дефектов, продемонстрировать их вероятностную природу и оценить риски их образования.

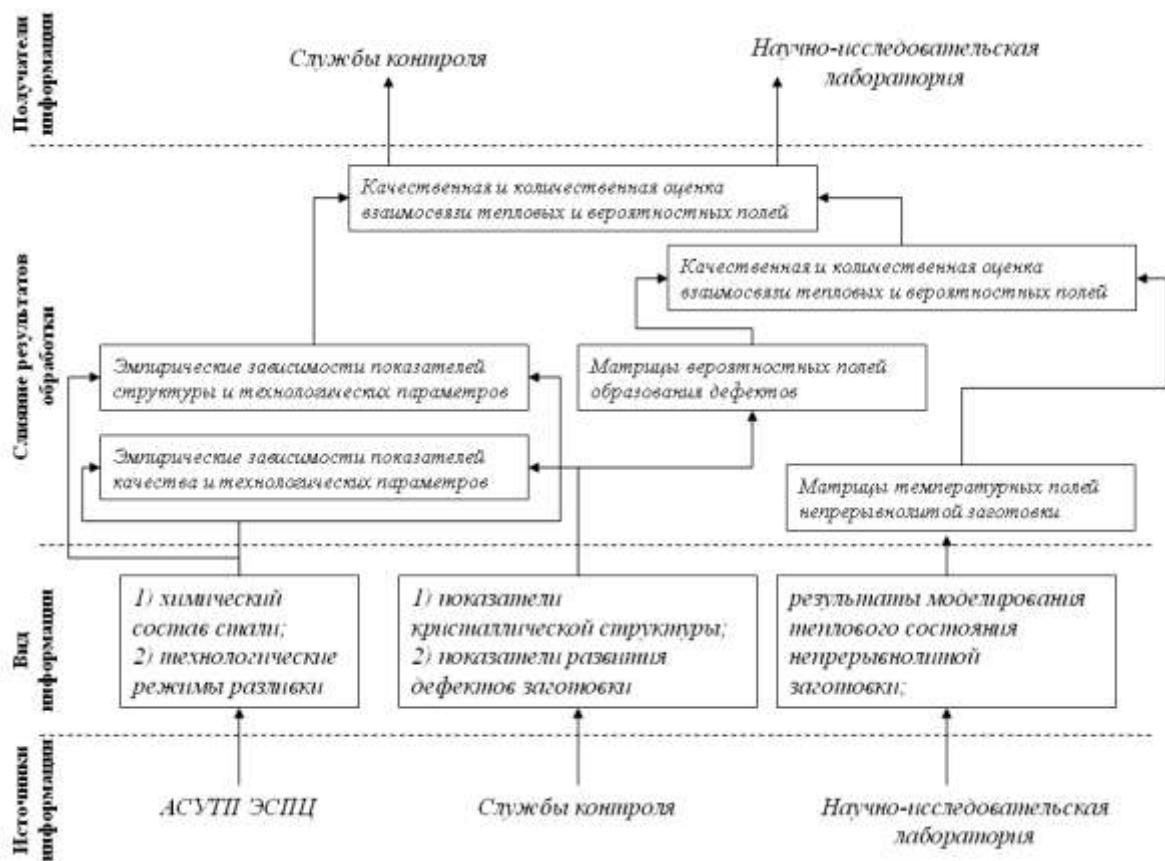


Рисунок 1.4 – Схема использования информационных потоков при решении задачи управления качеством непрерывно-литой заготовки

Таким образом, в результате исследования информационных потоков металлургического предприятия и применения к ним системного подхода:

- 1) продемонстрирована эмпирическая природа информации, которая используется в настоящее время при описании работы действующего промышленного предприятия, на примере ОАО «ММК»;
- 2) показана недостаточность эмпирических исследований локальных процессов для прогнозирования и управления качеством непрерывно-литой заготовки;
- 3) определена структура информации и взаимосвязь информационных потоков, которые определяют информационное обеспечение систем, целью которых является повышение результативности решений при управлении крупными металлургическими предприятиями.

## **1.2 Разработка математического обеспечения управления информационными потоками сбора, обработки и хранения информации**

При исследовании сложных систем и производств, каким является непрерывная разливка стали, существенную роль играют методы системного анализа, совокупность которых позволяет формализовать многие проблемы такие как задачи принятия решений. Результатом системного анализа является, как правило, выбор альтернативы, параметров конструкции, системы, структуры систем управления и т.п.

В последние годы объектом пристального внимания в области искусственного интеллекта являются онтологии. Их используют при разработке программных средств (в том числе систем, основанных на знаниях) как часть результата деятельности аналитика. Они обеспечивают повторную используемость информации и обеспечивают уточнение смысла терминов, с помощью которых передается некоторая информация. На их основе (с их помощью) могут формироваться базы знаний для решения различных интеллектуальных систем, в частности, экспертных систем.

В настоящее время довольно актуальной является проблема теоретического обоснования построения технологий и их математического моделирования в различных предметных областях. Не исключением являются технологии и процессы черной металлургии, в частности, непрерывной разливки стали. Решение указанных проблем возможно при проведении онтологического анализа предметной области с точки зрения ее функционирования и формализации.

В результате проведения онтологических исследований по стандарту IDEF5 было получено:

- 1) словарь основных терминов, которые необходимо использовать при построении функциональной и математической модели процесса;



2) диаграммы строгой классификации объектов предметной области для отображения логических правил взаимодействия этих объектов;

3) диаграмма состояния основного объекта (расплав – заготовка) при переходе в различные состояния при непрерывной разливки стали.

Словарь основных терминов является довольно обширным, основными среди них для задачи оптимизации охлаждения непрерывно-литой заготовки следует считать:

– непрерывная разливка стали [continuous casting] – разливка металла на специальных агрегатах (МНЛЗ) в водоохлаждаемую изложницу-кристаллизатор, сочетает непрерывное поступление жидкого металла с непрерывным вытягиванием формирующегося непрерывного слитка из кристаллизатора. Характерным для непрерывной разливки является производство непрерывно-литых заготовок, приближенных по размерам сечения к размеру сечения готовой катанной продукции, что позволяет исключить предварительную деформацию слитков на обжим [1, с. 125];

– непрерывно-литая заготовка (НЛЗ) [conticast billet] – слиток, вытягиваемый при непрерывной разливке металла, используемый в качестве заготовки для прокатки сортового проката и труб [2, с. 147];

– машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) [CCM (continuous casting machine (caster))] – агрегат непрерывной разливки, в котором идет процесс кристаллизации жидкого металла и формирования литой заготовки (иногда наз. слитком). Основные технологические узлы МНЛЗ: стенд для установки сталеразливочного ковша и его перемещения в рабочее положение; разливочное устройство или промежуточный ковш, обеспечивающий непрерывную подачу жидкой стали в один или несколько кристаллизаторов; кристаллизатор с механизмом движения, в котором формируется твердая оболочка непрерывно-литой заготовки необходимой толщины и прочности; зона вторичного охлаждения поверхности непрерывно-литой заготовки водой или водовоздушной смесью, а также за счет тепло-

излучения на воздухе до полного затвердевания металла с поддерживающей системой; тянущее или правильно-тянущее устройство в сочетании с приводными роликами поддерживающей системы вторичного охлаждения для вытягивания непрерывно-литой заготовки с заданной линейной скоростью и разгибом радиальной и криволинейной ее части в горизонтальное положение; устройство для разделения непрерывно-литой заготовки на мерные части; транспортные средства для передачи мерных заготовок на склад или в нагревательные средства (печи) прокатного стана для прямой прокатки или прокатки с горячего всада [2, с. 286];

– зоны вторичного охлаждения (ЗВО) [secondary cooling zone] – участок по технологической оси ручья МНЛЗ от кристаллизатора до клетки тянущего устройства, на котором расположены поддерживающие и охлаждающие системы. Поддерживающая система ЗВО удерживает непрерывный слиток соосно с технологической осью кристаллизатора и препятствует деформации оболочки (корки) слитка под действием ферростатического давления [2, с. 161];

– кристаллизатор (крист.) [mold] – водоохлаждаемая форма (изложница) для ускорения затвердевания жидкого металла; применяется на МНЛЗ, в установках электрошлакового переплава, в вакуумных дуговых печах. Конструкции кристаллизатора весьма многообразны. Так, корпус МНЛЗ кристаллизатора представляет литую или сварную конструкцию с опорным устройством (приставкой в виде брусьев, решеток, опорных роликов и др.), на котором закреплены водоохлаждаемые стенки кристаллизатора из высокотеплопроводного металла (как правило, меди или сплавов на ее основе), непосредственно контактирующие с поступающим в кристаллизатор жидким металлом. Кристаллизаторы МНЛЗ снабжены механизмами качения для придания им возвратно-поступательные движения или возвратно-поворотные движения (для заготовок круглого сечения) в процессе разливки [2, с. 243];

– промежуточный ковш (пром. ковш) [tundish] – к. небольшого объема для регулирования скорости разливки металла из основного разливочного ковша, устанавливается между разливочным ковшом и формой, изложницей или кристаллизатором [2, с. 213];

– поворотный стенд (повор. стенд) – оборудование для быстрой смены ковшей. Современные УНРС оборудуют поворотными и иногда передвижными стендами, которые удерживают во время разливки сталеразливочный ковш над промежуточным и обеспечивают быструю замену ковшей при разливке методом «плавка на плавку» [3, с. 578];

– машина газовой резки – устройство для резки слитка на куски определенной длины (заготовки) представляет собой газорезку и реже гидравлические ножницы. Газорезка – это подвижная тележка, снабженная двумя газокислородными резаками, которые при резке перемещаются поперек слитка, а сама газорезка при этом движется вместе со слитком, сцепляясь с ним перед началом резки пневматическими захватами. Иногда синхронизацию перемещения газорезки со слитком осуществляют электрорегулирующим устройством. После окончания резки газорезка возвращается в исходное положение, после чего цикл повторяется [3, с. 578];

– качество продукции [product quality] — совокупность свойств металлургии, продукции, обусловленное ее способностью удовлетворять определенные требования в соответствии с ее назначением. При этом качество продукции охватывает не только потребительские, но и технологические свойства продукции. Свойства, составляющие качество продукции, характеризуются непрерывными или дискретными величинами, называемые показателями качества продукции, которые должны иметь количественный измеритель [193, с. 201]. Качество внутренней структуры непрерывнолитого слитка определяется множеством факторов, которые в значительной степени замыкаются на протяженности жидкой фазы, функционально связанной с толщиной слитка и скоростью литья [4, с. 431];

– обжатие (сист. обжат.) [reduction] – 1. Уменьшение высоты или поперечного сечения обрабатываемого материала при его формоизменении рабочим инструментом, основное действие над металлом в ряде процессов обработки давлением. 2. Количественная мера деформации тела в направлении уменьшения его высоты или поперечного сечения [2, с. 363];

– охлаждение (сист. охлаж.) [cooling] – 1. Естественный или принудительный, отвод теплоты от какого-либо тела или его части. 2. Естественное или принудительное снижение температуры какого-либо тела или его части [2, с. 392];

– расплав [melt] – вещество (металл, соль, шлак), нагретое выше температуры плавления и находящееся в жидком состоянии [1, с. 130];

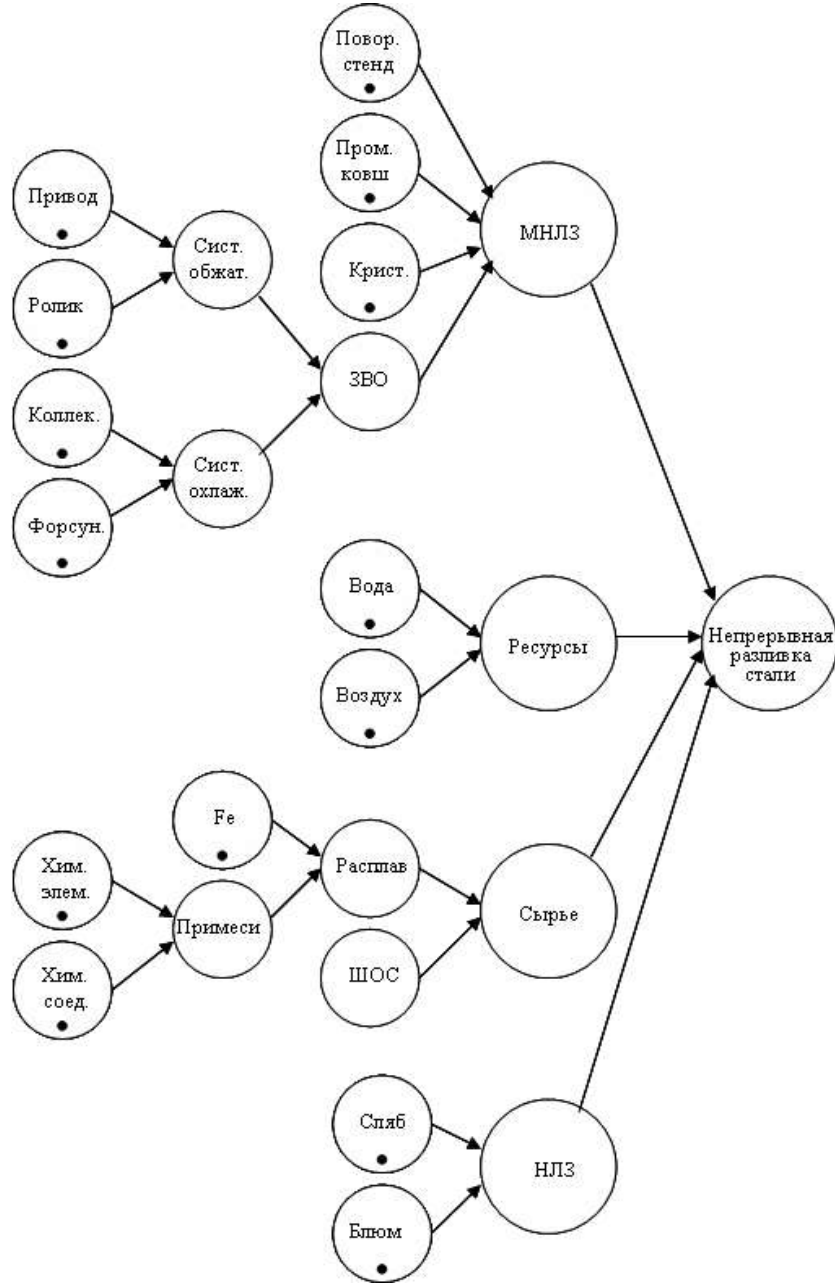
– примеси [impurities] – 1. Химические элементы, которые вводятся в сплав специально и присутствуют в нем в необходимых количествах. В соответствии с предложенной акад. Н.Т. Гудцовым классификация примеси в стали разделяются на четыре группы: постоянные, скрытые, случайные и легирующие [1, с. 83];

– шлакообразующая смесь – предназначены для выполнения целого комплекса важных технологических функций: защиты зеркала металла от тепловых потерь и вторичного окисления, ассимиляция неметаллических включений, обеспечение смазки между сталью и стенками кристаллизатора, оптимизация уровня горизонтальной теплопередачи для разливаемой марки стали [4, с. 452];

– сляб [slab] – полуфабрикат, представляющий стальную заготовку прямоугольного сечения с большим отношением ширины к высоте (до 15), используется для производства листового проката [1, с. 190];

– блюм [blum] – полупродукт металлургии, производства в виде стальной заготовки квадратного сечения, прокатанной из слитка на блюминге (со стороной 140 – 450 мм) или получаемой на МНЛЗ (со стороной > 100 мм) [2, с. 46].

На рисунке 5.1 приведена диаграмма строгой классификации основных объектов для организации процесса непрерывной разливки стали при рассмотрении задач математического моделирования и оптимизации теплового состояния заготовки.



*Рисунок 1.5 – Диаграмма строгой классификации основных объектов для организации процесса непрерывной разливки стали при рассмотрении задач математического моделирования и оптимизации теплового состояния заготовки*

Следует отметить, что полная диаграмма выбранной предметной области является гораздо обширнее. На рисунке 1.5 включен механизм для логической систематизации знаний, накопленных при изучении одного из этапов охлаждения заготовки в ЗВО.

В ходе непрерывной разливки стали расплав передается по основным операциям, которые реализованы на МНЛЗ любой конструкции. К таким основным технологическим операциям следует отнести:

- подачу металла в промежуточный ковш для поддержки уровня расплава, переходящего в кристаллизатор МНЛЗ;
- охлаждение расплава в кристаллизаторе, в котором формируется затвердевшая оболочка толщиной от 20 до 30 мм и форма заготовки;
- охлаждение заготовки в ЗВО, при котором происходит полное затвердевание заготовки и формируется ее качество;
- резка заготовки на мерные длины для получения слябов или блюмов, в зависимости от вида МНЛЗ), и отбор темплетов для оценки качества заготовки.

Последовательность технологических этапов и состояний стали приведено на рисунке 1.6.

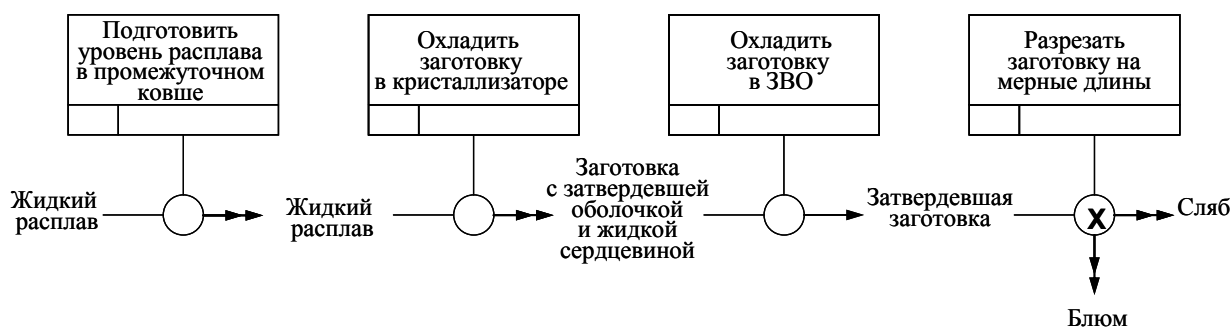


Рисунок 1.6 – Диаграмма состояния расплава при непрерывной разливки стали

### 1.3 Разработка структурной модели сбора, первичной обработки и хранения структурированной информации, поступающей с металлургических агрегатов

Разработка онтологии предметной области позволила получить классификационную структуру, которая положила основу функционального моделирования производства стали. На рисунке 1.7 приведена контекстная диаграмма для процесса получения стальных заготовок и на рисунке 1.8 – разбивка на основные этапы производства. Каждая из диаграмм включает материальные и информационные потоки, сопровождающие технологические процессы.

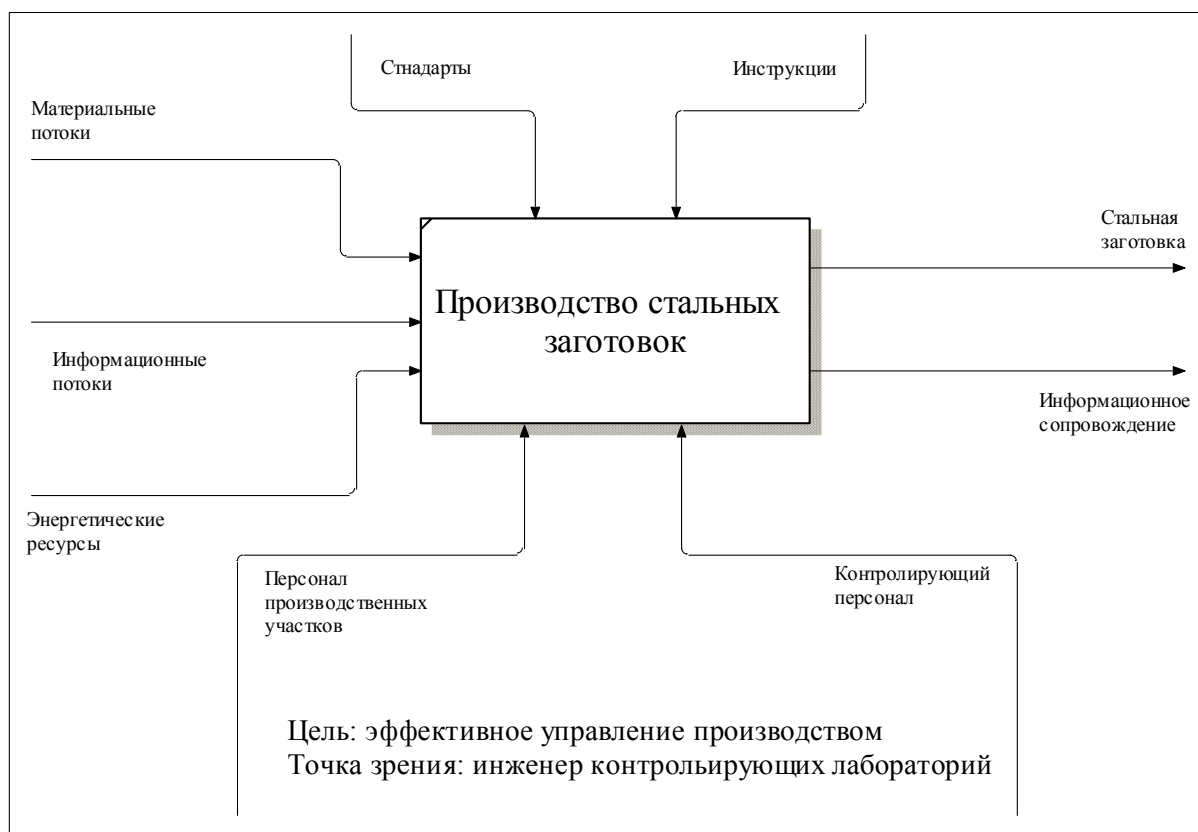
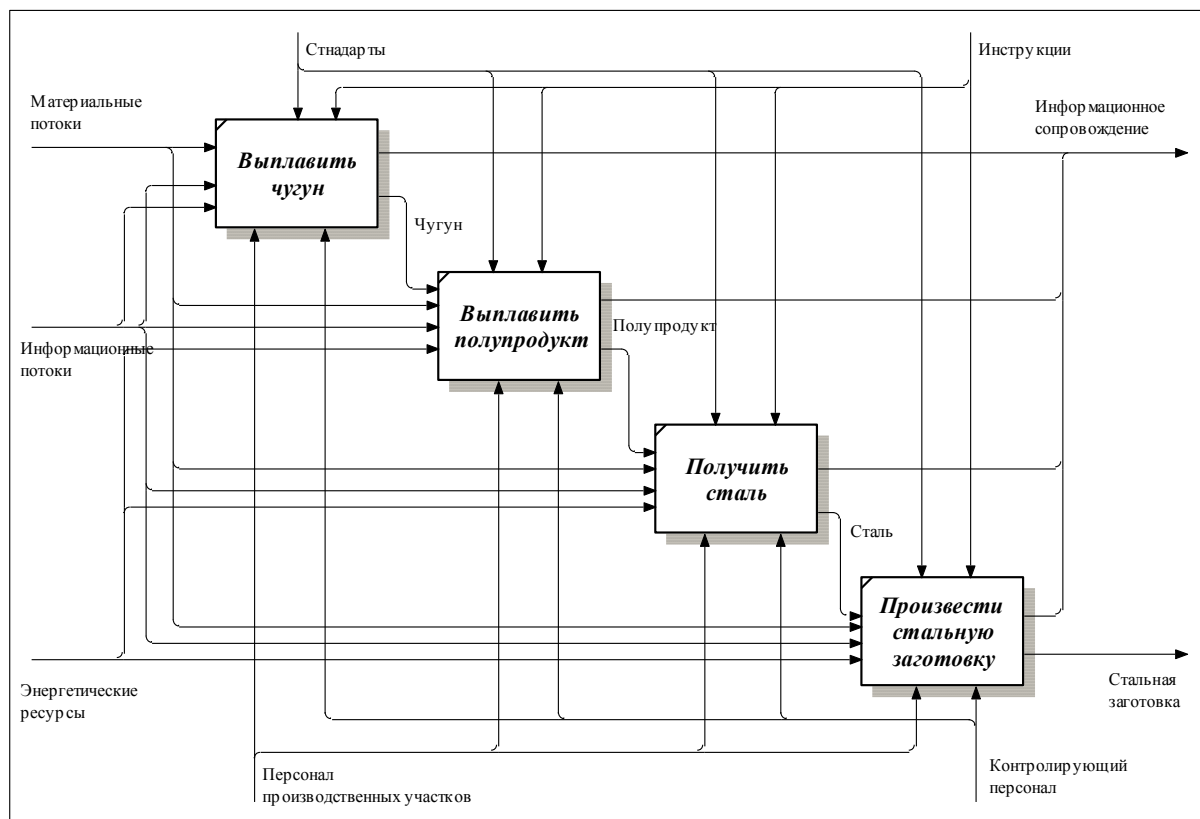


Рисунок 1.7 – Контекстная диаграмма А0 верхнего уровня для проекта «Производство стальных заготовок»

Каждый из этапов, приведенных на рисунке 1.8 имеет сложную структуру и реализуется в различных подразделениях металлургического предприятия. При производстве стальных заготовок выплавка чугуна про-

изводится в доменном цехе. В условиях ОАО «ММК» в настоящее время функционирует 8 доменных печей. Выплавка полупродукта для большинства предприятий выполняется либо в кислородном конвертере либо в электродуговых печах, либо в двухваннах сталеплавильных агрегатах.

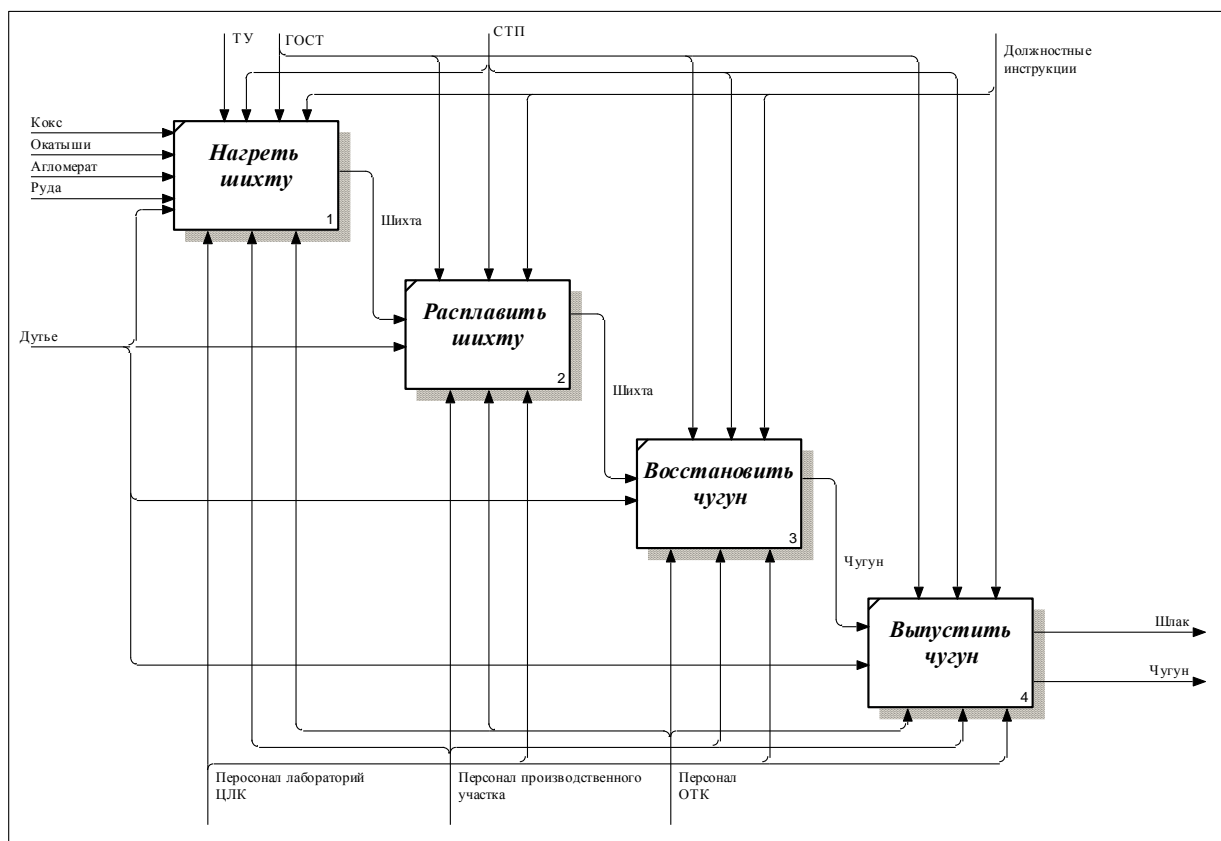


*Рисунок 1.8 – Диаграмма декомпозиции функциональной модели проекта «Производство стальной заготовки» (основные этапы производства)*

Полученный полупродукт необходимо довести до заданного химического состава и температуры, что выполняется на агрегатах доводки стали и только после этого выполняется разливка металла в заготовки, чаще всего непрерывным способом. Эта технология характерна не только для получения стальных заготовок. Аналоги всех указанных агрегатов присутствуют и при получении заготовок цветных и редких металлов.

Выполним уточнение и декомпозицию каждого из приведенных этапов.





*Рисунок 1.9 – Диаграмма декомпозиции функциональной модели проекта «Производство стальной заготовки» (этап получения чугуна в доменной печи)*

На каждом из приведенных этапов все материальные потоки сопровождаются информационным обеспечением. Для них приводятся сведения:

- кокс, окатыш, агломерат, руда – фракционный состав, химический состав и механические свойства;
- дутье – содержание  $O_2$ , давление в системе, расход дутья, температура дутья;
- чугун и шлак – химический состав, режимы выплавки чугуна.

Для полученной продукции не назначается идентификационных номеров, которые бы переходили на все остальные переделы.

В таблице 1.2 приводятся основные документы, которыми руководствуются при получении чугуна в доменной печи.

Таблица 1.2 – Перечень документации, используемой при получении чугуна в доменной печи

<i>Номер</i>	<i>Обозначение документа</i>	<i>Наименование документа</i>
1	ТУ 14-1-01-93	Окатыши железорудные АО Михайловский горно-обогатительный комбинат
2	ТУ 92 РК-00186789-37-95	Окатыши железорудные офлюсованные Соколовского горно-обогатительного производственного объединения поставляемые на экспорт
3	ГОСТ 15054-80	Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Методы отбора проб для химического анализа и определения содержания влаги
4	ГОСТ 7565-81	Чугун, сталь и сплавы. Метод отбора проб для определения химического состава.
5	ГОСТ 805-95	Чугун передельный. Технические условия.
6	СТП 101-27-87	Чугун передельный жидкий для мартеновских печей
7	СТП 14-101-206-98	Кокс кусковой

На рисунках 1.10 и 1.11 приведены диаграммы декомпозиции функциональной модели проекта «Производство стальной заготовки» для этапов получения полупродукта в электродуговых печах и на участке доводки стали в агрегатах печь-ковш.

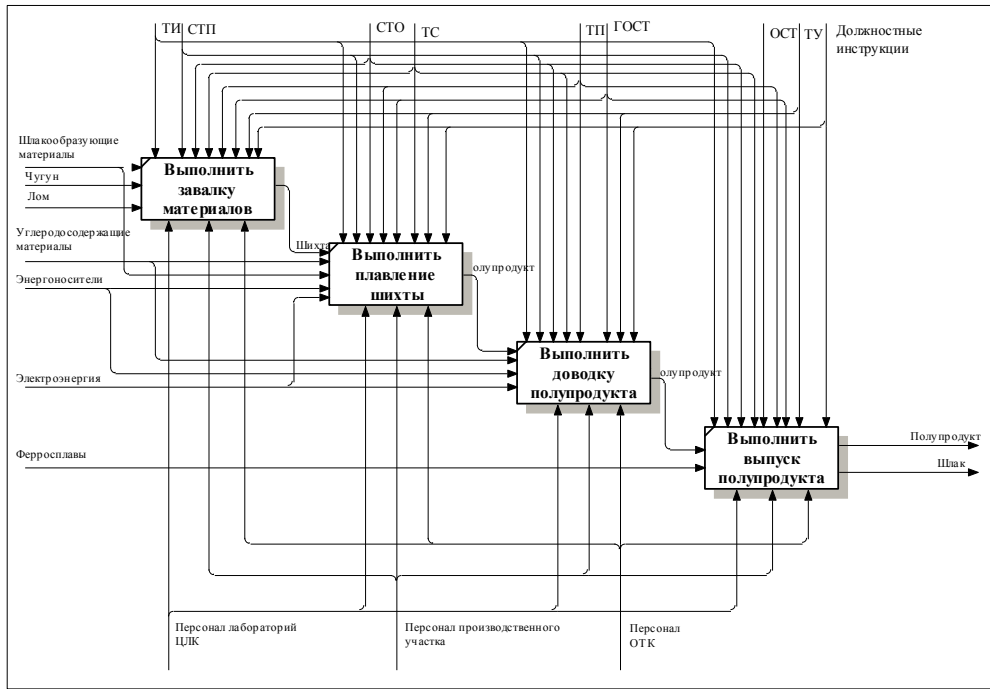


Рисунок 1.10 – Диаграмма декомпозиции функциональной модели проекта «Производство стальной заготовки» (этап получения полупродукта в электросталеплавильной дуговой печи переменного тока )

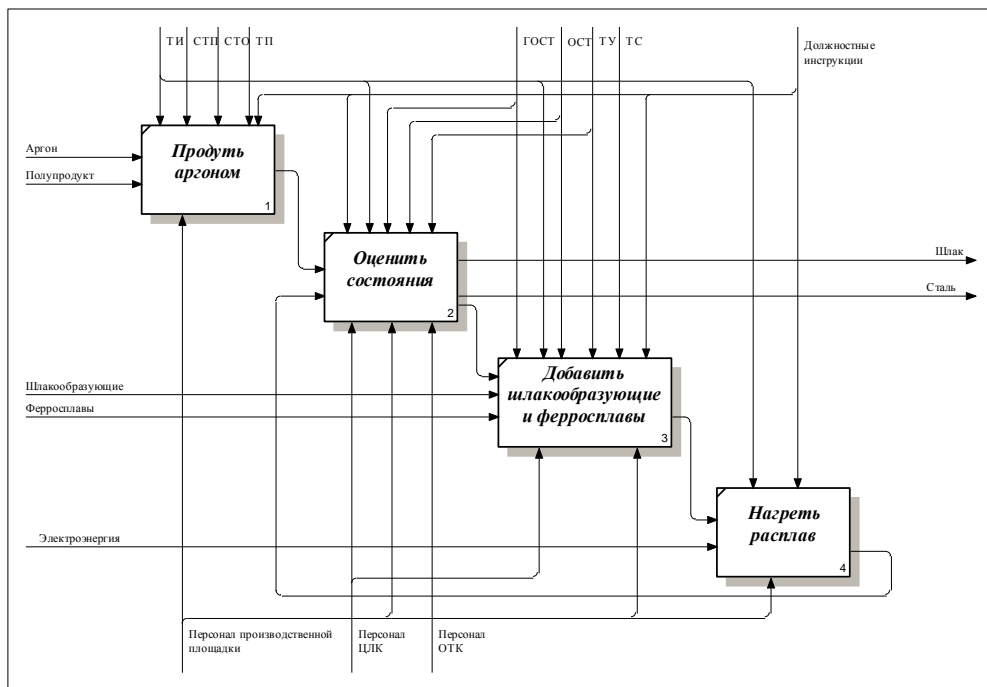


Рисунок 1.11 – Диаграмма декомпозиции функциональной модели проекта «Производство стальной заготовки» (этап получения стали в агрегате печь-ковш)

В таблице 1.3 приводятся основные документы, которыми руководствуются при полупродукта в дуговой печи и в агрегате печь-ковш.

*Таблица 1.3 – Перечень документации, используемой при получении стали на участках выплавки и доводки*

<i>Номер</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Наименование документа</i>	<i>Срок действия</i>
1	СТП ММК 375-2002	Прокат стальной для судостроения. Технические условия	17.01.2002 без огран.
2	СТО АСЧМ 7-93	Прокат периодического профиля из арматурной стали	01.01.94 01.01.10
3	СТО ММК 191-2008	Прокат горячекатаный сортовой и фасонный из конструкционной стали	01.04.09 без огран.
4	СТО ММК 365-99	Прокат горячекатаный из сварных труб	05.06.99 без огран.
5	СТП ММК 2265-2004	Заготовка непрерывно-литая	25.06.04 без огран.
6	СТО ММК 36-2000	Прокат холоднокатаный из углеродистой стали обыкновенного качества	25.05.00 без огран.
7	СТО ММК 177-2000	Прокат горячекатаный толстолистовой из углеродистой стали	01.11.00 без огран.
8	СТО ММК 344-2006	Прокат горячекатаный из конструкционной стали	15.09.06 без огран.
9	СТО ММК 223-2007	Известь	20.12.07 без огран.
10	СТП 101-44-1998	Кокс для сталеплавильного производства. Технические условия	10.11.98 без огран.
11	СТО ММК 238-2000	Прокат полосовой г/к из низкоуглеродистой стали марок ДД11, ДД12, ДД13, ДД13	01.01.01 без огран.
12	СТО ММК 179-2006	Прокат тонколистовой х/к их низкоуглеродистой стали	01.06.06 без огран.
13	СТП ММК 268-2005	Катанка для стержней электродов с покрытием	01.07.06 без огран.
14	СТП ММК 269-2005	Катанка для стержней электродов с покрытием	01.07.06 без огран.

<i>Номер</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Наименование документа</i>	<i>Срок действия</i>
15	СТО ММК 209-2006	Прокат г/к из конструкционной стали	20.11.06 без огран.
16	СТП ММК 253-2002	Заготовка НЛ прямоуг. Для переката в металлопрокат неотвественного назначения	30.01.02 без огран.
17	СТП ММК 352-2004	Прокат г/к углеродистой качественной стали общего назначения	20.02.07 без огран.
18	СТО ММК 219-1999	Лента х/к из мягкой нелегированной стали. Технические условия	15.06.99 без огран.
19	СТО ММК 350-1999	Прокат г/к толстолистовой из углеродистой качественной стали	01.10.99 без огран.
20	СТО ММК 289-2008	Прокат г/к толстолистовой из углеродистой стали	02.06.08 без огран.
21	СТО ММК 242-2000	Прокат г/к листовой и рулонный из углеродистой качественной и н/л стали для электросварных труб	01.12.2000 без огран.
22	ТС 14-101-656- 2007	Прокат листовой из стали марок 12ГСБ для толстостенный газовых труб	25.05.07 без огран.
23	ТС 14-101-577- 2005	Катанка из легированной стали марки Св08ХМ для изготовления сварочной проволоки	23.08.95 без огран.
24	ТП 14-101-662- 2007	Катанка и прокат круглого сечения для производства холоднодеформированной арматуры класса В 500 С	06.08.07 без огран.
25	ТС 14-101-384- 1997	Лента холоднокатаная из стали марки 15 ХГЮА для колец подшипников	01.04.97 без огран.
26	ТП 14-101-617- 2006	Прокат рулонный г/к из стали марки 22 ГЮ для электросварных обсадных труб	24.10.06 без огран.
27	ТС 14-101-180- 1993	Лента холоднокатаная из стали марки 45	29.07.93 без огран.
28	ТС 14-101-542- 2004	Прокат круглый для мелющих шаров	17.02.04 без огран.

<i>Номер</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Наименование документа</i>	<i>Срок действия</i>
29	ТС 14-101-580-2007	Катанка из углеродистой стали для дальнейшего переката	25.05.07 без огран.
30	ТС 14-101-581-2005	Катанка для изготовления проволоки, предназначенной для производства саморезов	08.11.05 без огран.
31	ТС 14-101-671-2007	Прокат г/к сортовой полосовой из стали марки 50ХГ для рессор	01.10.07 без огран.
32	ТС 14-101-627-2007	Прокат листовой г/к из низколегированной стали марки 09Г2С	09.02.07 без огран.
33	ТС 14-101-598-2006	Прокат сортовой г/к круглый для изготовления мелющих шаров	10.04.06 без огран.
34	ТС 14-101-599-2008	Прокат первого профиля в мотках для армирования железобетонных конструкций	13.02.08 без огран.
35	ТС 14-101-618-2006	Прокат сортовой г/к круглого сечения из качественной конструкционной стали	08.11.06 без огран.
36	ТС 14-101-621-2006	Катанка диам. 6,5 – 9 мм и прокат круглого сечения диам. 10 – 18 мм для производства высокоуглеродистой стабильной арматурной проволоки	17.11.06 без огран.
37	ТС 14-101-631-2006	Катанка из легированной стали марки СВ08Г2С для изготовления сварной проволоки	11.12.06 без огран.
38	ТС 14-101-623-2006	Прокат листовой г/к из низколегированной стали марки 10ХСНД	29.11.06 без огран.
39	ТС 14-101-642-2006	Катанка из высокоуглеродистой стали для производства хлопковязанной ленты	01.01.07 без огран.
40	ТС 14-101-643-2006	Прокат г/к полосовой из стали марки 20ХГСНМ	01.01.07 без огран.
41	ТС 14-101-675-2006	Катанка из углеродистой стали для производства проволоки с механическим удалением окалины	01.11.07 без огран.
42	ТС 14-101-679-	Катанка из легированной стали	24.12.07

Продолжение таблицы 1.3

<i>Номер</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Наименование документа</i>	<i>Срок действия</i>
	2007	для изготовления проволоки, предназначенной для производства саморезов	без огран.
43	ТС 14-101-694-2008	Катанка и прокат круглого сечения для производства холоднодеформированной арматуры класса В500С	20.06.08 без огран.
44	ТС 14-101-692-2008	Катанка и прокат круглого сечения в мотках	01.04.08 без огран.
45	ТС 14-101-678-2008	Катанка и прокат круглого сечения сорбитизированные	14.02.07 без огран.
46	ТС 14-101-739-2009	Прокат сортовой горячекатаный круглого сечения из стали марки 08	20.08.09 без огран.
47	ТС 14-101-749-2009	Прокат горячекатаный сортовой полосовой для рессор	11.08.09 без огран.
48	ТС 00187240-013-2009	Проволока термически обработанная для упаковки	14.08.09 без огран.
49	ТС 14-101-712-2008	Прокат сортовой г/к круглого сечения из высококачественной стали марки 18ЮА	01.01.09 без огран.
50	ТС 14-101-713-2008	Катанка из н/у стали марки С4С диаметром 5,5 мм и 6,5 мм	01.01.09 без огран.
51	ГОСТ 9045-93	Прокат тонколистовой х/к из низкоуглеродистой качественной стали для холодной штамповки	01.01.97 без огран.
52	ГОСТ 2246-70	Проволока стальная сварочная	01.01.73 без огран.
53	ГОСТ 5520-79	Прокат листовой из углеродистой, низколегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением	01.01.80 без огран.
54	ГОСТ 2284-79	Лента холоднокатаная из углеродистой конструкционной стали	04.01.79 без огран.
55	ГОСТ 535-2005	Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой	01.01.08 без огран.

<i>Номер</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Наименование документа</i>	<i>Срок действия</i>
		обыкновенной стали	
56	ГОСТ 5781-82	Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций	01.07.83 без огран.
57	ГОСТ 14959-79	Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали	01.01.81 без огран.
58	ГОСТ 10884-94	Сталь арматурная термомеханическая упрочненная для железобетонных конструкций	17.10.94 без огран.
59	ГОСТ 4543-71	Сталь легированная конструкционная	01.01.73 без огран.
60	ГОСТ 10702-78	Прокат из качественной конструкционной углеродистой и легированной стали для холодного выдавливания и высадки	01.01.80 без огран.
61	ГОСТ 1050-88	Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали	01.01.91 без огран.
62	ГОСТ 380-2005	Сталь углеродистая обыкновенного качества	01.01.05 без огран.
63	ГОСТ 14637-89	Прокат толстолистовой из углеродистой стали обыкновенного качества	01.01.91 без огран.
64	ГОСТ 5521-93	Прокат стальной для судостроения	15.04.93 без огран.
65	ГОСТ 20072-74	Сталь теплоустойчивая	01.01.76 без огран.
66	ГОСТ 2787-75	Металлы черные вторичные	01.07.77 без огран.
67	ГОСТ 6713-91	Прокат низколегированный конструкционный для мостостроения	01.07.92 без огран.
68	ГОСТ 1577-93	Прокат толстолистовой и широкополосный из	01.01.97 без огран.



<i>Номер</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Наименование документа</i>	<i>Срок действия</i>
		конструкционной качественной стали	
69	ГОСТ 19281-89	Прокат из стали повышенной прочности	01.01.91 без огран.
70	ГОСТ 5950-2000	Прутки, полосы, мотки из инструментальной стали	22.06.00 без огран.
71	ГОСТ 4041-71	Прокат листовой для холодной штамповки из конструкционной качественной стали	01.01.76 без огран.
72	ГОСТ 1414-75	Прокат из конструкционной стали высокой обрабатываемости резанием	01.01.77 без огран.
73	ГОСТ 30136-95	Катанка из углеродистой стали обыкновенного качества	10.10.95 без огран.
74	ГОСТ 3560-73	Лента стальная упаковочная	01.01.75 без огран.
75	ГОСТ 17066-94	Прокат тонколистовой из стали повышенной прочности	01.01.97 без огран.
	ГОСТ 4728-96	Заготовки осевые для подвижного состава железный дорог колеи 1520 мм	01.01.98 без огран.
76	ОСТ 14-1-235-91	Сталь. Методы контроля макроструктуры НЛЗ для производства сортового проката	01.01.92 без огран.
77	ГОСТ 27772-88	Прокат для строительных стальных конструкций	01.01.89 без огран.
78	ГОСТ 13345-85	Жесть	01.01.87 без огран.
79	ГОСТ 16523-97	Прокат тонколистовой из углеродистой стали качественной и обыкновенного качества	04.04.99 без огран.
80	ГОСТ Р 52544-06	Прокат арматурный свариваемый периодического профиля классов А 500С и В 500С для армирования	17.05.06 без огран.
81	ГОСТ 803-81	Прокат полосовой г/к для плакирования из углеродистой качественной и высококачественной стали	01.01.83 без огран.

<i>Номер</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Наименование документа</i>	<i>Срок действия</i>
82	ГОСТ 295-98	Алюминий для раскисления, производства ферросплавов и алюмотермии	01.07.01 без огран.
83	ГОСТ 859-01	Медь	03.01.02 без огран.
84	ГОСТ 1415-93	Ферросилиций	01.01.97 без огран.
85	ГОСТ 5905-04	Хром металлический	01.07.05 без огран.
86	ГОСТ 6008-90	Марганец металлический и марганец азотированный	01.07.91 без огран.
87	ГОСТ 4755-91	Ферромарганец	01.01.93 без огран.
88	ГОСТ 4756-91	Ферросиликомарганец	01.01.93 без огран.
89	ГОСТ 4757-91	Феррохром	01.01.91 без огран.
90	ГОСТ 4759-91	Ферромolibден	01.01.93 без огран.
91	ГОСТ 4761-91	Ферротитан	01.01.93 без огран.
92	ГОСТ 4761-71	Силикокальций	01.01.73 без огран.
93	ГОСТ 14848-69	Ферробор	01.07.70 без огран.
94	ГОСТ 27130-94	Феррованадий	01.01.60 без огран.
95	ГОСТ 17746-96	Титан губчатый	07.01.00 без огран.
96	ГОСТ 16773-03	Феррониобий	01.09.04 без огран.
97	ГОСТ 292200-91	Концентраты плавиковошпатные металлургические	01.01.93 без огран.
98	ГОСТ 11069-01	Алюминий первичный	01.01.03 без огран.
99	ГОСТ 11070-74	Чушки первичного алюминия	01.01.75 без огран.
100	ТУ 48-4805-	Материал твердый	01.05.08

<i>Номер</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Наименование документа</i>	<i>Срок действия</i>
	141-2008	углеродсодержащий. Марка УМВ-95	без огран.
101	ТУ 1915-001-84761069-2008	Углеродистый материал высокого качества	18.09.08 без огран.
102	ТУ 5743-029-31178039-2006	Брикеты твердошлаковых смесей	10.02.06 без огран.
103	ТС 862-01-2008	Брикет из отсевов ферросилиция	06.08.08 без огран.
104	ТС 862-03-2008	Брикет из отсевов силикомарганца	06.08.08 без огран.
105	ТС 1316-001-8476069-2008	Высокоуглеродистый материал ВУМ – 1 и ВУМ – 2	без огран.
106	ТУ У05400783-006-97	Проволока порошковая для обработки металлургических расплавов	02.01.98 без огран.
107	ТУ 14-1-5450-2002	Проволока порошковая технологическая для внепечной обработки чугуна и стали	10.04.02 без огран.
108	ТУ 1274-025-00187240-2009	Проволока порошковая для внепечной обработки расплавов	01.05.09 без огран.
109	ТУ 0865-032-45413739-2005	Брикет для раскисления стали	26.06.2006 без огран.
110	ТУ 1971-003-13303593	Углеродсодержащий материал	01.01.07 без огран.
111	ТУ 0780-002-32516389-2007	Шихта металлическая для сталеплавильного производства	20.08.07 без огран.
112	ТУ 1470-009-31184235-2006	Наполнители смесевые на основе кальция для порошковой проволоки	15.10.06 без огран.
113	ТУ 1479-012-31184235-2007	Проволока порошковая технологическая	02.07.07 без огран.
114	ТУ 0866-018-21600649-2008	Легирующий материал «Борид ферротитана»	02.06.08 без огран.
115	ТУ 1915-002-94816920-2007	Науглероживатель	28.01.08 без огран.
116	ТУ 48-4805-144-2008	Материал твердый графитовый	01.05.08 – 01.05.2011

На рисунке 1.12 приведена контекстная диаграмма верхнего уровня для проекта «Производство непрерывно-литой заготовки». На рис. 1.13 – 1.17 приведены родительские и дочерние диаграммы проекта.

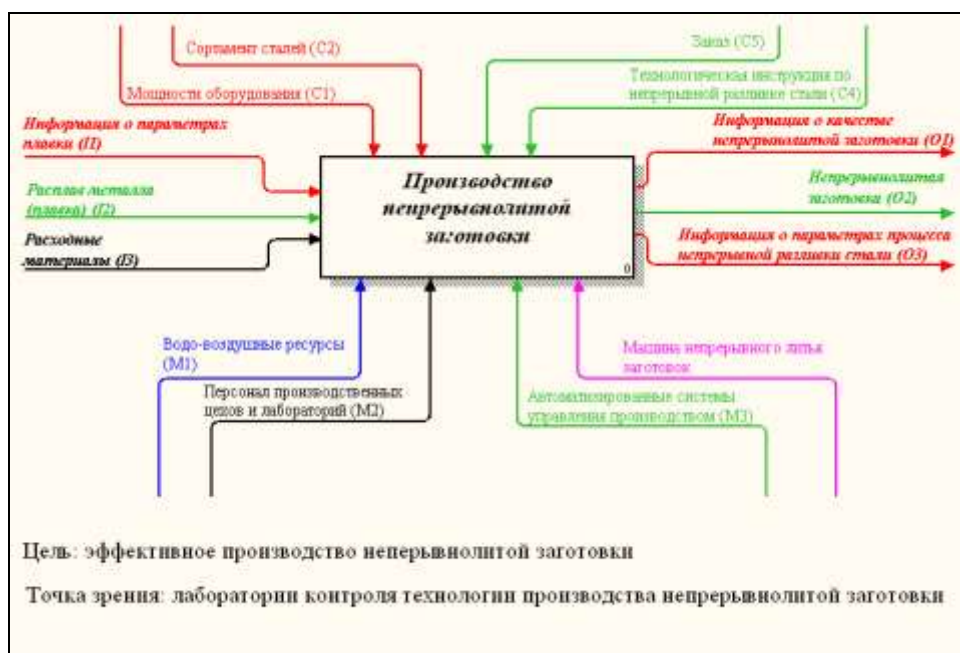


Рисунок 1.12 – Контекстная диаграмма A0 верхнего уровня для проекта «Производство непрерывно-литой заготовки»

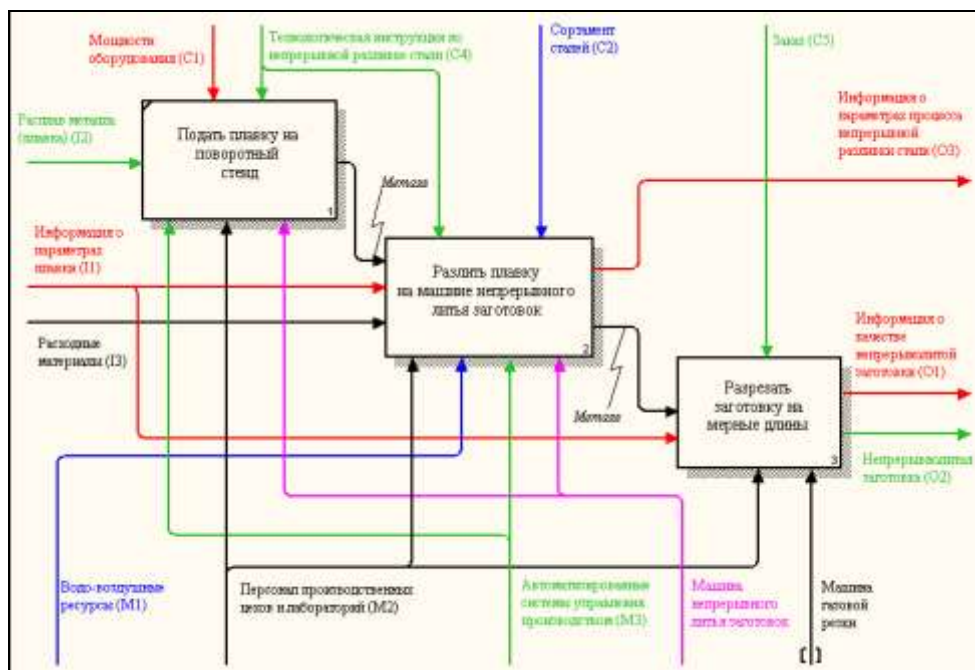


Рисунок 1.13 – Диаграмма декомпозиции функциональной модели проекта «Производство непрерывно-литой заготовки» (основные этапы производства)

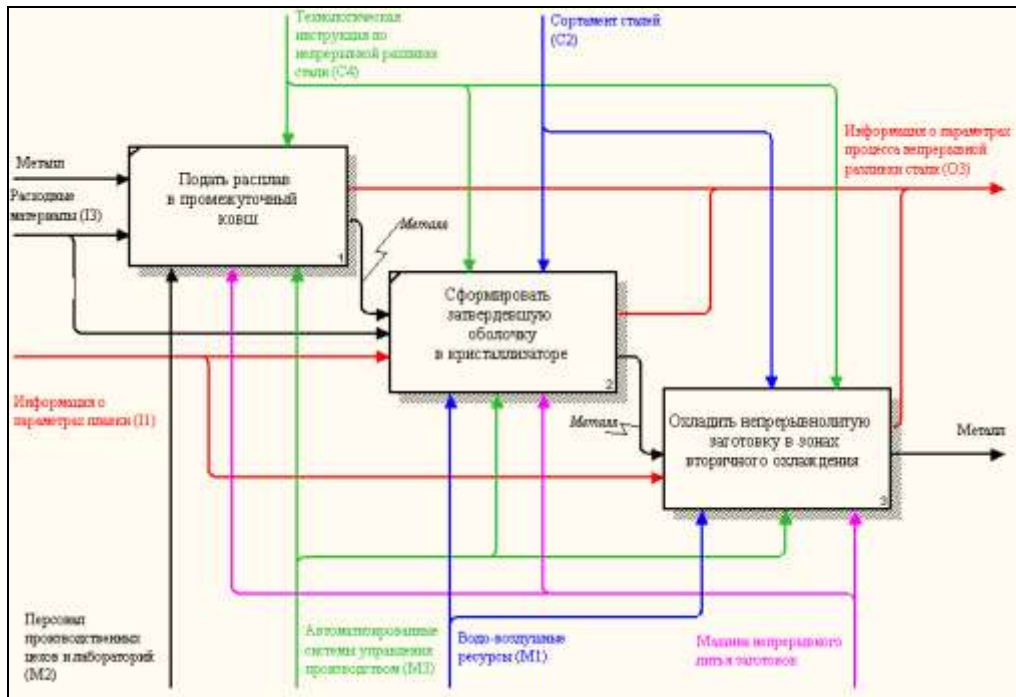


Рисунок 1.14 – Дочерняя диаграмма функциональной модели проекта «Производство непрерывно-литой заготовки»

(этап разливки плавки на машине непрерывного литья заготовок)

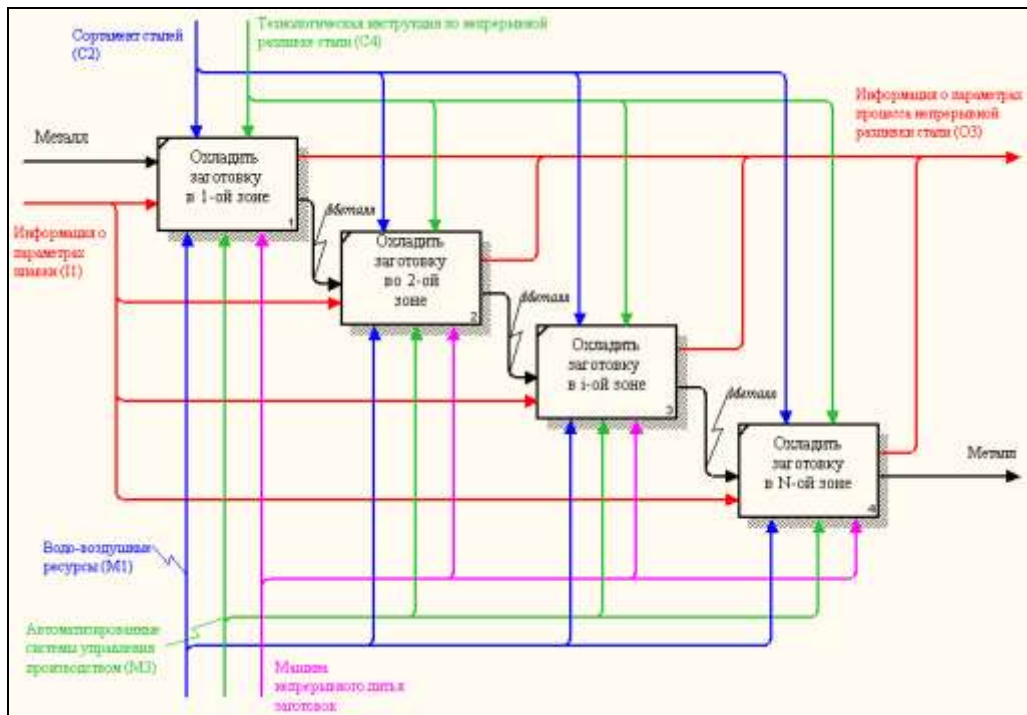


Рисунок 1.15 – Дочерняя диаграмма функциональной модели проекта «Производство непрерывно-литой заготовки»

(этап охлаждения заготовки в зонах вторичного охлаждения)

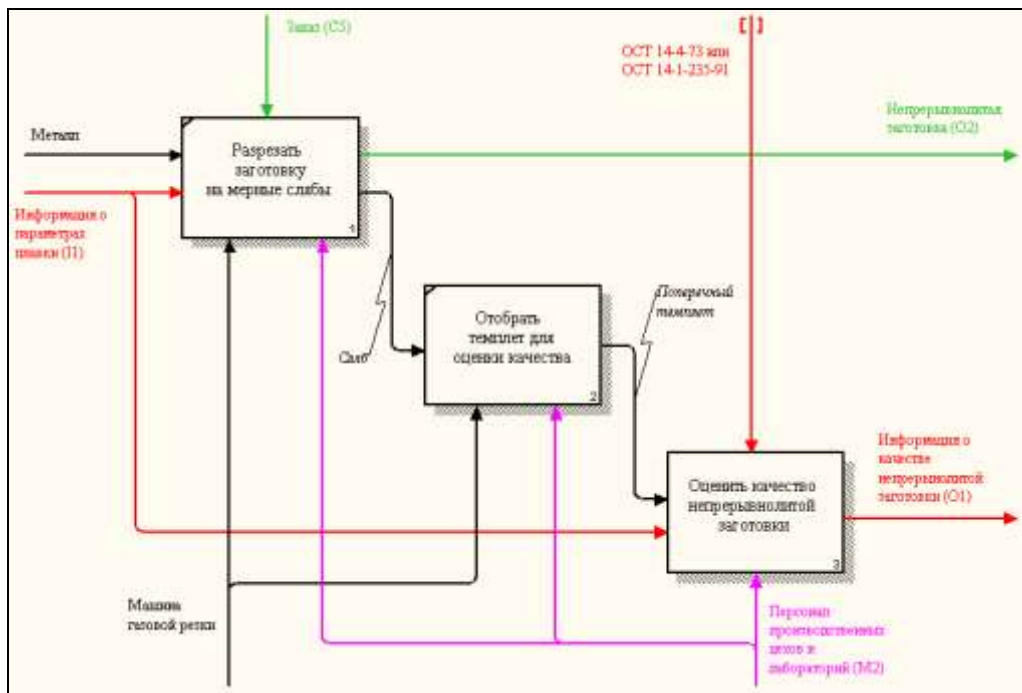


Рисунок 1.16 – Дочерняя диаграмма функциональной модели проекта «Производство непрерывно-литой заготовки» (этап резки заготовки на мерные длины)

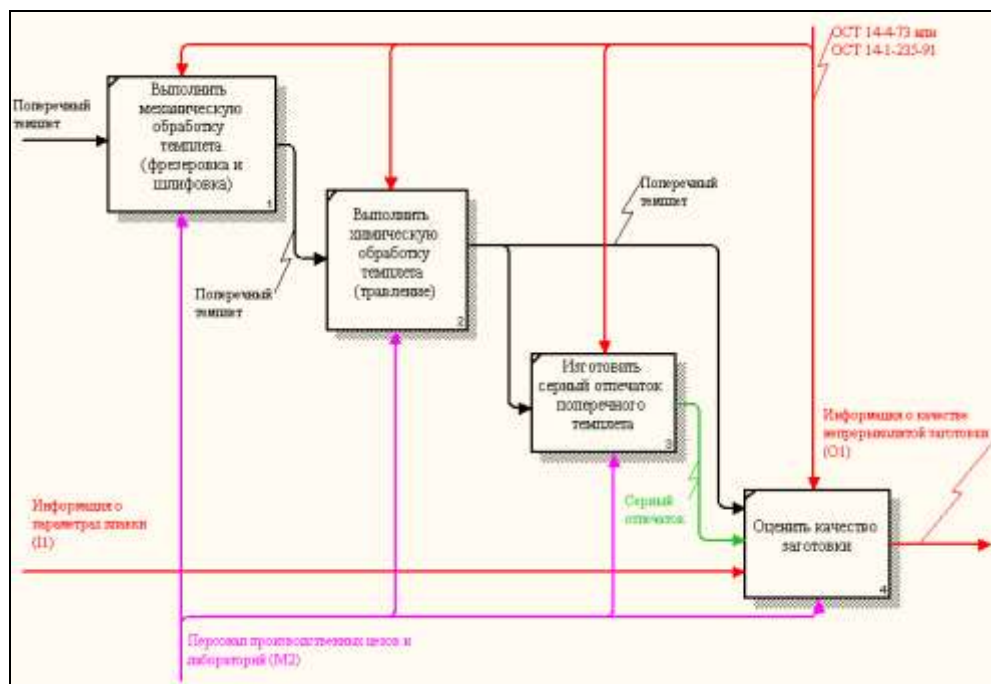


Рисунок 1.17 – Дочерняя диаграмма функциональной модели проекта «Производство непрерывно-литой заготовки» (этап оценки качества непрерывно-литой заготовки по поперечному темплету и серному отпечатку)

Таким образом, в ходе онтологического и функционального моделирования предметной области:

1) определены источники и потоки информации при ее движении по различным переделам металлургического производства;

2) выделены классы объектов и атомарные элементы, которые должны быть использованы при формализации и решении задачи оптимизации параметров протекания металлургических процессов;

3) определены взаимосвязи между этими объектами, которые определяют выбор управляющих параметров при ведении металлургических процессов;

4) теоретически обоснован порядок исследований процесса непрерывной разливки с точки зрения повышения эффективности функционирования металлургических агрегатов.

#### **1.4 Традиционные пути решения проблемы управления режимами охлаждения непрерывно-литой заготовки**

Задачи по исследованию управления машинами непрерывного литья заготовок в настоящее время можно разделить на следующие группы:

– математическое моделирование и оптимизация тепловых процессов, протекающих в непрерывно-литой заготовке при ее нахождении в кристаллизаторе и зонах вторичного охлаждения;

– исследование изменения состояния оборудования в ходе проведения одной или нескольких серий и влияние этих изменений на качество готовой продукции;

– разработка и исследование влияния состава шлакообразующей смеси, которую подают в промежуточный ковш, на формирование внутренних и поверхностных дефектов;

– разработка и внедрение новых агрегатов, совершенствование конструкции отдельных технологических модулей, таких как кристаллизатор, промежуточный ковш, форсунки, прижимные ролики и т.п.

Основными методами исследования и решения приведенных задач остаются методы математического моделирования и экспериментального изучения процессов.

#### *1.4.1 Теоретические исследования в области моделирования процесса теплопроводности и оптимизации охлаждения заготовок*

В процессе выплавки стали в сталеплавильных агрегатах жидкий расплав аккумулирует в себе значительное количество тепловой энергии, приобретенной из жидкого чугуна, тепла химических реакций обезуглероживания чугуна и других сравнительно меньших источников тепла. При формировании слитка в кристаллизаторе и охлаждении в МНЛЗ (машине непрерывного литья заготовок) приобретенное металлом тепло теряется, причем потери тепла составляют 40 – 60 %. Для исследования тепловых процессов, протекающих в затвердевающей слитке во время его прохождения машины непрерывного литья заготовок, разработано несколько физико-математических теорий. Наибольшее распространение получили два подхода к изучению процессов затвердевающего слитка – это задача Стефана и теория двухфазной зоны, которая, в свою очередь, имеет несколько ветвей в зависимости от вида функции для ее описания: равновесная, неравновесная и квазиравновесная теории кристаллизации. Разработкой физических и математических основ теории двухфазной зоны занималась группа исследователей ЦНИИЧермет под руководством Борисова В.Т. [5 – 11], Самойловича Ю.А [12, 13] и др. [5; 14 – 18].

Согласно задаче Стефана в затвердевающей слитке существует две четко определенные фазы: твердая и жидкая. Физические параметры металла считаются постоянными величинами в течение всего процесса охлаждения. Теория решения таких задач в аналитическом и численном виде подробно разработана и описана в [11, с. 911 – 915; 12, с. 1087 – 1092; 13].

Все сплавы затвердевают в интервале температур, а не при некоторой постоянной температуре. Существует аналитическое автотемпературное



решение для случая, исходящего из предположения о слитке как бесконечной пластине, отсутствия сопротивления на поверхности раздела, постоянства теплофизических свойств и равномерного распределения теплоты кристаллизации во всем интервале затвердевания. Для решения этой задачи были использованы также и другие методы, в основе которых лежат менее жесткие ограничения, приближенные аналитические методы, методы «интегрального распределения», а также простые, но действительные методы числового решения соответствующих дифференциальных уравнений при заданных граничных условиях.

При моделировании двухфазной зоны предполагается, что затвердевание многокомпонентных сплавов происходит в интервале температур ликвидус – солидус с образованием зоны твердожидкого состояния, разделяющей твердую и жидкую часть. На участке перед затвердевающей поверхностью возникает концентрационное переохлаждение, поэтому плоская граница раздела фаз становится неустойчивой, и образуются дендритные разветвления кристаллов вместо плоских форм [5, с. 5 – 8; 6, с. 5 – 15; 16, с. 29 – 35].

С металлургической точки зрения большой интерес представляют следующие особенности кривых ликвидуса и солидуса:

– расстояние по вертикали между кривыми солидуса и ликвидуса соответствует области слитка, в которой в каждый данный момент в процессе затвердевания сосуществуют твердая и жидкая фазы. Это расстояние составляет ширину двухфазной зоны, и литейные характеристики сильно зависят от ширины этой зоны;

– расстояние между этими кривыми по горизонтали определяет время локального затвердевания  $t_f$ , т.е. время, необходимое для изменения температуры данного участка металла от температуры ликвидуса до температуры солидуса. Время локального затвердевания обратно пропорционально средней скорости охлаждения данного участка в процессе затвер-

девания. Основные характеристики структуры затвердевшего металла, «включая расстояния между дендритными ветвями и размер включений», сильно зависят от этого времени локального затвердевания.

Двухфазная зона с ячеисто-дендритной или дендритной структурой роста оказывает значительное сопротивление потокам жидкости, стремящимся скомпенсировать изменение плотности сплава при фазовом переходе. При этом гидродинамическая проницаемость и объемная плотность жидкости определяют физическую сплошность твердого состояния сплава. С этим фактом связана необходимость изучения проницаемости как физического свойства двухфазной зоны, являющегося отражением реальной структуры роста.

Формально понятие проницаемости вводится макроскопическим законом течения жидкости в двухфазной зоне. При этом возможен теоретический анализ проницаемости, рассматривающий модельное представление двухфазной зоны, основанное на известных сведениях о структурах роста.

Проблема изучения структуры слитков сводится к тому, чтобы объяснить происхождение всех разнообразных свойств, которые образуют понятие о структуре литого металла, и показать, как эти структурные характеристики зависят от изменения физических и химических параметров процесса. Это должно подсказать пути изменения неудовлетворительной структуры в нужном направлении и указать, какие из факторов являются критическими, а какие нет. Структура литого металла, когда это понятие употребляется в широком смысле, включает в себя кристаллическую структуру (т.е. величину, форму, ориентацию и степень совершенства кристаллов), распределение в сплаве составляющих его химических элементов и внутреннюю и внешнюю топографию металла (пористость, форму и отделку поверхности). Основными факторами, порождающими различие в структурах отдельных образцов литых металлов, являются химический со-

став и скорость его затвердевания. Скорость затвердевания также должна пониматься широко, с учетом того фактора, что отдельные участки металла затвердевают с разными скоростями и что сплав может и не быть неподвижным при затвердевании.

Возникает вопрос, можно ли положение поверхности раздела для полностью затвердевшего металла найти расчетным путем и не следует ли это делать по результатам температурных измерений. Иногда утверждают, что конец затвердевания сплава определяется температурой солидуса. Однако, если это соблюдается в случае перемещения гладкой поверхности раздела установившихся условий, то для более близкого к практике случая ячеисто-дендритной поверхности раздела это несправедливо: затвердевание должно заканчиваться на заключительной стадии «конечного переходного процесса» в междендритной жидкости. В остальных случаях явно происходит междендритная сегрегация, так что жидкая фаза сохраняется вплоть до предельной эвтектической температуры. В принципе избежать дендритного или ячеисто-дендритного роста можно лишь с уменьшением скорости и повышением температурного градиента, но едва ли есть практический смысл осуществлять непрерывную разливку при достаточном перегреве и с достаточно низкой скоростью затвердевания металла, чтобы избежать роста дендритов и сопутствующих ему осложнений [14].

Полная математическая модель двухфазной зоны бинарного сплава представляет систему дифференциальных уравнений, которая включает уравнения энергии, массопереноса, неразрывности среды, Дарси и состояния системы.

В работах Журавлева В.А. [5, с. 5 – 7; 16, с. 29 – 35; 17, с. 32 – 34; 18, с. 93 – 96] уравнения для формы зоны записываются с учётом усреднения характеристик движения и теплофизических свойств вещества. Дополнительная степень свободы, учитывающая соотношение фаз, описывается величиной  $S$  (сечение жидкой фазы), имеющей смысл относительного коли-

чества жидкости на данной изотерме двухфазной зоны. При добавлении к данным уравнениям соответствующих начальных и граничных условий получаем необходимую постановку задачи, решение которой дает представление о движении двухфазной зоны, распределении легирующих элементов и давлении внутри двухфазной зоны. Различного рода упрощающие допущения позволяют исключить некоторые уравнения из системы, что приводит к интегрированию оставшихся уравнений и получению аналитических выражений для описания состояния двухфазной зоны или дают автомодельное решение. В [13] рассмотрены решения уравнения теплопроводности для одномерного и двумерного случая численными и аналитическими методами, общее аналитическое решение уравнения массопереноса описано в [10; 19 – 23] для задач, не связанных с охлаждением слитков. Решение полной системы позволяет получить описание поведения при всех параметрах, влияющих на формирование слитка и подобрать их значения в соответствии с производственными целями, т.е. осуществлять управление процессами охлаждения и нагревания, а также оказывать влияние на формирование кристаллической структуры слитка. На основе этой теории разработаны математические модели для слитков различного сечения.

На основе расчетов ЦНИИчермет было установлено, что двухфазная зона занимает значительную часть слитка. Подробное исследование модели кристаллизации с наличием двухфазной зоны выполнено в работах [24, 25].

Процесс затвердевания непрерывно-литых слитков в условиях машины непрерывного литья заготовок является многофакторным. В ходе этого процесса слиток претерпевает фазовые превращения, испытывает термические и усадочные напряжения, в ходе которых формируется кристаллическая структура слитка и образуются внутренние и поверхностные макродефекты. Движущей силой этих процессов является градиент темпе-

ратур, возникающий в результате теплоотдачи с поверхности слитка, и влияние внутренних источников тепла центральной части слитка. Разными авторами [25 – 28] рекомендуется для уменьшения балла внутренних дефектов снижать интенсивность охлаждения для того, чтобы уменьшить градиент температур внутри слитка, однако по рекомендациям [15, 25, 29, 30] для повышения скорости кристаллизации и уменьшения протяженности зоны столбчатых кристаллов следует повысить теплоотвод с поверхности слитка. Таким образом, возникает задача, в которой участвуют противоречивые требования к расходу охладителя в зонах вторичного охлаждения МНЛЗ. Теория оптимального управления и методы математического моделирования систем с распределенными параметрами, к которым и относится процесс затвердевания металла, разрабатывались А.Г. Бутковским, А.И. Егоровым, Ю.В. Егоровым, Т.К. Сиразетдиновым, К.А. Лурье и другими исследователями [19; 31 – 25]. Впервые попытки решить задачи оптимального управления системами, описываемыми уравнениями параболического типа с движущимися границами раздела фаз, были сделаны Г.Л. Дегтяревым, Б.М. Будаком, Н.И. Гельдманом. В этих работах рассматриваются, в первую очередь, математические вопросы оптимизации: вывод условий оптимальности, доказательство принципа максимума, что было успешно сделано для задачи Стефана. Первые практические результаты по решению задач оптимизации процессов нагрева и затвердевания были получены В.М. Рябковым, Д.Х. Девятовым в работе по управлению тепловой обработкой слитков с незавершенным процессом затвердевания на участке мартеновский цех – обжимной цех [36; 37, с. 68 – 69]. Полученные результаты затем были использованы для решения других задач в области непрерывной разливки и литейных процессов.

Анализ работ в решении задач оптимизации кристаллизации слитка показал, что почти все авторы выделяют два подхода. Первый подход опирается на методы математической статистики, теорию распознавания обра-

зов и т.п. При таком подходе необходимо установить корреляционные зависимости между управляемыми параметрами на входе в систему и на выходе, определяющими качество готовой продукции. В случае непрерывной разливки стали входными параметрами могут быть температура разливаемого металла, скорость вытягивания, интенсивность теплосъема с поверхности слитка в кристаллизаторе и зонах вторичного охлаждения и т.д. Выходными параметрами можно считать параметры качества структуры слитка, например баллы по внутренним дефектам и протяженности зон кристаллической структуры слитка. Задача управления сводится к получению на входе и на выходе процесса таких значений параметров, которые обеспечивают согласно результатам корреляционного анализа оптимальные показатели качества литого металла. Преимущество этого метода состоит в том, что в этом случае не требуется углубленного теоретического изучения процессов, протекающих в системе.

Второй подход основан на тщательном теоретическом изучении процессов в системе при математическом моделировании их с помощью ЭВМ. Этот подход обладает гибкостью и может быть использован при анализе новых технологий и способов литья.

Общие вопросы по физической интерпретации критериев оптимальности для процесса затвердевания слитка и их математическое описание нашли отражение в работах Соболева В.В. и Трефилова П.М. Основные алгоритмы решения подобных задач для медных слитков круглого сечения представлены в работах [37, с. 78 – 80; 38, с. 84 – 87; 39].

В интерпретации Соболева В.В. и Трефилова П.М. критерии, связанные с температурным полем, названы первичными. Вторичные критерии оптимальности связаны с явлениями, которые происходят вследствие установления в затвердевающей расплаве конкретного распределения температурных полей. К этим явлениям можно отнести возникновение пористости, ликваций и термических напряжений. В [25, 34] сформулирован ряд кри-

териев, учитывающих объемы жидкой и твердой фазы, градиент температуры, скорость затвердевания, а также поле концентраций, давление растворенных газов и термические напряжения, возникающие в затвердевающем металле. Среди них отсутствуют такие, которые бы позволили связать режимы охлаждения в зоне вторичного охлаждения и протяженности кристаллических зон непрерывно-литого слитка в условиях машины непрерывного литья заготовок.

Довольно широко проводились исследования в области разработки рациональных режимов охлаждения авторами работ [40 – 48], которые основной целью ставили разработку методик расчета для достижения требуемой температуры поверхности заготовки и оптимизации расходов охладителя по ступенчатой траектории при переходе между зонами вторичного охлаждения. В этих работах большое внимание уделялось моделированию формирования затвердевшей корочки на основе уравнения теплового баланса и распространению зоны переходного участка при разливе «плавка на плавку».

#### *1.4.2 Экспериментальные исследования по изучению управляющих воздействий на процесс разливки стали*

С целью изучения влияния химического состава и технологических параметров непрерывной разливки сталей марок СтЗсп и 08Ю на кристаллическую структуру слитка и его качество был проведен диагностический эксперимент в июле – августе 1996 года с участием автора работы. Рассматривался процесс разливки «плавка на плавку». В ходе эксперимента исследовались 136 опытных плавов стали марки СтЗсп и 68 плавов стали марки 08Ю. Опыты проводились по следующей схеме. Произвольно выбиралась плавка, которая поступала на одну из трех двухручьевых МНЛЗ (№1, №2 и №3). В процессе разливки плавки термопарой погружения (датчик ТПР-2085 ГОСТ 3044-84 и «Сталь-2» ТУ 25-1727.0082-88) выполнялся замер температуры разливаемой стали в промежуточном ковше. Отбира-

лась проба на химический анализ, при этом фиксировались текущие длины отлитого сляба, показываемые счетчиками СПУ системы измерений для определения исследуемой области слитка. По мере движения этой области контролировали расходы охладителя в кристаллизаторе и ЗВО по секциям (датчики «Сапфир» С22-ДД ТУ 25-02.720.136-81). Другими исследуемыми технологическими параметрами являлись: скорость разливки непрерывно-литого слитка (тахогенератор Ф277), усилие вытягивания слитка (НУ 7321 КСП-2 ГОСТ 7164-78), ширина сляба, качество шлакообразующей смеси (сюда вошли влажность, основность, содержание углерода), стойкость технологических узлов, температура стали в сталеплавильном ковше после агрегата доводки стали.

Зная местоположение исследуемой области, определялся номер сляба в зависимости от мерной длины. Данные передавались в отделение подготовки литых слябов, где в пределах этой области отрезался поперечный темплет, а затем отправлялся для исследования в макротемплетную лабораторию.

С поперечных темплетов после прострожки и шлифования снимают серные отпечатки по Бауману, а после глубокого травления в 50 %-м водном растворе соляной кислоты производят оценку макроструктуры металла в баллах по эталонам ОСТ 14-11-73. Время с момента отбора темплетов до получения информации по качеству макроструктуры металла составляет от 2 ч и более. Получив топографию дефектов, устанавливается причина нарушения технологии, вызвавшая возникновение того или иного дефекта. По расположению точечной неоднородности определяют ориентацию темплета относительно малого радиуса МНЛЗ (наличие точечной неоднородности характерно именно по малому радиусу) на серных отпечатках и на темплетах.

Кристаллическая структура слитка выявлялась на темплете после травления. При этом получается рельеф, который обязан своим возникно-



вением дендритной ликвации, так как в пределах дендрита распределение химических элементов неоднородно.

Все образцы показали, что слиток, отлитый в условиях кислородно-конвертерного цеха на исследуемый период времени, имеет кристаллическую структуру с четко выраженными тремя кристаллическими зонами и фронтом кристаллизации по широким и узким граням слитка, причем протяженность этих зон по большому и малому радиусу различна из-за несимметричного охлаждения заготовки. Исследование микродефектов структуры производили по ОСТ 14-11-73.

Оценку качества темплетов выполняли сравнением их натурального вида или серных отпечатков со схематическими эталонами для балльной оценки. Замер протяженности структурных зон производился только на травленных темплетах. Более 90 % всех исследуемых слитков содержали разного вида дефекты. Полученные данные подтверждаются более ранними наблюдениями лаборатории, проводимыми фактически с первого года работы МНЛЗ в цехе (рисунок 1.18).

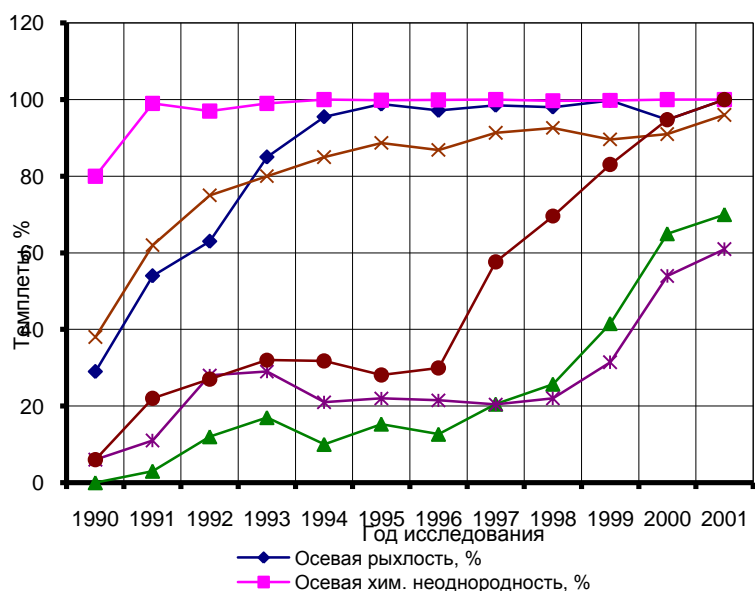


Рисунок 1.18 – Доля исследованных темплетов, содержащих нарушения сплошности

Для всех слитков с дефектами следует отметить, что большая часть трещин, перпендикулярных широкой и узкой граням слитка, располагается только в зоне столбчатых кристаллов. В мелкозернистой корке проявляются только трещины поверхностной сетки. В области встречи тепловых фронтов по большому и малому радиусу слитка ярко проявляются осевая пористость и осевая химическая неоднородность, так как происходит оттеснение примесей сплава фронтом дендритов, длина которых по малому радиусу достигает геометрического и теплового центра слитка. В редких случаях проявляются трещины по фронту треугольника кристаллизации по узкой грани слитка. В зоне разориентированных кристаллов дефектов практически не наблюдалось.

Для слитков толщиной 250 мм протяженность структурных зон составила:

1) по малому радиусу: мелкозернистых кристаллов 2 – 10 мм; столбчатых кристаллов 120 – 129 мм; разориентированных кристаллов отсутствует;

2) по большому радиусу: мелкозернистых кристаллов 4 – 8 мм; столбчатых кристаллов 55 – 80 мм; разориентированных кристаллов 30 – 50 мм.

Кроме того, в 95 % слитках наблюдается смещение теплового центра слитка до 10 мм как в сторону малого радиуса, так и в сторону большого, в зависимости от отношения расходов охладителя по радиусам МНЛЗ.

Все собранные экспериментальные данные были записаны в общую электронную базу данных и подверглись статистической обработке средствами EXCEL и специально для этих целей составленными программами. Исходная база данных содержит следующие поля: номер плавки; процентное содержание химических элементов: углерода, марганца, кремния, серы, фосфора, алюминия, хрома, никеля и меди ( $[C]$ ,  $[Mn]$ ,  $[Si]$ ,  $[S]$ ,  $[P]$ ,  $[Al]$ ,  $[Cr]$ ,  $[Ni]$ ,  $[Cu]$ ); расходы охладителя в ЗВО и кристаллизаторе; ско-

рость разливки; усилие вытягивания; разность температур входящей и выходящей воды из кристаллизатора; баллы обнаруженных макродефектов по травленому темплету; наличие поверхностных дефектов; протяженности структурных зон по широким и узкой граням слитка; смещение теплового фронта кристаллизации по широким граням. Набор полученных данных обрабатывался согласно стандартным алгоритмам обработки экспериментальных данных, представленных в [49 – 51].

В лаборатории непрерывной разливки стали центральной исследовательской лаборатории регулярно проводятся эмпирические исследования по выявлению причин формирования дефектов в непрерывно-литой заготовке и корректировке работы агрегатов.

При разливке на МНЛЗ использовались кристаллизаторы, оборудованные термодатчиками системы прогнозирования качества непрерывно-литых слябов «Кристаллизатор – 2000».

Для изучения влияния режима вторичного охлаждения слябов в ЗВО измерялась температура поверхности слябов со стороны малого радиуса в ЗВО.

Отработка технологии разливки и режимов охлаждения заготовки в ЗВО производилась на отдельно взятых плавках, отливаемых в одной серии.

Измерение температуры производили на четырех плавках при разливке серий из 13 и 19 плавок.

В зонах 1 – 2 охладителем являлась вода, а в зонах 3 – 5 – водовоздушная смесь. Торцевая поверхность сляба охлаждалась водой в первой, второй и начале третьей зоны.

Плавки первой серии (условно обозначены А и В) разливались соответственно первой и второй в серии, в то время как плавки второй серии (условно обозначим их С и Д) соответственно десятой и одиннадцатой, расходы воды в ЗВО были различными.

Измерение температуры поверхности слябов производилось пирометром СОМЕТ 1000 с погрешностью 1 °С.

Полученные данные продемонстрировали, что слябы плавок А и В, отлитые со скоростью 0,5 м/мин, на расстоянии 2,5...4 м ниже кристаллизатора имели меньшую (в среднем на 20 – 25 °С) температуру поверхности, чем слябы плавок С и D, отлитые со скоростью 0,6 м/мин. Причиной этого, очевидно, являлся завышенный расход воды в зонах 3 – 5 при скорости вытягивания сляба 0,5 м/мин. По оси и краю широкой грани слябов наблюдалась существенная (до 60 – 70 °С) разница температур для обеих скоростей вытягивания. Температура поверхности по оси и по краю слябов в ЗВО снижалась вплоть до отметки, находящейся на расстоянии примерно 7,6 м ниже кристаллизатора, и соответствует концу участка принудительного охлаждения сляба. После этого происходил разогрев поверхности сляба по его оси на 15 – 20 °С и краевой зоны на 5 – 10 °С соответственно.

Из приведенных данных следует, что тепловое состояние МНЛЗ оказывает определенное влияние на температуру поверхности отливаемого сляба. Так, температура поверхности по оси широкой грани слябов, отлитых во второй половине серии на разогретой машине, в среднем на 20 – 25 °С выше по сравнению со слябами, отлитыми в начале серии на холодной МНЛЗ. Температура поверхности краевой части аналогично отлитых слябов различается еще сильнее на величину до 40 – 60 °С.

Для разливки стали в слябы шириной 2465 – 2520 мм применяли шлакообразующую смесь (ШОС) с содержанием углерода, фтора и щелочей в пределах:  $C = 6,0 - 8,0 \%$ ,  $F = 6,0 - 9,0 \%$ ,  $NaO = 3,0 - 4,0 \%$  и основностью, равной 1,0 – 1,1. В процессе разливки ГШОС достаточно быстро расплавлялась с образованием слоя жидкого шлака толщиной до 10 мм. Поверхность смеси в кристаллизаторе постоянно поддерживали темной за счет своевременного ввода свежей порции ШОС.

Содержание оксидов алюминия в шлаках кристаллизатора находилось в пределах 7,7 – 10,4 %, что не ухудшило их плавкостные и вязкостные характеристики.

Всего при отработке технологии было разлито 443 плавки и получено слябов общей массой около 155000 т. При этом осуществлялся контроль основных технологических параметров разливки металла и качества поверхности слябов. Оценка качества слябов по дефектам поверхности производилась после охлаждения. На поверхности слябов отмечены отдельные поверхностные дефекты. Дефект «шлаковые включения» (размером до 10 мм) отмечен на слябах, отлитых после замен погружных стаканов, на расстоянии до 1000 мм от пояса. Отсортировка слябов по этому дефекту в начальный период на отдельных плавках достигала 16 %.

Внедрение таких мероприятий, как замена погружных стаканов на скорости разливки 0,2 – 0,3 м/мин, выделение поясного участка при замене погружного стакана 2,4 м (1,2 м до пояса и 1,2 м после пояса), применение корундографитовых погружных стаканов позволило снизить отсортировку слябов по дефекту «шлаковые включения» до 0,46 %.

Отсортировка по дефекту «продольная трещина» на слябах, отлитых в первых сериях, составляла 3,12 %. После ограничения числа плавков, отливаемых в одной серии (не более 35 плавков), стабилизации скорости разливки (изменение скорости разливки за плавку не более 1 раза), уменьшения содержания серы в готовом металле (при содержании серы более 0,02 % отсортировка слябов возрастала в 3 раза) отсортировка слябов по дефекту «продольная трещина» снизилась до 0,02 %.

Снижение содержания серы в готовом металле позволило улучшить качество макроструктуры слитка и уменьшить отсортировку слябов по дефекту «осевая несплошность» (при содержании серы более 0,020 % отсортировка составляла 0,2 % и 0,03 % – при содержании серы в готовой стали менее 0,015 %).

Начиная с 2000 года работниками лаборатории непрерывной разливки стали и кафедрой электроники и микроэлектроники МГТУ активно разрабатывается динамическая модель для регулирования расходов воды [52, с. 109 – 10]). В ходе этих работ анализировался скоростной режим разливки серии плавок на машине непрерывного литья заготовок и было выяснено, что:

- регулирование подачи воды на охлаждение слитка происходит одновременно по всем зонам вторичного охлаждения одновременно с изменением скорости разливки, что соответствует идеологии существующей таблично-скоростной модели охлаждения слитка;
- скорость изменения количества воды, поданной по зонам охлаждения МНЛЗ, соответствует скорости изменения значений скорости разливки, то есть отсутствуют задержки, вызываемые работой исполнительных механизмов регулирования расходов.

На основе проведенного анализа была разработана математическая модель, определяющая влияние переходных процессов скоростного режима разливки стали на интенсивность водяного и водовоздушного охлаждения слитка на МНЛЗ, и распределения величины теплосъема по длине поверхности слитка.

Был произведен расчет охлаждения слитка при различных режимах работы МНЛЗ по существующей таблично-скоростной модели охлаждения слитка. Для расчета взяты типовые переходные скоростные процессы на МНЛЗ и получена плотность орошения поверхности разных участков слитка, сформированных до, во время и после переходного процесса.

Первый тип переходного процесса – снижение скорости с одного установившегося значения до другого (разность скоростей  $> 0,1$  м/с. При этом процессе участок слитка, находящийся в 1 и 2 зонах охлаждения, получает повышенное количество воды, в результате чего происходит его

переохлаждение и повышается вероятность образование дефектов макро-структуры на поверхности слитка.

Второй тип переходного скоростного процесса – увеличение скорости с одного установившегося значения до другого (разность скоростей более 0,1 м/мин). Участок слитка, находящийся в 1 и 2 зоне охлаждения, получает меньшее количество воды, в результате чего происходит его разогрев и повышается вероятность образования внутренних и поверхностных дефектов, а также угроза раскрытия эти дефектов.

Третий тип переходного скоростного процесса – кратковременное снижение скорости (до 0,1 м/мин на время смен) погружных стаканов до 50 с с последующим увеличением до рабочего значения. При этом участок слитка длиной 2 м, отлитый во время снижения скорости и охлаждаемый по существующей таблично-скоростной модели охлаждения ЗВО, переохлаждается и повышается вероятность образования дефектов макроструктуры и поверхности слитка.

Четвертый тип переходного скоростного процесса – снижение скорости с рабочего значения 0,6...1,0 м/мин до 0,1 м/мин на время) смены промежуточного ковша (до 5 мин) с последующим увеличением до рабочего значения. Данный тип переходного процесса характерен тем, что имеет «полный набор» недостатков, присущий всем предыдущим рассмотренным процессам:

- неравномерная средняя плотность орошения поверхность сляба после выхода его из кристаллизатора на участке слитка длиной четыре метра (разница более чем на 25 % между соседними метровыми участками сляба);
- резкое изменение, по отношению к соседней зоне, величины средней плотности орошения охлаждения участков сляба по длине ЗВО;

– очень велика (до 30 %) неравномерность регулирования плотности орошения в первой, второй и третьей зонах охлаждения на участке слитка длиной один метр.

Все вышеперечисленные факторы негативно влияют на температурную «картину» сляба, вышедшего из ЗВО МНЛЗ, и создают дополнительные напряжения в корочке слитка.

Практическое подтверждение выводов, сделанных с помощью математической модели, выполнено на существующей МНЛЗ №3 в ККЦ ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» на ряде серий плавов.

На выходе ЗВО МНЛЗ был установлен пирометр, показания которого записывались в электронном виде с привязкой по времени к отливаемому слитку.

На рисунке 1.19 показан фрагмент такой записи (скорость разливки и температура слитка от времени), где виден участок металла с недостаточным охлаждением (10 – 17 мин), участок «качания» (резкого изменения) плотности орошения (17 – 20 мин) и участок переохлажденного металла (20 – 26 мин) [52, с. 103 – 109].

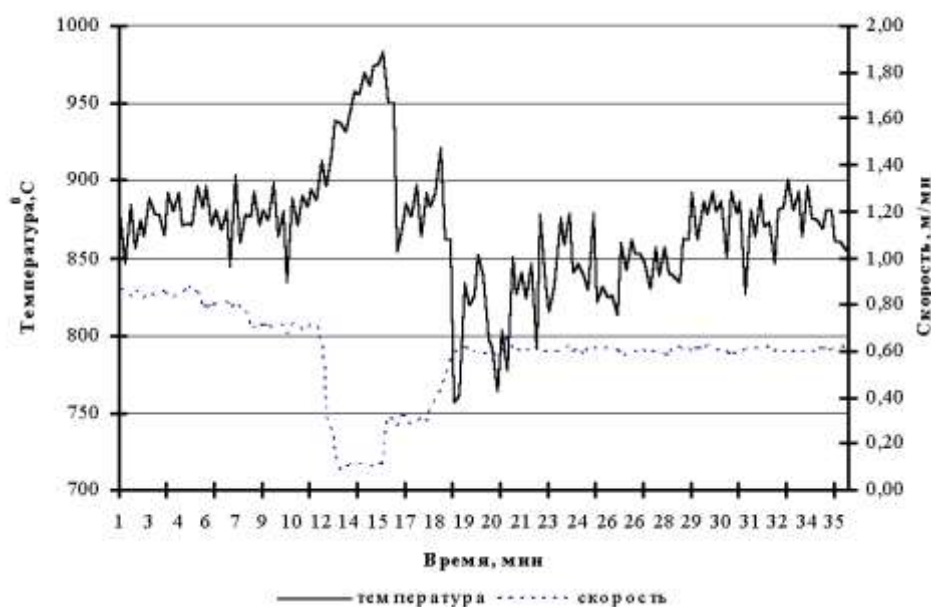


Рисунок 1.19 – Изменение температуры поверхности слитка при изменении скорости вытягивания



Таким образом, эмпирические исследования показали недостатки применяемой в данный период времени модели охлаждения по статическим таблицам с жесткой привязкой к скорости вытягивания заготовки.

Традиционные экспериментальные методы исследования показали, что:

- методика проведения промышленных экспериментов в настоящее время тщательно разработана и используется современное оборудование и охватываются практически все этапы производственного процесса;
- на основе экспериментальных данных возможно выявление стабильности работы металлургических агрегатов и получение качественной продукции;
- определение нестабильности в ритме работы производства на основе экспериментальных данных не всегда с заданной точностью объясняет причину ее возникновения;
- эмпирические данные, полученные в ходе активных и пассивных экспериментов, являются незаменимыми при идентификации аналитических моделей изучаемых процессов;
- для адекватного математического описания требуется совместное использование теоретических и аналитических сведений.

#### *1.4.3 Исследования методов получения экспертных оценок по электронным изображениям*

С задачей распознавания образов живые системы, в том числе и человек, сталкиваются постоянно с момента своего появления. В частности, информация, поступающая с органов чувств, обрабатывается мозгом, который в свою очередь сортирует информацию, обеспечивает принятие решения, а далее с помощью электрохимических импульсов передает необходимый сигнал далее, например, органам движения, которые реализуют

необходимые действия. Затем происходит изменение окружающей обстановки, и вышеуказанные явления происходят заново [53, 54].

Создание устройств, выполняющих функции распознавания различных объектов, в большинстве случаев обеспечивает возможность замены человека специализированным автоматом. Благодаря этому, значительно расширяются возможности сложных систем, выполняющих различные информационные, логические, аналитические задачи. Следует отметить, что качество работ, выполняемых человеком на рабочем месте, зависит от многих факторов (квалификации, опыта, добросовестности и т. д.). В то же время исправный автомат действует однообразно и обеспечивает всегда одинаковое качество [53, 54].

Основными причинами замены человеческого участия в задачах распознавания являются:

- освобождение человека от однообразных операций;
- повышение качества и скорости принимаемых решений.

Распознавание образов (объектов, сигналов, ситуаций, явлений или процессов) – задача идентификации объекта или определения каких-либо его свойств по его изображению.

Одним из базовых является не имеющее конкретной формулировки понятие множества. В компьютере множество представляется набором неповторяющихся однотипных элементов. Слово «неповторяющихся» означает, что какой-то элемент в множестве либо есть, либо его там нет. Универсальное множество включает все возможные для решаемой задачи элементы, пустое не содержит ни одного.

Образ – классификационная группировка в системе классификации, объединяющая (выделяющая) определенную группу объектов по некоторому признаку. Образы обладают характерным свойством, проявляющимся в том, что ознакомление с конечным числом явлений из одного и того

же множества дает возможность узнавать сколь угодно большое число его представителей.

В настоящее время можно выделить четыре метода распознавания образов: сравнение с образцом; статистический метод; нейросетевой метод; структурные и синтаксические методы.

Это информационные задачи, состоящие из двух этапов:

– преобразование исходных данных к виду, удобному для распознавания;

– собственно распознавание (указание принадлежности объекта определенному классу) [55, 56].

Металлургической отрасли сообщалась о системах распознавания объектов на изображении. В частности, можно указать программное обеспечение:

– Scentis, разработанного ЗАО «Melytec», для материалোগрафических лабораторий, предназначенное для сбора данных, различных измерений, анализа и хранения результатов. В программном продукте разработано 11 инструментов для измерения размера зерен, размеров включения, фазовых и структурных составляющих, графита в чугуне и др;

– Siams 600, предназначенная для металлургии, машиностроения, огнеупорного производства, металлографии, петрографии, биологии. Обработка изображения позволяет выделить границы, мелкие частицы или поры, «хребты» и «долины» яркости». Программное обеспечение использует методы восстановления разорванных границ объекта, разделения контрастирующих частиц, обнаружение объектов заданной формы.

Указанные программные продукты оставляют необходимость визуального сравнения полученного изображения с электронным эталоном, что является не приемлемым в случае распознавания объектов не регулярной формы, появляющихся в случайных местах.

## *2 ВЫБОР ОБОСНОВАННОГО ВАРИАНТА НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ*

Изучение и анализ состояния действующего производства, объекта и предмета исследования позволили определить проблемы, цель и задачи исследования.

Основными проблемами действующих информационных систем являются:

- 1) отсутствие системы методов комплексного сбора информации о протекании процессов восстановления чугуна, выплавки полупродукта, доводки стали и ее разливки непрерывным способом;
- 2) отсутствие системы математических моделей для получения информации о процессах расплавления и затвердевания расплава на различных этапах производства металлургической продукции;
- 3) недостаточное формализованное описание производственных многостадийных процессов с учетом их декомпозиции на этапы, выявление и классификация возможных целей управления, расширение области применения методов оптимизации;
- 4) отсутствие комплекса пакетов прикладных программ для интеллектуальной поддержки управления металлургическими процессами, выбора новых технологий и конструкций металлургических агрегатов.

**Целью** исследования является создание информационного и математического обеспечения новых комплексных информационных технологий и систем для повышения эффективности управления металлургическими агрегатами.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

- теоретико-информационный анализ агрегатов технологических линий получения металлургической продукции на крупных металлур-

гических предприятиях для определения источников, способов получения и методов обработки информации в АСУ ТП;

– математическое описание процессов тепло- и массопереносов в тонесущих расплавах и кристаллизаторе машин непрерывного литья заготовок, как источников получения информации в ходе вычислительного эксперимента;

– математический анализ изображений серных отпечатков с низкой контрастностью и объектами нерегулярной формы, включающий получение изображения в электронной форме, удаление шумов, сегментацию изображения и классификацию объектов, разработку эргатической подсистемы управления качеством непрерывно-литой заготовки по серному отпечатку темплета.

Для решения указанных задач предполагается использование методов:

– методы системного исследования сложных процессов, функционального моделирования, синтеза и анализа сложных систем;

– методы аналитического и численного решения уравнений Био-Савара-Лапласа, Максвелла, Новье – Стокса;

– методы статистической обработки и анализа данных с учетом временных трендов;

– использование теории графов для оценки структурных связей системы;

– методы аналитического и численного решения уравнений теплопроводности и массопереноса в цилиндрической системе координат с граничными условиями первого и второго рода;

– информационные технологии сбора и хранения данных. Методы аналитического и численного решения уравнение теплопроводности с граничными условиями второго и четвертого рода в декартовой системе координат;

- методы аналитического и численного решения уравнений теплопроводности и массопереноса в цилиндрической системе координат с граничными условиями первого и второго рода;
- информационные технологии сбора и хранения данных;
- методы аналитического и численного решения уравнение теплопроводности с граничными условиями второго и четвертого рода в декартовой системе координат;
- информационные технологии обработки данных с использованием локальных моделей;
- статистические методы распознавания изображений с низкой контрастностью.

В ходе выполнения первого этапа ожидается получить следующие научные результаты:

1. Система информационных и функциональных моделей сложных металлургических процессов, позволяющая выполнить оценку роли элементов металлургического процесса в общей цепочке производства, теоретически обосновать необходимость математического моделирования процессов, выделить информационные потоки и взаимосвязи между ними.
2. Система математических моделей для исследования сложных металлургических процессов, позволяющая провести комплексного теоретическое описание металлургических процессов и выполнить имитационное моделирование в условиях близких к действующему производству.

### *3 ПЛАН ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

Теоретические и экспериментальные исследования проводились по плану, приведенному в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – План проведения теоретических и экспериментальных исследований по теме проекта

<i>Наименование работы</i>	<i>Вид рабо- ты</i>	<i>Планируемые результаты</i>	<i>Сроки проведения</i>	<i>Планируе- мые ре- зультаты</i>
Системный анализ полного цикла металлургических процессов (агломерационно-доменное, сталеплавильное и прокатные производства), включающий исследование информационных и материальных потоков процесса.	Теор.	Информационные и концептуальные модели процессов	16.10.2009 31.10.2009	
Разработка математических динамических моделей процессов химической и механической трансформации материалов в металлургических агрегатах.	Теор.	Формализованное описание процессов химической и механической трансформации материалов	01.11.2009 15.11.2009	
Разработка структурной модели сбора, первичной обработки и хранения структурированной информации, поступающей с металлургических агрегатов.	Теор.	Функциональные и структурные модели движения материальных и информационных потоков	01.11.2009 15.11.2009	
Разработка математической модели тепло-массопереноса в токонесущих расплавах металлургических агрегатов	Теор.	Формализованное описание тепло-массопереноса в токонесущих расплавах	16.11.2009 31.11.2009	

<i>Наименование работы</i>	<i>Вид рабо- ты</i>	<i>Планируемые результаты</i>	<i>Сроки проведения</i>	<i>Планируе- мые ре- зультаты</i>
Разработка математического обеспечения управления информационными потоками сбора, обработки и хранения информации	Теор.	Математическое обеспечение управления информационным и потоками	01.11.2009 15.11.2009	
Разработка математической модели теплового состояния расплава в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок	Теор.	Математическое описание теплового состояния расплава в кристаллизаторе	16.11.2009 01.12.2009	
Разработка модели прямой и обратной связи информационных потоков с различных металлургических агрегатов полного цикла производства металла.	Теор.	Модели прямой и обратной связи информационных потоков	16.11.2009 01.12.2009	
Разработка статистической модели оценки и прогнозирования качества непрерывно-литой заготовки	Теор. Эксп.	Статистическая модель оценки и прогнозирования качества	16.11.2009 01.12.2009	Доклад на конференции



## *4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

### **4.1 Разработка математических динамических моделей процессов химической и механической трансформации материалов в металлургических агрегатах**

Первоначальный анализ процесса показал, что основной проблемой является получение информации о химическом составе продуктов плавки, поскольку данные химического анализа запаздывают в среднем на 40 – 180 минут. За это время чугун направляется на сталеплавильный передел и первоначальная доводка осуществляется по данным предыдущих выпусков. Если получившийся затем продукт не соответствует заявленным свойствам, то он либо сертифицируется под другую марку либо отмечается как брак. Это мешает рациональному планированию производства. Дополнительным фактором, ухудшающим представительность проб чугуна для управления шихтовкой доменных и сталеплавильных агрегатов, является «информационный шум» и искажение данных.

Для управления технологией доменного производства более надежными являются данные химического анализа шлака в совокупности с имеющимися сведениями о его свойствах. Существует возможность расчета состава и свойств конечного доменного шлака еще на этапе выходного контроля аглопроизводства, что также повышает привлекательность шлака в качестве индикатора технологии доменной плавки.

По объективным причинам процесс шлакообразования происходит значительно сложнее, чем плавление металла и зависит от многих факторов, а поэтому и оказывает существенное влияние на результаты работы печи и особенно качество чугуна. Шлак в жидком виде имеет плотность  $\approx 2,7 \text{ т/м}^3$  и вязкость до 150 раз выше, чем у чугуна. Плавление и стекание шлака происходит медленнее чугуна, что является причиной загромо-

ждения межкускового пространства. Для лучшего хода плавки необходимы следующие условия:

- уменьшение количества шлакообразующих и в том числе за счет более полного восстановления оксидных соединений;
- сокращение зоны шлакообразования от начала первичных соединений до состава конечного шлака;
- приближение горизонта начала плавления к области заплечиков;
- обеспечение хорошей жидкотекучести сразу в начале шлакообразования, особенно при повышении основности шлака.

Шлак желательно иметь достаточно основным для обеспечения способности к высокой аккумуляции тепла и переноса его в горн из верхних горизонтов, что приводит к снижению объема газов в распаре и шахте печи, улучшая таким образом условия для противотока и теплообмена. От основности шлака зависит содержание в чугуна: серы, кремния, марганца, др. примесей. Удаление серы из металла в доменной печи является наиболее выгодным по отношению к «внедоменному» и другим способам, кроме удаления ее до доменной плавки. Использование серопоглощающей способности шлака в доменной печи желательно доводить до максимально возможного.

Свойства плавкости шлака не должны мешать восстановлению железа из его оксидов. Когда плавление шлакообразующих начинается в высоких горизонтах печи, образующиеся спеки шихты мешают восстановлению, сокращается объем рабочего пространства для восстановления оксидов газами. Поэтому следует легкоплавкость шлаков и диапазон плавления сводить к минимуму.

Поддержание постоянства шлака по составу в пределах допустимых колебаний обеспечит условия перегрева, а также устойчивость механизма формирования конечного шлака по температуре и составу.

Свойства шлака определяются его химическим составом и минералогическим строением исходных шихтовых материалов. Это предъявляет к нему ряд требований по химическому составу и другим свойствам: температуре плавления, вязкости, поверхностному натяжению и др. Именно от этих свойств зависят обессеривающая способность шлака, содержание в чугуне кремния, ровность хода доменной печи (скорость схода материалов, температура шлака на выпуске, расход горючего, образование сводов и настывлей и др.).

Различают первичный, промежуточный и конечный доменный шлак. Первичный шлак отличается непостоянством химического состава, которое зависит от конфигурации поверхности зоны первичного шлакообразования. Многочисленные исследования процессов шлакообразования в доменных печах, выполненные путем отбора проб материалов по высоте и сечению печей, показали, что состав первичных шлаков и горизонт образования шлака непостоянны. Эти параметры зависят от качества материалов, распределения материалов и газов по сечению печи, расхода горючего, температуры дутья и других факторов. Химический состав первичных шлаков колеблется в пределах: 30 – 40 %  $\text{SiO}_2$ ; 11 – 20 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 27 – 35 %  $\text{CaO}$ ; 1,5 – 6 %  $\text{MgO}$ ; 5 – 8 %  $\text{MnO}$ ; 3 – 18 %  $\text{FeO}$  и 0,1 – 0,7% S. Промежуточный шлак, который образуется в нижней части заплечиков и верхней части горна, имеет химический состав, близкий к составу конечного шлака по содержанию  $\text{SiO}_2$  (35 – 38%) и  $\text{CaO}$  (39 – 45%), но до перехода в шлак составляющих золы кокса и восстановления  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$  на горизонте воздушных фурм и ниже, его состав еще достаточно далек от состава конечного шлака: 5 – 6,5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 2 – 2,5%  $\text{MgO}$ ; 4 – 6%  $\text{MnO}$ ; 0,05 – 0,25  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; 3 – 7%  $\text{FeO}$  и 1 – 1,5% S. Состав конечного шлака зависит от вида выплавляемого чугуна (передельный, литейный, ферросилиций и т.д.). Для наиболее распространенного передельного чугуна характерны следующие интервалы колебаний химического состава конечного шлака: 32 –

40% SiO<sub>2</sub>, 6 – 14% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 32 – 45% CaO, 6 – 15% MgO, 0,1 – 1,5% MnO, ~0,3% FeO, 1 – 2% TiO<sub>2</sub>. При химическом анализе конечного шлака как основные выделяют следующие соединения: SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, FeO, MgO, TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O.

Температурой плавления шлака считается температура, при которой он переходит из анизотропного состояния в изотропное. По причине многокомпонентности доменного шлака эта температура отличается от температуры перехода из твердого состояния в жидкое. Для ведения доменной плавки имеет значение не температура плавления шлака, а температура, при которой шлак может свободно течь (жидкотекучесть шлака). Среди других температурных характеристик доменного шлака следует особо выделить температуры спекания, размягчения и каплеобразования шлаков.

Степень плавкости шлаков характеризуется температурой плавления и текучестью (или вязкостью) в расплавленном состоянии. Эта характеристика оказывает влияние на температуру горна, а, следовательно, на состав чугуна. Считается, что именно вязкость шлака как свойство, имеющее определяющее влияние на доменный процесс. В общем случае вязкость характеризует силу внутреннего трения слоев жидкости, перемещающихся с различными скоростями.

Температура играет важную роль в ходе физико-химических реакций, происходящих в горне доменной печи. Она является функцией состояния, метрологически более изученной, чем большинство других показателей.

Устойчивость нагрева горна является важнейшим технологическим фактором в значительной степени определяющим уровень технико-экономических показателей доменной плавки и качества чугуна. Колебания теплового состояния горна приводят к нарушению ровности схода шихты, снижению интенсивности плавки, вызывают нарушения газораспределения, горение фурм, простой печей. Необходимость поддержания

максимально устойчивого теплового режима печи общепризнанна как практиками, так и исследователями.

В качестве тепловых параметров, непосредственно связанных с нагревом горна, различные авторы среди прочих рассматривают температуры чугуна и шлака на выпуске. Температура чугуна и шлака является комплексным показателем нагрева горна, отражающим тепловой режим печи за определенный промежуток времени. Существующие контактные методы дают возможность производить периодические кратковременные измерения температуры. Одним из самых распространенных бесконтактных методов измерения температуры являются измерения при помощи оптических пирометров.

Для доменных шлаков нет данных о том, как зависит их излучательная способность от химического состава, температуры и длины волны. Непостоянство излучательной способности шлакового расплава обусловливается температурой и химическим составом поверхностной пленки. Это говорит о невозможности на сегодняшний день надежного измерения температуры шлака оптическими методами.

Одним из методов определения температуры чугуна является определение содержания в нем кремния. Однако отмечается, что характер и теснота взаимосвязи между температурой чугуна и содержанием в нем кремния могут значительно изменяться, а в определенных технологических условиях и полностью отсутствовать, так как указано, что этот показатель чувствителен к качеству подготовки (усреднению) шихтовых материалов. Существенное влияние на характер взаимосвязи между температурой чугуна и содержанием кремния оказывает шлаковый режим доменной плавки. В обычных условиях зависимость между содержанием кремния в чугуне и его температурой прослеживается четко.

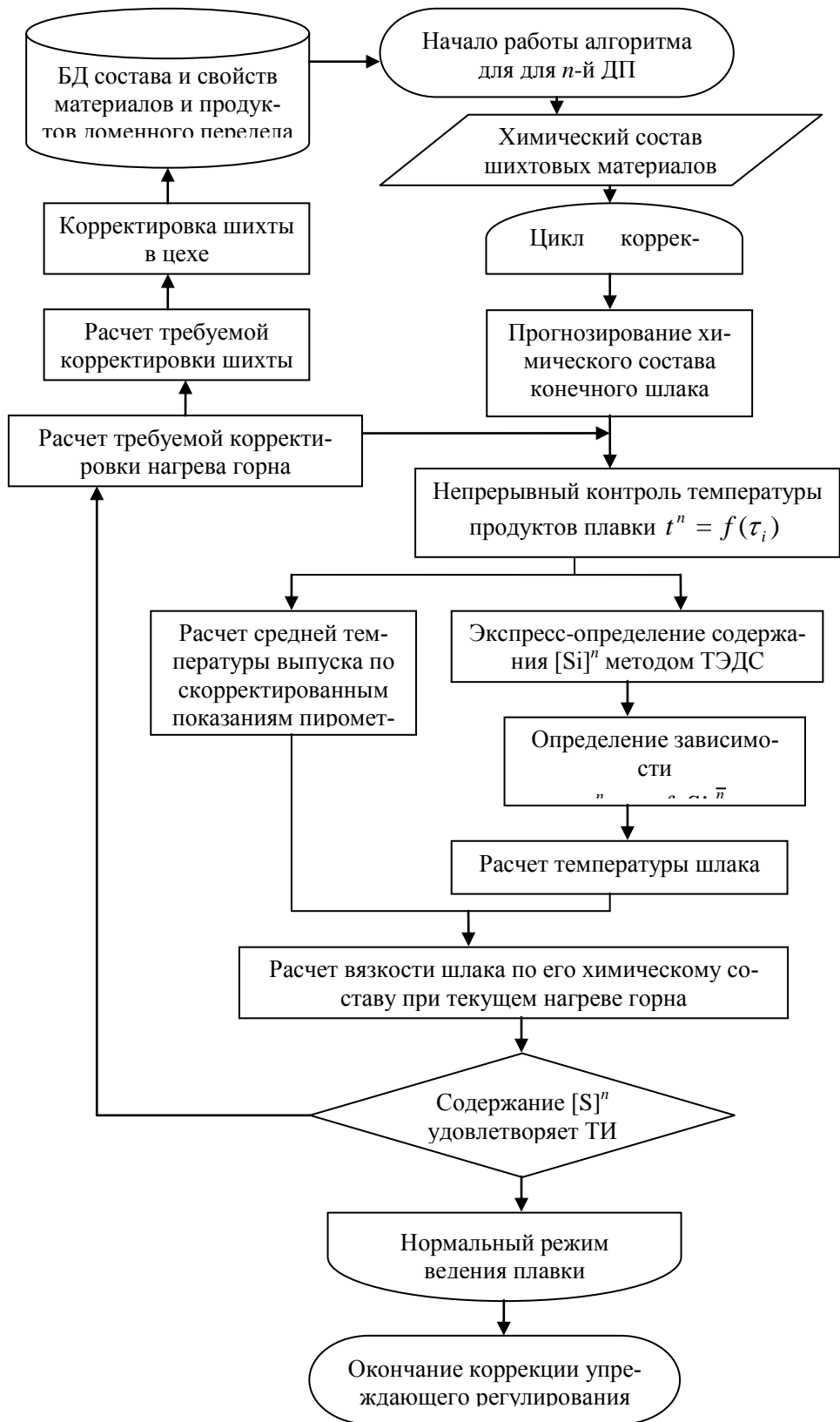
Поставлена первоначальная задача разработать модель, которая могла бы быстро, а главное достоверно предсказывать данные химического

состава чугуна и шлака на основании данных химического анализа сырья (агломерата) и данных о текущем состоянии доменной плавки, для дальнейшего использования в оценке качества готового продукта для сталеплавильного производства и управления доменным процессом.

При равном уровне развития техники, технология доменной плавки продолжает полностью определяться шлаковым режимом. Поддержание постоянства оптимального режима шлакообразования для каждого вида чугуна является исходным условием технологии плавки с получением высококачественного металла.

На основе исследования были определены следующие зависимости параметров плавки с выделением влияющего параметра, которые приведены в таблице 4.1. Таким образом, определены важные параметры, которые оказывают определяющее влияние на настройку модели на конкретный доменный агрегат.

На рисунке 4.1 представлена разработанная на основе экспериментальных исследований блок-схема модели упреждающего регулирования агломерационно-доменного процесса с учетом влияющих параметров.



*Рисунок 4.1 – Алгоритм упреждающего регулирования доменной плавки при стабилизации качества чугуна*

Таблица 4.1 – Зависимости параметров плавки с выделением влияющего параметра

Зависимость	Обозначение
$[S] = f(\eta)$	$[S]$ – содержание серы в чугунае;
$[S] + (CaF_2) = f(\eta)$	$(\eta)$ – вязкость шлака;
$(\eta) = f[Ti]$	$(CaF_2)$ – содержание плавикового шпата в шлаке;
$(\eta) + (CaF_2) = f[Ti]$	$[Ti]$ – содержание титана в чугунае;
$[S] = f(B_1)$	$[Si]$ – содержание кремния в шлаке;
$[S] + (CaF_2) = f(B_1)$	$(B_1), (B_2)$ – простая и комплексная основности шлака
$[S] = f(B_2)$	
$[S] + (CaF_2) = f(B_2)$	$\tau_{\text{выпуска}}$ – время выпуска продуктов плавки;
$\tau_{\text{выпуска}} = f(\eta)$	$[\tau]_{\text{до шлака}}$ – время выпуска чугуна до появления шлака.
$[\tau]_{\text{до шлака}} = f(\eta)$	
$(\eta) = f[Si]$	
$(\eta) + (CaF_2) = f[Si]$	

## 4.2 Разработка математической модели тепломассопереноса в токонесущих расплавах металлургических агрегатов

### 4.2.1 Моделирование электромагнитных полей и ОЭМС в ванне ДППТ

При прохождении электрического тока через жидкую ванну возникают электровихревые течения (ЭВТ), которые оказывают существенное влияние на перемешивание расплава, на протекание в нем тепломассообменных процессов и, в конечном итоге, – на качество выплавляемых металлов и сплавов. Исходя из этого, определение параметров ЭВТ представляет собой важную теоретическую и научно-техническую задачи.

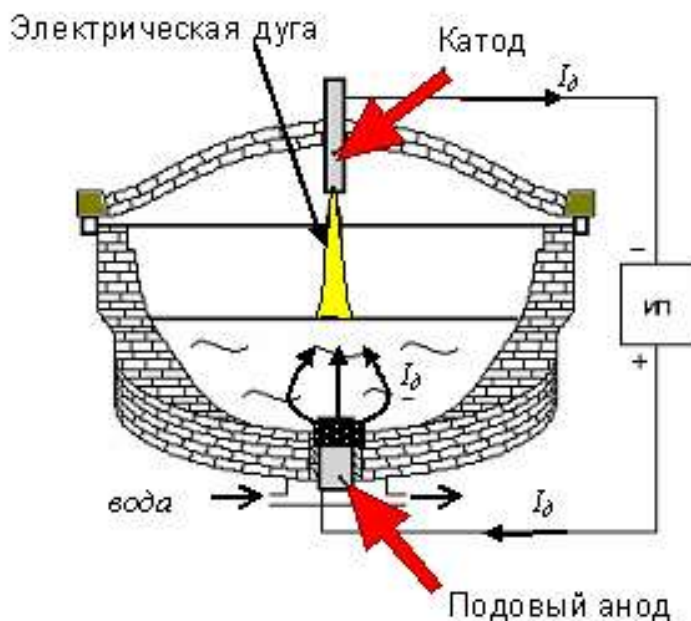
Нахождение параметров ЭВТ в металлургических агрегатах — задача весьма сложная, и ее решение в общем виде (как теоретически, так и экспериментально) не представляется возможным. Однако посредством мате-



матического моделирования можно определить основные факторы, влияющие на ЭВТ, и указать главные направления и пути экспериментального поиска оптимальных технологических режимов и конструкций.

Физической основой ЭВТ является возбуждение объемных электромагнитных сил (ОЭМС), обусловленное взаимодействием электрического тока, подводимого к расплаву от стороннего источника Э.Д.С., с собственным магнитным полем.

В связи с этим возникает необходимость проведения исследований электрических и магнитных полей, образующихся в ванне ДППТ при прохождении через нее электрического тока, распределение плотности тока и ОЭМС по объему расплава. Вначале рассмотрим стандартный и наиболее широко применяемый вариант ванны с токонесущим расплавом, когда используется лишь один анод, расположенный на оси подины ванны (рисунок 4.2).



*Рисунок 4.2 – Дуговая печь постоянного тока с одним подовым электродом, ось которого совпадает с осью ванны*

В данной главе построим математическую и компьютерную модели электромагнитных процессов и ОЭМС, имеющих место в ванне расплава

ДППТ. Определим ОЭМС, которые зависят от ряда факторов: размера токоъемного электрода, силы тока, параметров привязки дуги, внешнего магнитного поля от подводящих токовых шин, а также конструктивных особенностей ванны.

#### 4.2.2 Геометрические характеристики ванны ДППТ

В данном параграфе рассмотрим алгоритм расчета основных геометрических размеров ванны стандартной конфигурации. Знание этих размеров позволит определиться с границами области действия ОЭМС и электровихревых течений.

Для определения основных размеров ванны использовалась методика, принятая для дуговых сталеплавильных печей (ДСП) переменного тока, которую обычно используют и для стандартных дуговых сталеплавильных печей постоянного тока [57 – 60].

Наиболее распространенной является сфероконическая ванна; ее форма и размеры показаны на рисунке 4.3. Исходные данные для определения геометрических размеров ванны приведены в таблице 4.2.

Суммарный объем ванны складывается из объемов:  $V_m$  и  $V_{шл}$  (занимаемых металлом и шлаком) и определяется, исходя из массы  $m_0$  жидкого металла:

$$V_v = V_m + V_{шл},$$

где

$$V_m = m_0 / \gamma_{ж}. \quad (4.1)$$

Если объем шлака  $V_{шл}$  задается, исходя из его количества  $k_{шл}$  (в процентах от  $m_0$ ), то  $V_{шл} = 0,01K_{шл}m_0 / \gamma_{шл}$ , а если, исходя из объема шлаковой ванны (в процентах от объема металлической ванны), то  $V_{шл} = 0,01K_{об\ шл}V_m$ .

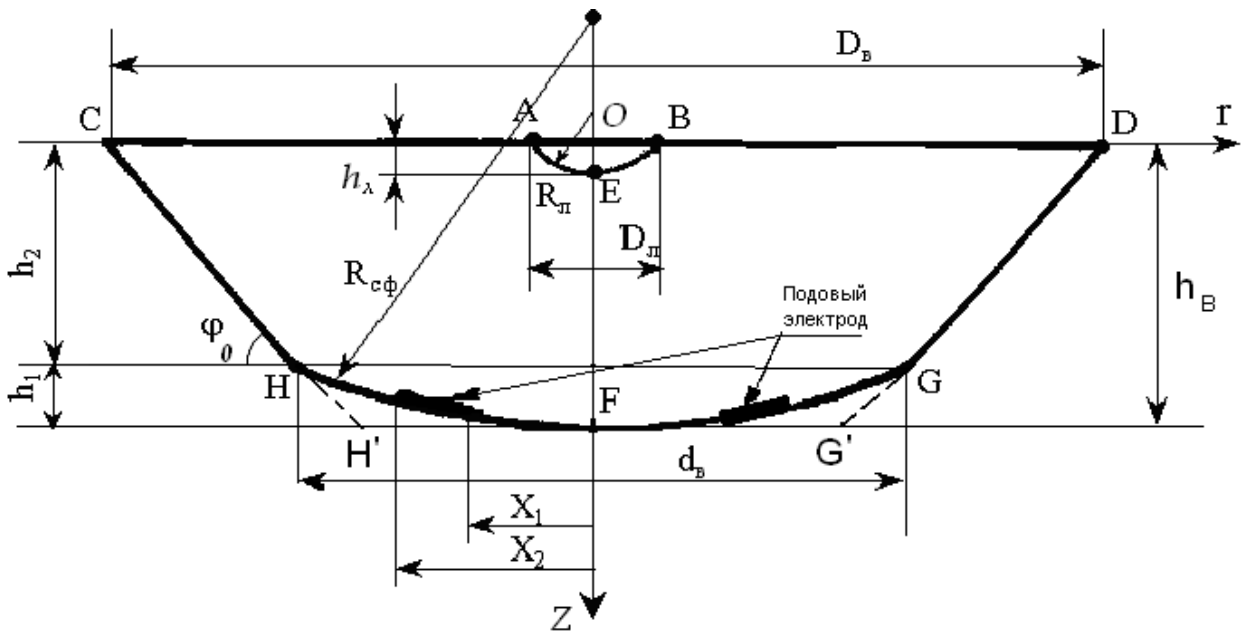


Рисунок 4.3 – Основные размеры ванны дуговой печи:  $AEB$  – область взаимодействия дуги с ванной расплава, имеющая форму части сферы радиусом  $R_{\text{л}}$ ;  $h_{\text{л}}$  – глубина лунки;  $D_{\text{л}}$  – диаметр лунки;  $CD$  – поверхность расплава;  $X_1$  – расстояние от оси печи до ближней границы электрода;  $X_2$  – расстояние от оси печи до дальней границы электрода;  $\varphi_0$  – угол откоса ванны;  $HG$  – подина;  $R_{\text{сф}}$  – радиус сферической части печи;  $D_{\text{в}}$  – диаметр ванны;  $h_1$  – высота сферической части;  $h_2$  – высота конической части;

$h_{\text{в}}$  – высота ванны

Опираясь на исходные данные и принятые геометрические соотношения (см. таблице 2.1), получим основные размеры ванны:

$$D_{\text{в}} = k_{\text{м}} h_{\text{в}} ; \quad (4.2)$$

$$h_1 = K_{\text{ш}} h_{\text{в}} ; \quad (4.3)$$

$$h_2 = h_{\text{в}} - k_{\text{ш}} h_{\text{в}} = h_{\text{в}} (1 - K_{\text{ш}}) ; \quad (4.4)$$

$$d_{\text{в}} = D_{\text{в}} - 2h_{\text{л}} \text{ctg} \varphi_0 = h_{\text{в}} k_{\text{л.м}} - 2(1 - K_{\text{ш}}) \text{ctg} \varphi_0 . \quad (4.5)$$

Объем  $V_{\text{в}}$  ванны с диаметром  $D_{\text{в}}$  зеркала и глубиной  $h_{\text{в}}$  состоит из объема  $V_{\text{к}}$  усеченного конуса  $CHGD$  высотой  $h_2$  и объема  $V_{\text{ш}}$  шарового сегмента  $HFG$  с высотой  $h_1$  и диаметром основания  $d_{\text{в}}$ :

$$V_{\epsilon} = \frac{\pi h_2}{12} (D_{\epsilon}^2 + D_{\epsilon} d_{\epsilon} + d_{\epsilon}^2) + \frac{\pi h_1}{6} \left( \frac{3d_{\epsilon}^2}{4} + h_1^2 \right). \quad (4.6)$$

Таблица 4.2 – Исходные данные для определения размеров ванны

Математ. обозн.	Наименование	Ед. измер.	Примечание
$m_0$	Масса жидкого металла (емкость)	т	Берется из стандартного ряда (по данным Гипрометза) [48, 51]
$\gamma_{ж}$	Плотность жидкого металла	кг/м <sup>3</sup>	Для различного химического состава от 6900 до 7200
$\gamma_{шл}$	Плотность жидкого шлака	кг/м <sup>3</sup>	Для различного химического состава и температуры от 2900 до 3200
$k_m = D_m/h_m$	Соотношение основных геометрических размеров	~	Для малых печей с кислой футеровкой 3,5 ÷ 4,5; для крупных с основной футеровкой 4,5 ÷ 6
$K_{ш} = h_{ш}/h_m$	Доля шарового сегмента в высоте ванны	~	0,2 ÷ 0,25
$\varphi_0$	Угол конической поверхности ванны с горизонталью	град	Обычно 30 - 45°
$K_{шл}, K_{об шл}$	Доля шлака	~	Массовая доля шлака (3 ÷ 7%); Объемная доля (10 ÷ 15%)

С учетом (4.1) – (4.6) получаем расчетную формулу для определения высоты металлической ванны:

$$h_{\epsilon} = k_{\phi} \sqrt[3]{\frac{m_0}{\pi \gamma_{ж}}}, \quad (4.7)$$

где  $k_{\phi}$  – коэффициент, характеризующий форму ванны. Так, если угол откоса равен  $\varphi_0$ , то [61]

$$k_{\phi} = \sqrt[3]{\frac{24}{2(1 - K_{ш})(k_m^2 + k_m k_+ + k_+^2) + 3K_{ш} k_+^2 + 4K_{ш}^3}}, \quad (4.8)$$

где  $k_+ = k_m - 2(1 - K_{ш}) \operatorname{ctg} \varphi_0$ . В частности, при  $\varphi_0 = 45^\circ$ ,

$$k_{\Phi} = \sqrt[3]{\frac{24}{3(2 - K_{uu})k_m^2 - 12(1 - K_{uu})k_m + 4(2 - 3K_{uu} + 2K_{uu}^3)}}. \quad (4.9)$$

Кроме основных размеров важно знать радиус  $R_{c\phi}$  шарового сегмента *HFG* (см. рисунок 4.3):

$$R_{c\phi} = 0,5(0,25d_g^2 + h_1^2)/h_1, \quad (4.10)$$

а также толщину слоя шлака, которую можно оценить, пренебрегая конусностью шлаковой ванны:  $h_{\text{шл}} = V_{\text{шл}}(0,25\pi D_g^2)$ .

Отметим наконец, что стандартные ванны являются геометрически подобными, и потому можно оценить их объем в зависимости от одного из основных ее геометрических размеров. Так, при  $\varphi_0 = 45^\circ$  имеем

$$V_g \approx 12,1h_g^3 \approx 0,0968D_g^3 \approx 0,7744R_g^3.$$

При дальнейшем моделировании с целью упрощения геометрии ванны (см. рисунок 4.3) сферическую ее часть *HFG* заменяем усеченным конусом *HH'G'G*, то есть принимаем  $h_1 = 0$ ,  $h_2 = h_g$ ,

$$d_g = D_g - 2h_g \cdot \text{ctg} \varphi_0.$$

#### 4.2.3 Геометрия подового электрода

Как уже отмечалось, поведение электромагнитных полей в ванне в значительной мере зависит от конструктивных особенностей подового электрода (ПЭ), геометрия которого во многом определяется условиями его охлаждения и номинальной токовой нагрузкой. В данном параграфе рассмотрим алгоритм расчета основных геометрических размеров подового электрода.

На рисунке 4.4 приведены четыре группы используемых в ДППТ подовых электродов-анодов: *FIN* (1) – неохлаждаемые стальные пластины, заложенные вертикально или слегка наклонно в подину (фирма - разработчик VAI); *PIN* (2) – охлаждаемые снизу воздухом штыри, заложенные в подину (SMS); *BILLET* (3) – стальной стержень, заложенный в подину и приварен-

ный к медному водоохлаждаемому цилиндру (Mannesmann Demag); Concast ABB (4) – электропроводящая подина с воздушным охлаждением [62].

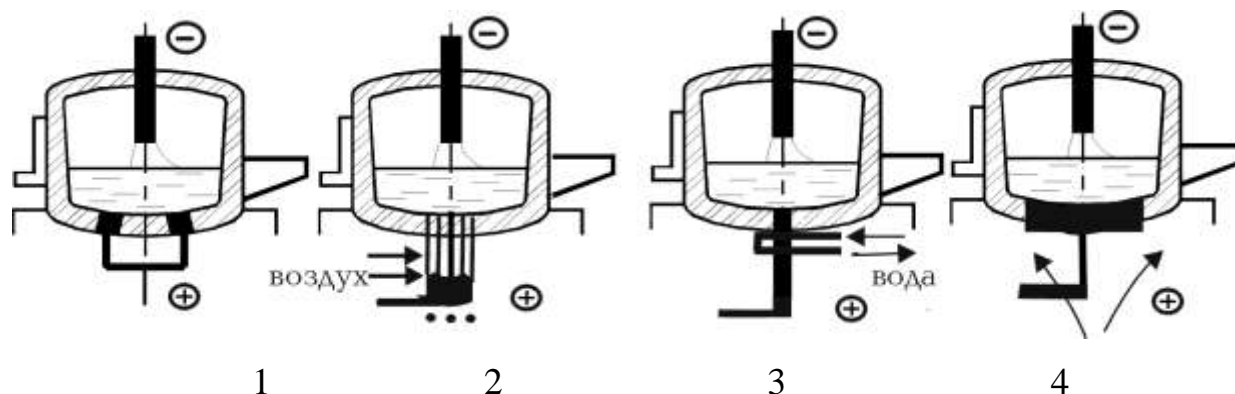


Рисунок 4.4 – Виды подовых электродов

Рассмотрим наиболее часто применяемые электроды первой и третьей групп. На рисунке 4.5 показан подовый электрод первой группы (*FIN*) 120-тонной дуговой печи фирмы Штальверк Тюринген ГмбХ с диаметром ванны 6500 мм, рассчитанный на максимальную силу плавильного тока 115 кА, что составляет максимальную удельную нагрузку во фланце анода в 1 А/мм<sup>2</sup>.

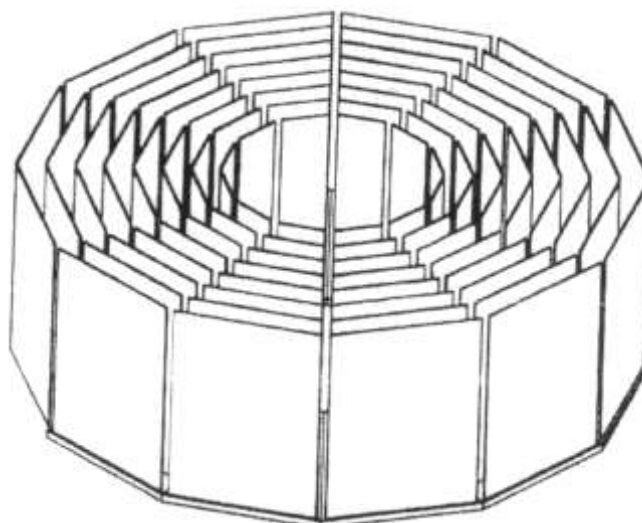


Рисунок 4.5 – Электрод ребристого типа фирмы Штальверк Тюринген ГмбХ [7]

Подвод тока осуществляется через ребра, которые выполнены в виде 12-и сотообразно расположенных пакетов стального листа на многократно

используемой опорной плите. Высота сотов составляет 1100 мм, причем только около 700 мм может быть эффективно использовано в качестве анода. Данный подовый электрод работает без водяного охлаждения. Промежуточное пространство между ребрами заполнено по специальной технологии набивной массой на основе MgO [63].

В печах, спроектированных во ВНИИЭТО и КОМТЕРМ, используются подовые электроды третьей группы (*BILLET*) стержневого или пластинчатого типа. ПЭ стержневого типа представляет собой болванку цилиндрической или цилиндроконической формы, имеющей в нижней части водоохлаждаемый контактный конус и токоподвод.

Электрод пластинчатого типа (рисунок 4.6 а, б) имеет ряд пластин 1, контактирующих с расплавленным металлом и приваренных к боковой поверхности стальной трубы 3, заполненной медью на установке электрошлакового литья..

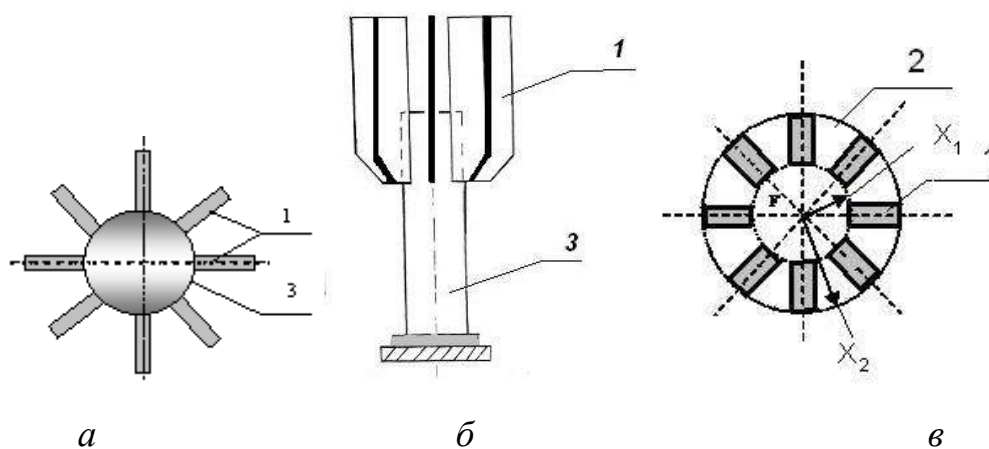


Рисунок 4.6 – Электрод пластинчатого типа: (а) – вид сверху, (б) – вид сбоку, (в) – принимаемая для моделирования форма контакта электрода с расплавом: 1 – токоподводящие пластины; 2 – расчетное токоподводящее кольцо; 3 – боковая поверхность стальной трубы

Часть этого электрода размещается внутри футеровки подины, а его нижний торец выходит за пределы кожуха печи. Каналы водяного охлаждения и токоподвод находятся ниже кожуха печи. Чаще всего пластины

данного электрода после первой же плавки образуют «грибок», который имеет способность самовосстанавливаться

Анализ форм применяемых подовых электродов показывает, что при моделировании ОЭМС и ЭВТ следует считать, что ось электрода совпадает с осью ванны, а поверхность его контакта с расплавом имеет форму кольца с внутренним и внешним радиусами  $X_1$  и  $X_2$  соответственно (рисунок 4.6, в). При  $X_1=0$  подовый электрод соответствует круглому аноду стержневого типа радиуса  $R_a$ .

По известной величине  $m_0$  можно (по данным Гипромеца [58]) определить номинальный ток  $I_d$  дуги, далее задавая плотностью тока  $J_a$  в районе подового электрода, – оценить площадь  $S_a$  его поверхности, соприкасающейся с расплавом, что позволит подобрать его размеры  $X_1$  и  $X_2$ :

$$S_a = I_d / J_a = \pi(X_2^2 - X_1^2). \quad (4.11)$$

Величина  $J_a$  выбирается в зависимости от условий охлаждения и составляет от 0,05 до 1 А/мм<sup>2</sup> [63, 64].

#### 4.2.4 Воздействие дуги на расплав в условиях ДППТ

С увеличением емкости и мощности ДППТ силовое воздействие дуги на расплав возрастает. Это объясняется тем, что увеличение мощности печей происходит за счет опережающего роста силы тока, а не напряжения. Особенностью сильноточной дуги является образование под дугой в расплаве мениска (лунки).

Дуга – мощный источник теплового излучения и при образовании мениска ее излучение экранируется металлом и шлаком, при этом передача тепла от дуги непосредственно металлу увеличивается. Она обладает малой массой, но весьма сильно реагирует на действие электромагнитного поля (как собственного, так и постороннего). Область пятна дуги является местом токоподвода для нашей области исследования – ванны с электропроводным расплавом. В районе привязки дуги создаются условия для



дальнейшего растекания тока по ванне, которое во многом формирует появление и характер электровихревых течений.

Столб вертикально горящей дуги представляет собой усеченный конус, верхним основанием которого служит катодное пятно радиуса  $r_k$ . При достаточной длине дуги конус плавно переходит в цилиндр радиуса  $r_0$ . Длина конического (начального участка)  $l_{кон}$  увеличивается с ростом тока и для дуг ДППТ она составляет небольшую часть общей длины дуги  $l_0$  [65].

Расплав подвергается действию ряда сил, вызывающих его движение под пятном дуги. Среди них основную роль играют объемные электромагнитные силы  $F_{эм}$  в ванне и газодинамическая сила  $F_D$ . Опишем их.

*Объемные электромагнитные силы  $F_{эм}$*  действуют непосредственно в расплаве и создаются собственным электромагнитным полем токов при растекании их по ванне. Они зависят от величины тока  $I_0$ , конфигурации ванны, расположения токоподводов, электропроводимости расплава и других факторов, определяющих электромагнитную обстановку в ванне [66, 67]. ОЭМС вызывают ЭВТ жидкости под пятном дуги, отводя перегретый расплав вглубь жидкости, и этим оказывают лишь косвенное влияние на рассматриваемые нами геометрические и электрические характеристики привязки дуги к расплаву. При определении геометрических параметров привязки дуги эти силы учитывать не будем.

*Газодинамическая сила  $F_D$*  обуславливается газодинамическим напором  $P_D$  потока дуговой плазмы на поверхность расплава [66, 67]. В свою очередь, он определяется воздействием микроскопических потоков плазмы, что приводит к появлению трех составляющих давления: динамической  $P_d$ , статической  $P_s$ , дополнительной  $P_{дон}$ .

Таким образом,

$$P_D = P_d + P_s + P_{дон}. \quad (4.12)$$

*Динамическая* (или скоростная) составляющая давления  $P_d$  определяется режимом горения дуги (ее током, длиной  $l_0$  и др.) и связана с воздействием потока плазмы на поверхность ванны. Начальная коническая часть дуги действует подобно электромагнитному насосу [66], засасывая газ из окружающей среды и прогоняя его через столб по направлению к аноду, причем производительность этого насоса растет с ростом тока [65].

Известно, что основным фактором возникновения течения плазмы в дуге является взаимодействие тока с собственным магнитным полем [68]. Давление при воздействии дуги на расплав можно оценить как [66, 67]

$$P_d = \frac{\gamma_z W_z^2}{2}, \quad (4.13)$$

где  $\gamma_z$ ,  $W_z$  – средние плотность и скорость движения ионизированного газа соответственно при столкновении его с анодным пятном. Как показано в работе [65], локальный расход газа в проводящей зоне столба дуги изменяется в относительно узком диапазоне. Этот факт позволяет считать, что во всем объеме столба дуги  $\gamma_z W_z = c = const$ . Данная константа определяется производительностью электромагнитного насоса по перекачке газа через столб дуги и зависит только от тока  $c \sim I_0$ . С учетом этого выражение (4.13) можно записать как

$$P_d = \frac{c^2}{2\gamma_z} \sim I_0^2. \quad (4.14)$$

*Статическая* составляющая давления  $P_s$  имеет электромагнитную природу, а значит, существенно зависит от тока дуги. Он создает собственное магнитное поле, и в соответствии с законом Ампера на него действует электромагнитная сила, направленная по радиусу от внешней поверхности столба дуги к его оси (пинч-эффект). Величину  $P_{сж} = P_d + P_s$  в предположении равномерного распределения тока  $I_0$  по сечению столба дуги, согласно

[66, 69, 70], можно записать как

$$P_{сж} = \mu_0 \left( \frac{I_{\partial}}{2\pi r_0} \right)^2 \cdot \left( 1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right), \quad (4.15)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ В} \cdot \text{с}/(\text{А} \cdot \text{м})$  – универсальная магнитная постоянная;  $r$  – расстояние до оси дуги.

Как и принято во многих исследованиях, например, [59, 66], будем считать, что давление, вызванное сжимающим эффектом, аналогично гидростатическому давлению в газовой среде, и потому сила, появляющаяся за счет него, будет действовать не только в радиальном, но и в аксиальном направлении. Таким образом, создается особая сила, действующая на электродные пятна дуги: на катод и на зеркало ванны. Ее величину можно получить из (4.15) интегрированием:

$$F_{сж} = \int_0^{r_0} P_{сж} 2\pi r dr = \frac{\mu_0 I_{\partial}^2}{8\pi} \approx \phi I_{\partial}^2, \quad (\text{Н}). \quad (4.16)$$

где  $\phi = 5 \cdot 10^{-8} (\text{Н}/\text{А}^2)$ .

*Дополнительное давление*  $P_{дон}$ , как и  $P_{сж}$ , имеет электромагнитную природу. Оно появляется при уширении столба дуги, а также при нарушении симметрии поля, например, в результате случайного отклонения дуги. В этом случае происходит сгущение магнитных линий в одном месте и разрежение в другом. Это приводит к возникновению дополнительной силы  $F_{дон}$ , направленной в сторону разрежения магнитных линий, стремящейся устранить асимметрию поля и вернуть дугу в положение, соосное с вертикальным катодом [66]. А поскольку при горении дуги между катодом и жидким расплавом в ДППТ наблюдается расширение сечения столба дуги (сначала от  $r_k$  до  $r_0$  и далее до  $r_{п}$ ), то это приводит к появлению осевой составляющей силы, направленной от меньшего к большему сечению дуги. В монографии Окорокова Н.В. [59] предлагается следующая оценка этой дополнительной силы:

$$F_{\text{дон}} = \phi I_{\text{д}}^2 \ln \left( \frac{r_{\text{п}}}{r_0} \right) \quad (\text{H}), \quad (4.17)$$

где  $r_{\text{п}}$  – радиус анодного пятна дуги.

Таким образом, рассматривая совместно (4.16) и (4.17), можно получить выражение для полной газодинамической силы:

$$F_D = F_d + F_{\text{сж}} + F_{\text{дон}} = \phi I_{\text{д}}^2 \left[ 1 + \ln \left( \frac{r_{\text{п}}}{r_0} \right) \right]. \quad (4.18)$$

В реальной дуге ток, а значит, и давление, распределены неравномерно по сечению. Поэтому формула (4.18) имеет лишь оценочный характер.

Величину  $F_D$  можно получить и по-другому. Как показали экспериментальные исследования [67, 71], распределение давления по радиусу пятна нагрева описывается кривой Гаусса:

$$P_D(r) = P_{D0} e^{-k_s r^2}, \quad (4.19)$$

где  $P_{D0}$  – осевой газодинамический напор,  $k_s$  – коэффициент сосредоточенности; в работе [71] установлено, что  $k_s$  уменьшается с увеличением тока и длины дуги и составляет от  $35 \text{ см}^{-2}$  до  $110 \text{ см}^{-2}$ . Интегрирование выражения (4.19) по площади воздействия дуги на расплав и дает величину суммарного силового воздействия дуги:

$$F_D = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\infty} P_{D0} e^{-k_s r^2} r \cdot dr = \frac{\pi}{k_s} P_{D0}. \quad (4.20)$$

В работе [72] экспериментально получено, что максимальное давление в дуге пропорционально квадрату силы тока (рисунок 4.7):  $P_{D0} = k' I_{\text{д}}^2$ , где  $k'$  - коэффициент пропорциональности ( $\text{Па}/\text{А}^2$ ), зависящий от условий горения дуги и ее длины. Итак, имеем

$$F_D = \frac{k' \pi}{k_s} I_{\text{д}}^2 = k I_{\text{д}}^2. \quad (4.21)$$

Полученное на экспериментальной основе выражение (4.21), а также теоретическая оценка (4.18), показывают, что силовое воздействие дуги на

расплав пропорционально квадрату силы тока:  $F_D = kI_0^2$ . Его физический смысл состоит в том, что это воздействие определяется, прежде всего, электромагнитными силами.

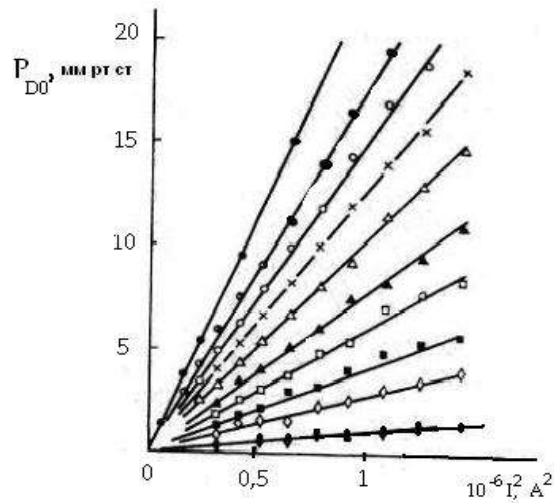


Рисунок 4.7 – Зависимость максимального давления в дуге от квадрата силы тока при различных расстояниях между электродами [72]

Механическое воздействие электрической дуги на расплав приводит к тому, что она заглубляется в него на высоту  $h_n$  (рисунок 4.8), то есть происходит деформация зеркала ванны с образованием вогнутого мениска (лунки). При этом наиболее вероятной формой места соприкосновения дуги с жидкостью считается шаровой сегмент, поскольку оценить форму лунки визуально или с помощью фотосъемки не представляется возможным [70]. Полученные соотношения (4.18), (4.21) позволяют оценить геометрические параметры лунки.

Жидкий металл вытесняется давлением дуги до тех пор, пока система дуга – расплав не придет в равновесие: давление на металл со стороны дуги уравнивается гидростатическим давлением столба жидкости. Поэтому

$$\frac{F_D}{S_n} = \gamma_{жс} V_l \approx \gamma_{жс} g h_l, \quad (4.22)$$

где  $\gamma_{жс}$  — плотность расплава.

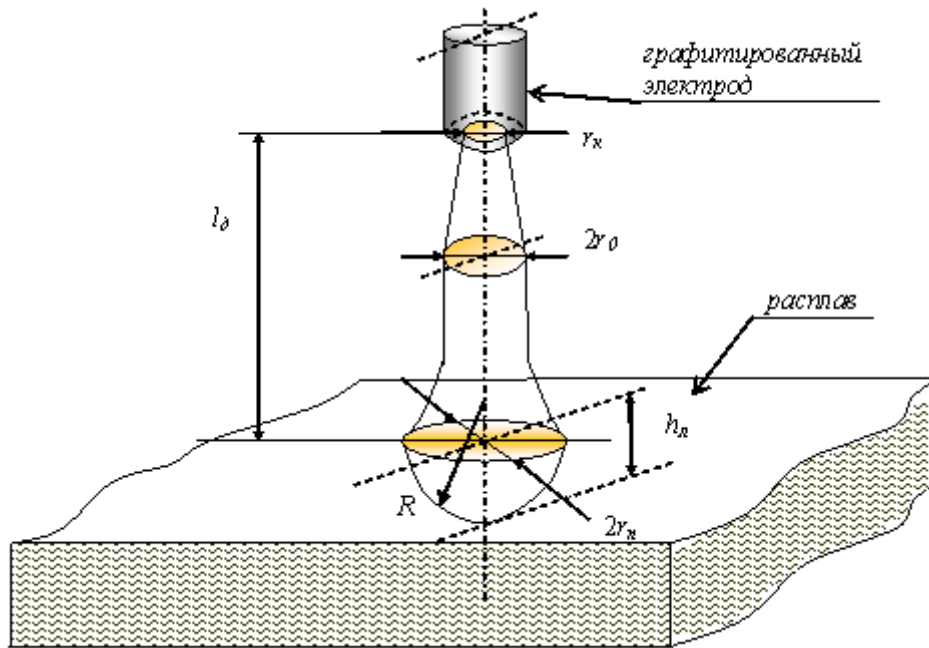


Рисунок 4.8 – Основные геометрические характеристики при воздействии дуги на расплав

Объем вытесненной жидкости

$$V_n = \frac{1}{6} \pi h_n (r_n^2 + h_n^2) = \frac{1}{3} \pi h_n^2 (R - h_n),$$

где  $R$  – радиус шарового сегмента (см. рисунок 4.8). Зная из экспериментальных данных среднюю плотность тока в анодном пятне, можно оценить

площадь пятна дуги:  $S_n = \pi r_n^2 = \frac{I_\Delta}{J_n} = \pi r_n^2$  и его радиус:

$$r_n = \sqrt{\frac{I_\Delta}{\pi J_n}}. \quad (4.23)$$

Для сталеплавильных печей (согласно экспериментальным данным [69, 73])  $J_n = 5-10$  А/мм<sup>2</sup>. Отсюда с учетом (4.18), (4.22), (4.23) находим зависимость глубины лунки от тока дуги:

$$h_n = \frac{F_D J_n}{I_\Delta \gamma_{жс} g} \approx \frac{\phi J_n I_\Delta}{\gamma_{жс} g}. \quad (4.24)$$

Видим, что  $h_n$  при постоянных  $J_n$  и  $\gamma_{жс}$  пропорциональна току дуги  $I_\Delta$  и может быть оценена по формуле (4.24) как  $h_n \approx k_n I_\Delta$ . В частности, для

жидкой стали ( $J_{\text{п}}=5 \text{ А/мм}^2$ ,  $\gamma_{\text{ж}}=7500 \text{ кг/м}^3$ ) коэффициент пропорциональности  $k_h \approx 3 \text{ мм/кА}$ . Эта оценка совпадает с экспериментальными данными, полученными для дуг мощных ДСП [18].

Заметим, что полученное нами равенство (4.24) позволяет оценить величину  $h_{\text{л}}$  и при других значениях плотности тока (при использовании обжатой дуги в плазменных печах), а также при изменении плотности расплава (в процессе его нагрева).

Для условий горения дуги в ДСП и ДППТ можно оценить размеры лунки, зная ток в кА, как:

$$r_{\text{п}} \approx 8\sqrt{I_{\text{д}}} \text{ мм}, \quad (4.23, \text{ а})$$

$$h_{\text{л}} \approx 3I_{\text{д}} \text{ мм}. \quad (4.24, \text{ а})$$

Отметим также, что размеры области действия дуги относительно невелики по сравнению с размерами ванны и длиной дуги (так, при токе  $I_{\text{д}} = 10 \text{ кА}$  имеем  $h_{\text{л}} = 30 \text{ мм}$ ,  $r_{\text{п}} = 25,3 \text{ мм}$ ).

#### 4.2.5 Математическая модель распределения потенциалов и токов в ванне

Для того чтобы определить ОЭМС, необходимо знать распределение плотности тока в ванне. Поскольку экспериментальное исследование электрических полей на ДППТ не представляется возможным, то будем изучать их посредством математического моделирования. В данном параграфе построим математическую модель распределения потенциалов и токов в ванне ДППТ.

При исследовании распределения тока в массивных проводниках обычно применяются методы, используемые для расчета электромагнитных полей, источниками которых служат электрические заряды и токи. Если распределение зарядов определяется скалярной величиной  $\rho_e$  (объемной плотностью зарядов), а распределение токов – вектором плотности тока  $\vec{J}$ , то электромагнитное поле можно описать уравнениями Максвелла [74, 75]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial \tau} + \vec{J}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial \tau}, \\ \operatorname{div} \vec{D} = \rho_e, \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0. \end{array} \right. \quad (4.25)$$

Будем считать, что поля стационарны или медленно меняются, являясь квазистационарными, поэтому токи смещения  $\partial \vec{D} / \partial \tau$  незначительны по сравнению с токами проводимости  $\vec{J}$ , и ими можно пренебречь [74]. В металлургической ванне обрабатываемые материалы (расплавы металла и шлака) являются средами с высокой электропроводностью, поэтому свободные заряды в расплаве отсутствуют ( $\rho_e = 0$ ).

Электромагнитное поле в общем случае определяется четырьмя векторными величинами:  $\vec{H}$ ,  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{D}$  – напряженностей магнитного и электрического полей и индукций магнитного и электрического полей соответственно. При этом  $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$ ,  $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$ , где  $\varepsilon$  и  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды. Для расплавов металлов и шлаков  $\varepsilon$  и  $\mu$  – константы, причем  $\mu \approx 1$ , и, следовательно, векторы  $\vec{H}$  и  $\vec{E}$  отличаются от  $\vec{B}$  и  $\vec{D}$  постоянными множителями. Поэтому можно считать, что электрические и магнитные поля определяются не четырьмя векторами, а лишь двумя, например,  $\vec{H}$  и  $\vec{E}$ , чего и будем придерживаться в дальнейшем.

Принятые допущения позволяют систему уравнений (4.25) представить в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} = 0, \\ \operatorname{div} \vec{E} = 0, \\ \operatorname{div} \vec{H} = 0. \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (4.26) \\ (4.27) \\ (4.28) \\ (4.29) \end{array}$$



Этой системой уравнений Максвелла (4.26) – (4.29) и будем пользоваться в дальнейшем при изучении электромагнитных процессов в ванне.

При нахождении электрических полей в ванне расплава воспользуемся уравнением непрерывности и законом Ома для медленно движущейся среды [76]:

$$\operatorname{div} \vec{J} = 0, \quad (4.30)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \mu_0 \vec{W} \times \vec{H}, \quad (4.31)$$

где  $\vec{W}$  - вектор скорости токонесущего расплава. При токах проходящих через расплав порядка  $I \sim 10^3$  А напряженность магнитного поля порядка  $H \sim I/L \sim 10^3$  А/м, где  $L \sim 1$  м - характерный размер. Скорости электровихревого течения расплава в большем объеме ванны не превышают 1 мм/с. Оценивая по порядку величины модуль вектора  $|\mu_0 \vec{W} \times \vec{H}| \sim 10^{-6}$  В/м, при этом напряженность электрического поля для расплавленных металлов ( $\sigma \sim 10^6$  Ом·м)  $E \sim I/(\sigma L^2) \sim 10^{-3}$ . Таким образом, в выражении (2.31) вторым членом суммы можно пренебречь. Считаем, что среда однородная  $\sigma = const$  и рассматривая совместно (4.30 – 4.31) получим  $\operatorname{div} \vec{E} = 0$ . Учитывая, что  $\vec{E} = -\operatorname{grad}(U)$  получим уравнение Лапласа для электрического потенциала  $\nabla^2 U = 0$ . Запишем его в цилиндрической системе координат [77]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} = 0. \quad (4.32)$$

Упростим его. Из осевой симметрии следует, что составляющая электрического поля  $E_\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \varphi} = 0$ , поэтому получим

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (4.33)$$

Уравнение (4.33) дополним граничными условиями, отражающими характер протекания тока от пятна дуги до подового анода. При этом, исходя из осевой симметрии, составим их для половины сечения ванны, то

есть для области  $EFGBDE$  (см. рисунок 4.3), включающей в себя границы ванны, подовые электроды, пятно дуги и ось ванны.

На основании закона сохранения заряда можно утверждать, что суммарный ток, входящий через граничную поверхность, равен количеству тока, выходящего через нее. Отсюда следует, что нормальная составляющая плотности тока при переходе через поверхность раздела не меняется [16]:  $J_n = J'_n$ , и, с учетом закона Ома  $j_n = \sigma E_n$ , получим  $\sigma E_n = \sigma' E'_n$  или

$$\sigma \frac{\partial U}{\partial n} = \sigma' \frac{\partial U'}{\partial n}, \quad (4.34)$$

где  $\sigma$ ,  $\sigma'$  – проводимости жидкого расплава и граничащей с ним среды соответственно.

На керамических границах ванны и на свободной поверхности расплава, где  $\sigma' \ll \sigma$ , будем считать  $\sigma' = 0$ . Тогда из (4.34) следует

$$\frac{\partial U}{\partial n} = 0. \quad (4.35)$$

Исходя из (4.35), имеем:

на боковых откосах ванны (рисунок 4.9)

$$\frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{\frac{d_e}{2} \leq r \leq \frac{D_e}{2}} \cos \varphi_0 + \frac{\partial U}{\partial r} \Big|_{\frac{d_e}{2} \leq r \leq \frac{D_e}{2}} \sin \varphi_0 = 0; \quad (4.36)$$

на подине ванны

$$\frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{0 \leq r \leq \frac{d_e}{2}} = 0; \quad (4.37)$$

на свободной поверхности расплава

$$\frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{r_n \leq r \leq \frac{D_e}{2}} = 0. \quad (4.38)$$

Кроме того, из свойств осевой симметрии на оси ванны получаем

$$\frac{\partial U}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (4.39)$$

Осталось определить граничные условия (ГУ) на пятне дуги и подом электроде. Распределение тока по сечению дуги крайне неравномерное, по данным Н.Н. Рыкалина [77]

$$J_z = J_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_n^2}\right).$$

Видим (рисунок 4.9), что плотность тока  $J_z$  имеет максимальное значение на оси столба дуги  $J_0$  и уменьшается по мере удаления от нее. Поэтому помимо (4.34) необходимо добавить условие для касательной составляющей напряженности электрического поля на поверхности раздела. Согласно [72] она должна оставаться постоянной:  $E_\tau = E'_\tau$ , и потому можно записать

$$\frac{J_\tau}{\sigma} = \frac{J'_\tau}{\sigma'}.$$

Отсюда имеем зависимость плотности тока в расплаве от плотности тока в газовой фазе:

$$J_\tau = \frac{\sigma_\tau}{\sigma'} J'_\tau. \quad (4.40)$$

Видим, что касательная составляющая плотности тока  $J_\tau$  при переходе через границу скачкообразно меняется на величину, равную отношению проводимости сред.

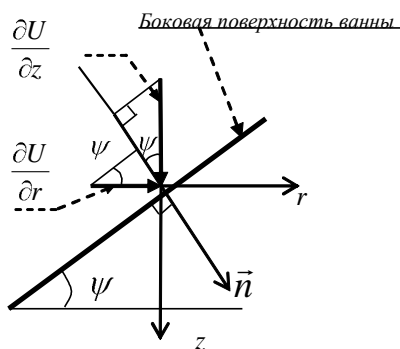


Рисунок 4.9 – Граничное условие на боковой поверхности ванны

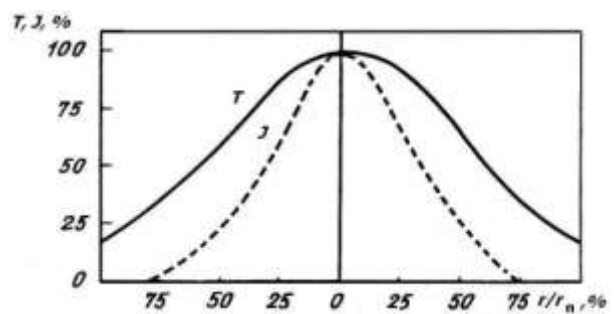


Рисунок 4.10 – Распределение температуры  $T$  и плотности тока  $J$  по радиусу дуги

Экспериментально установлено [70], что плотность тока в столбе дуги описывается кривой Гаусса (см. рисунок 4.10), однако это обстоятельство не вносит принципиальных изменений в характер ЭВТ в ванне. Кроме того, известно, что в условиях ДППТ практически все джоулево тепло выделяется в столбе дуги, а не в жидком металле, из-за того, что проводимость металла существенно выше ( $\sigma \sim 10^6 \text{ Фм} \cdot \text{м}^{-1}$ ), чем проводимость столба дуги ( $\sigma \sim 10^2 \text{ Фм} \cdot \text{м}^{-1}$ ). Поэтому потенциал  $U_n$  вдоль достаточно хорошо проводящей поверхности расплава практически не меняется, и на границе можем принять

$$U|_{0 \leq r \leq r_n} = \text{const}. \quad (4.41)$$

Если известна средняя плотность тока в пятне дуги  $J_n$ , то можно оценить радиус пятна дуги  $r_n$  по формуле (4.23) и с учетом (4.41) на поверхности лунки имеем граничное условие Неймана:

$$\frac{\partial U}{\partial n} \Big|_{0 \leq r \leq r_n} = -\frac{J_n}{\sigma}, \quad (4.42)$$

где  $\vec{n}$  – нормаль к поверхности пятна.

Конструкция токоподвода в ванне такова, что подовый электрод и контактирующий с ним расплав имеют одинаковый химический состав и могут отличаться друг от друга только фазовым состоянием. Это означает, что их проводимости близки между собой, и можно принять на границе  $\sigma = \sigma'$ .

В этом случае, использование условия (4.40) приводит к выражению  $J_r = 0$ , которое, в свою очередь, дает  $U = \text{const}$ . Электрический потенциал определен с точностью до константы, следовательно, не нарушая общности, можем на подовом электроде записать (граничное условие Дирихле):

$$U|_{x_1 \leq r \leq x_2} = 0. \quad (4.43)$$

Можно использовать условие (2.34), которое примет вид:

$J_n(r) = -\sigma \frac{\partial U}{\partial n}$ . А так как  $\frac{\partial U}{\partial n} = \frac{\partial U}{\partial z}$ , то на подовом электроде можно записать (граничное условие Неймана):

$$\left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{x_1 \leq r \leq x_2} = -\frac{4I_\delta}{\sigma\pi(X_2^2 - X_1^2)}. \quad (4.44)$$

Краевая задача (4.33) – (4.44) представляет собой модель распределения потенциалов в ванне ДППТ. В дальнейшем будем решать эту задачу, находя функцию  $U(r; z)$ . А пока скажем, что, зная  $U(r, z)$ , можно определить значения напряженности электрического поля:  $\vec{E} = E_r + E_z$ ,

$$E_r = -\frac{\partial U}{\partial r}, \quad (4.45)$$

$$E_z = -\frac{\partial U}{\partial z} \quad (4.46)$$

и модуль вектора напряженности электрического поля  $|\vec{E}| = \sqrt{E_r^2 + E_z^2}$ . При этом, пользуясь законом Ома, можно определить плотность тока  $\vec{J} = \sigma\vec{E}$  и его проекции

$$J_r = \sigma E_r, \quad (4.47)$$

$$J_z = \sigma E_z, \quad (4.48)$$

где  $\sigma = \rho^{-1}$ ,  $\rho$  – удельная проводимость и удельное сопротивление расплава соответственно. Наконец, поскольку  $E_\varphi = -\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \varphi} = 0$ , то

$$J_\varphi = \sigma E_\varphi = 0.$$

#### 4.2.6 Математическая модель распределения магнитного поля в ванне ДППТ

Для определения напряженности магнитного поля в произвольной точке ванны ДППТ воспользуемся уравнением Био-Савара-Лапласа в дифференциальной форме:

$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dV}{R^3} \vec{J} \times \vec{R}, \quad (4.49)$$

где  $dV$  – элемент объема;  $\vec{R}$  – радиус-вектор, направленный от элемента проводника к рассматриваемой точке.

Пусть  $\vec{e}_r, \vec{e}_z, \vec{e}_\varphi$  – орты цилиндрической системы координат. Как было показано выше, составляющая плотности тока  $\vec{J}_\varphi = 0$ , поэтому вектор плотности тока  $\vec{J}$  имеет осевую  $J_z \vec{e}_z$  и радиальную  $J_r \vec{e}_r$  компоненты. Рассмотрим влияние каждой из них на вектор напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ .

*Роль осевой компоненты плотности тока.* Возьмем произвольную точку  $A$  ванны и определим в ней значение напряженности магнитного поля  $\vec{H}_A$  под действием осевой компоненты плотности тока  $J_z$ . Для этого через ось  $Oz$  и точку  $A$  проведем плоскость  $OzA$  (рисунок 4.11), и пусть  $C$  — точка, через которую протекает ток  $J_z$ . Вектор  $\vec{R} = \vec{CA}$  можно записать в виде  $\vec{R} = \vec{r}_1 + \vec{r}_2$ , где  $\vec{r}_1$  параллелен оси  $Oz$ , а вектор  $\vec{r}_2$  лежит в плоскости  $rOA$ , перпендикулярной плоскости  $OzA$ .

$$d\vec{H}_c = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dV}{R^3} \vec{J}_z \times \vec{R} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dV}{R^3} \vec{J}_z \times (\vec{r}_1 + \vec{r}_2) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dV}{R^3} \vec{J}_z \times \vec{r}_1 + \vec{J}_z \times \vec{r}_2,$$

откуда ввиду параллельности  $J_z \vec{e}_z$  и  $\vec{r}_1$  получаем

$$d\vec{H}_c = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dV}{R^3} \vec{J}_z \times \vec{r}_2. \quad (4.50)$$

Возьмем теперь точку  $C'$ , симметричную точке  $C$  относительно плоскости  $OzA$ , и найдем напряженность магнитного поля  $d\vec{H}_{C'}$  в точке  $A$ , вызванную током, протекающим через точку  $C'$ . Аналогично предыдущему получим

$$d\vec{H}_{C'} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dV}{R'^3} \vec{J}'_z \times \vec{R}' = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dV}{R'^3} \vec{J}'_z \times \vec{r}'_2.$$

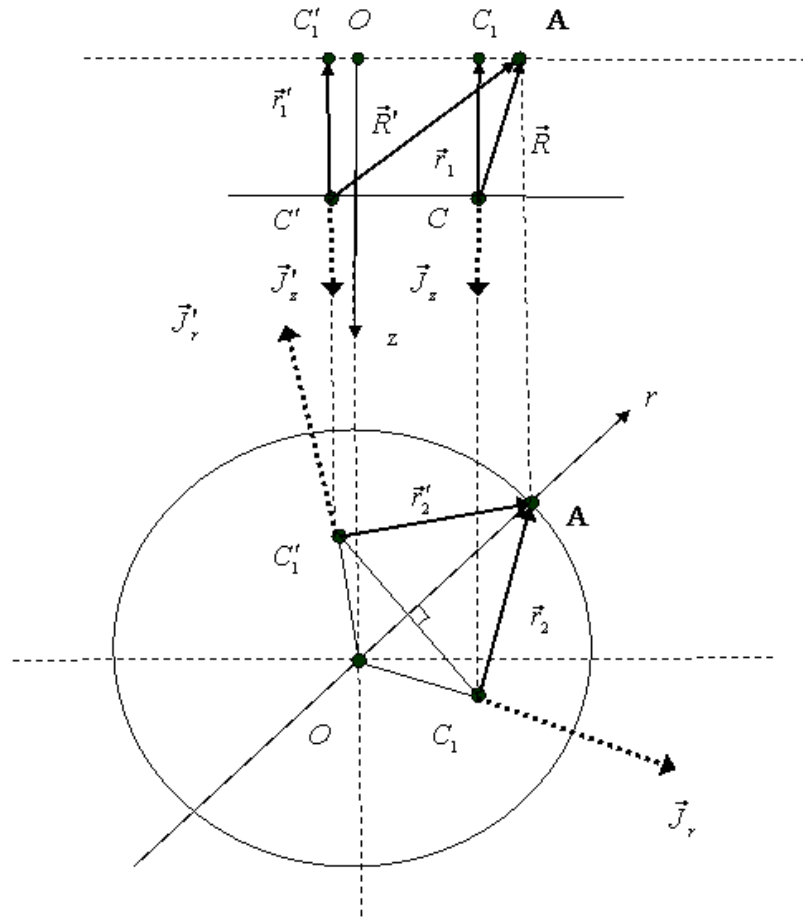


Рисунок 4.11 – Схема действия осевой и радиальной компоненты тока

Поэтому суммарная напряженность магнитного поля в точке  $A$ , обусловленная токами, протекающими через точки  $C$  и  $C'$  (с учетом равенств  $J_z = J'_z$  и  $|\vec{R}| = |\vec{R}'|$ )

$$d\vec{H}_C + d\vec{H}_{C'} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dV}{R^3} \vec{J}_z \times \vec{r}_2 + \vec{J}_z \times \vec{r}'_2 = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dV}{R^3} \vec{J}_z \times (\vec{r}_2 + \vec{r}'_2).$$

Вектор  $\vec{r}_3 = \vec{r}_2 + \vec{r}'_2$  направлен вдоль прямой  $OA$  (ось  $r$ ). Поэтому предыдущее равенство дает только азимутальную компоненту поля:

$$d\vec{H}_C + d\vec{H}_{C'} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dV}{r^3} \vec{J}_z \times \vec{r}_3.$$

Для нахождения напряженности результирующего магнитного поля в точке  $A$ , создаваемого воздействием электрических токов, протекающих через все точки ванны, воспользуемся принципом суперпозиции (вектор

напряженности магнитного поля, создаваемого несколькими источниками, равен сумме векторов магнитной напряженности полей, создаваемых каждым источником в отдельности):  $\vec{H}_A = \sum d\vec{H}_C + d\vec{H}_{C'}$ . Отсюда видим, что и напряженность результирующего магнитного поля в точке  $A$  под действием осевой компоненты плотности тока  $J_z$  будет иметь только одну компоненту  $\vec{H}_A = H_\varphi(J_z)$ .

*Роль радиальной компоненты тока.* Возьмем произвольную точку  $A$  ванны и определим в ней значение напряженности магнитного поля  $\vec{H}_A$  под действием радиальной компоненты плотности тока  $J_r$ . Все остальные обозначения – те же, что и выше (см. рисунок 4.11).

Для напряженности  $d\vec{H}_C$  в точке  $A$ , вызываемой током  $J_r$ , протекающим через точку  $C$ , из (4.38) имеем

$$d\vec{H}_C = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dV}{R^3} \vec{J}_r \times \vec{r}_1 + \vec{r}_2 \quad (4.51)$$

Напряженность поля в точке  $A$ , порождаемая радиальным током  $J'_r$ , протекающим через точку  $C'$ , определяется аналогично выражению (4.51):

$$d\vec{H}_{C'} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dV}{R'^3} \vec{J}'_r \times \vec{r}'_1 + \vec{r}'_2$$

Тогда суммарная напряженность магнитного поля в точке  $A$ , обусловленная токами  $J_r$  и  $J'_r$ , определяется выражением

$$d\vec{H}_C + d\vec{H}_{C'} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dV}{R^3} \vec{J}_r \times \vec{r}_1 + \vec{r}_2 + \vec{J}'_r \times \vec{r}'_1 + \vec{r}'_2$$

Опираясь на симметрии точек  $C$  и  $C'$  относительно плоскости  $OzA$  и электрического поля, имеем  $\vec{r}_1 = \vec{r}'_1$ ,  $|J_r| = |J'_r|$ ,  $|\vec{r}_2| = |\vec{r}'_2|$ , и потому

$$d\vec{H}_C + d\vec{H}_{C'} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dV}{R^3} \vec{r}_1 \times \vec{J}_r + \vec{J}'_r \times \vec{r}_2 + \vec{J}_r \times \vec{r}_2 + \vec{J}'_r \times \vec{r}'_2$$

Векторы  $\vec{J}_r \times \vec{r}_2$  и  $\vec{J}'_r \times \vec{r}'_2$  имеют взаимно противоположные направления и равные модули. Следовательно, их сумма равна нулю, и потому век-



тор  $\vec{J}_3 = J_r + J'_r$  направлен вдоль прямой  $OA$  (ось  $r$ ). В связи с этим предыдущее равенство дает только азимутальную компоненту поля:

$$d\vec{H}_c + d\vec{H}_{c'} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dV}{R^3} \vec{r}_1 \times \vec{J}_3,$$

а, по принципу суперпозиции, напряженность суммарного магнитного поля в точке  $A$  под действием радиальной компоненты плотности тока  $J_r$  будет иметь только одну компоненту:  $\vec{H}_A = H_\varphi (J_r) \vec{e}_\varphi$ .

Таким образом, в любой точке ванны напряженность магнитного поля можно представить как  $\alpha(\vec{e}_z \times \vec{e}_r)$ , где  $\alpha$  - некоторый коэффициент. Вектор напряженности магнитного поля лежит в плоскости, перпендикулярной оси  $Oz$  и направлен так, что, если смотреть с конца  $Oz$ , то вращение вектора  $\vec{H}$  будет происходить против хода часовой стрелки.

Для определения единственной компоненты поля  $H_\varphi$  вместо уравнения (4.49) удобней воспользоваться теоремой о циркуляции вектора напряженности магнитного поля (уравнение Максвелла (4.26) в интегральной форме):

$$\oint_L \vec{H}_\varphi \cdot d\vec{\ell} = \int_S \vec{J} dS. \quad (4.52)$$

В качестве контура  $L$  целесообразно брать окружность радиуса  $r$  с центром на оси ванны (точка  $O$ ) на расстоянии  $z$  от поверхности ванны (рисунок 4.12). Ввиду симметрии поле  $H_\varphi$  имеет одинаковую абсолютную величину во всех точках этой окружности. Поэтому криволинейный интеграл (4.52) можно записать

$$\oint_L \vec{H}_\varphi \cdot d\vec{\ell} = 2\pi r H_\varphi.$$

Далее, учитывая, что радиальные составляющие плотности тока лежат в плоскости выбранного контура  $L$ , в правую часть выражения (4.52) войдут только осевые составляющие плотности тока, что дает

$$\int_S j dS = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^r J_z(r', z) r' dr' = 2\pi \int_0^r J_z(r', z) r' dr'.$$

Окончательное выражение для напряженности магнитного поля будет иметь вид:

$$H_\varphi(r, z) = \frac{1}{r} \int_0^r J_z(r', z) r' dr'. \quad (4.53)$$

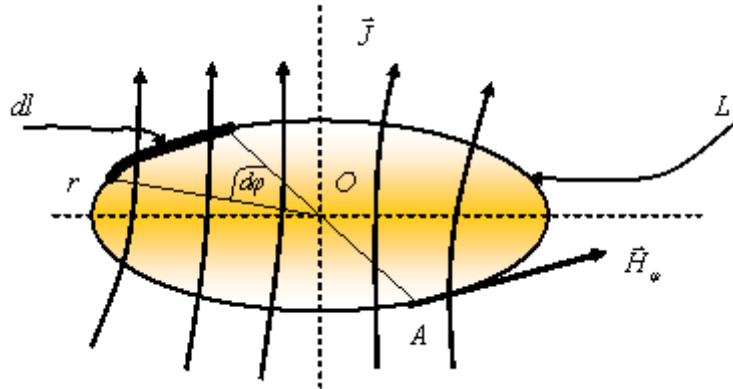


Рисунок 4.12 – Циркуляция вектора напряженности магнитного поля

Это выражение и ляжет в основу нашей математической модели распределения напряженности магнитного поля в ванне ДПТ при осесимметричном растекании токов между токоподводами.

#### 4.2.7 Объемные электромагнитные силы в ванне

Объемную электромагнитную силу  $\vec{f}$ , действующую на единицу токонесущего объема жидкости, в произвольной точке можно определить по формуле [72]

$$\vec{f} = \mu_0 \cdot \vec{J} \times \vec{H}, \quad (4.60)$$

где  $\vec{J}$  — плотность тока в этой точке;  $\vec{H}$  — значение напряженности магнитного поля, создаваемого как внешними, так и токами, протекающими через объем, на который эта сила действует.

Поскольку  $\vec{f}$  определяется векторным произведением, то можем найти ее проекции [78]

$$\vec{f} = \mu_0 (J_\varphi H_z - J_z H_\varphi) \vec{e}_r + \mu_0 (J_z H_r - J_r H_z) \vec{e}_\varphi + \mu_0 (J_r H_\varphi - J_\varphi H_r) \vec{e}_z.$$

В ванне мы имеем только одну составляющую магнитного поля ( $H_\varphi$ ) и две составляющие электрического поля ( $E_r, E_z$ ), а значит, и две составляющие плотности тока ( $J_r, J_z$ ). Поэтому предыдущее равенство принимает более простой вид:

$$\vec{f} = \vec{f}_r + \vec{f}_z = -\mu_0 J_z H_\varphi \vec{e}_r + \mu_0 J_r H_\varphi \vec{e}_z. \quad (4.62)$$

Из этого выражения видно, что сила  $\vec{f}$  имеет две проекции:  $f_r = -\mu_0 J_z H_\varphi$  и  $f_z = \mu_0 J_r H_\varphi$  (рисунок 4.16), причем сила  $f_r$  имеет направление противоположное оси  $r$ , что подтверждает природу пинч-эффекта.

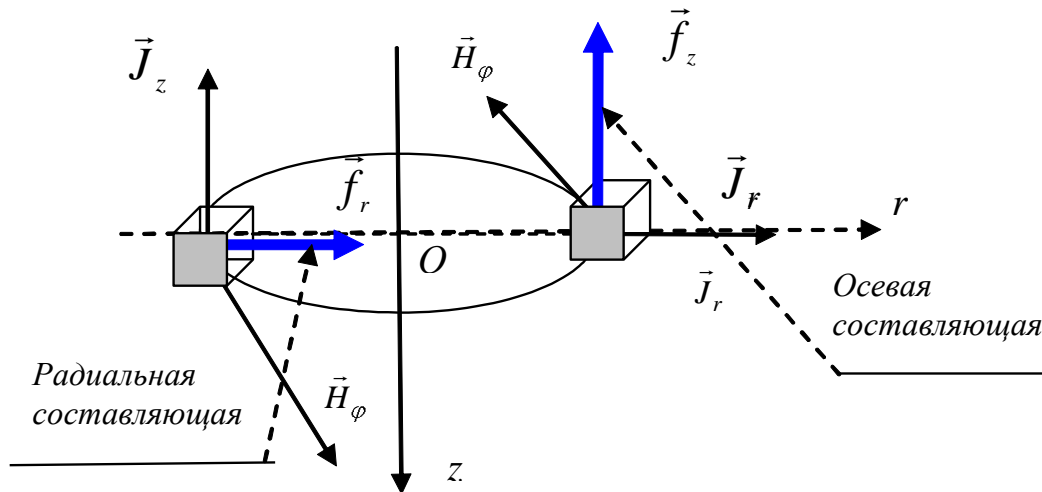


Рисунок 4.16 – Составляющие силы Лоренца, действующие на единицу объема токонесущей жидкости

Важным элементом нашего исследования является вопрос об установлении характера электромагнитной силы, возникающей при прохождении через ванну осесимметричного постоянного электрического тока. Если жидкость неподвижна, то при прохождении через нее электрического тока вопрос о *потенциальном* или *вихревом* характере электромагнитной силы будет эквивалентен вопросу, останется ли она неподвижной или придет в движение.

Известно [72, 79], что потенциальное поле силы не вносит изменений в существующую завихренность потока, и если жидкость была неподвижной, то она и останется таковой в течение всего времени действия потенциальной силы. Там же установлено, что при потенциальном характере ОЭМС ее ротор равен нулю ( $\text{rot } \vec{f} = 0$ ), при вихревом — будет отличен от нуля ( $\text{rot } \vec{f} \neq 0$ ).

Для дальнейшего анализа распишем составляющие ротора  $\text{rot } \vec{f} = \nabla \times \vec{f}$  в цилиндрической системе координат [72]:

$$(\text{rot } \vec{f})_r = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial f_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial f_\varphi}{\partial z}; \quad (4.63)$$

$$(\text{rot } \vec{f})_\varphi = \frac{\partial f_r}{\partial z} - \frac{\partial f_z}{\partial r}; \quad (4.64)$$

$$(\text{rot } \vec{f})_z = \frac{1}{r} \cdot \left( \frac{\partial(rf_\varphi)}{\partial r} - \frac{\partial f_r}{\partial \varphi} \right). \quad (4.65)$$

Учитывая, что  $f_\varphi = \frac{\partial f_z}{\partial \varphi} = \frac{\partial f_r}{\partial \varphi} = 0$ , получим, что  $(\text{rot } \vec{f})_r = (\text{rot } \vec{f})_z = 0$ .

Таким образом, ротор силы отличен от нуля и имеет азимутальную составляющую (4.64). В работе [79] проанализировано, при каких схемах растекания электрического тока с осевой симметрией ротор электромагнитной силы обращается в ноль и, соответственно, не возбуждается движение в первоначально покоящейся жидкости. Показано, что это возможно, если ток через ванну течет в виде тонкого проводника, расположенного на оси симметрии или при условии, что осевая плотность тока не меняется

$\left( \frac{\partial J_z}{\partial z} = 0 \right)$  при отсутствии радиальной составляющей плотности тока  $\vec{j}_r = 0$ .

В ванне ДППТ ток, проходя по ванне от подового электрода к области пятна дуги к пространственно неоднороден, поэтому

$\text{rot } \vec{f}_\varphi = \left( \frac{\partial f_r}{\partial z} - \frac{\partial f_z}{\partial r} \right) \neq 0$ , и можно сделать вывод, что ОЭМС имеет вихревой характер.

Следствием этого является то, что сила Лоренца приводит жидкость в движение и производит над ней некоторую механическую работу. На первый взгляд может показаться, что здесь имеется противоречие, так как чаще всего сила Лоренца не производит над движущимися зарядами никакой работы, а лишь меняет направление их движения. В действительности, как показано в работе [76], никакого противоречия здесь нет. При воздействии магнитного поля на проводники в работу сил Лоренца входит не только механическая работа, но и работа электродвижущих сил, индуцированных в проводнике при его движении. Эти две работы равны по величине и противоположны по знаку.

При протекании тока заданной плотности  $J$  через проводник диссипация энергии не зависит от того, движется проводник или нет, поэтому джоулево тепло определяется известным законом Ома:  $q_v = \frac{J^2}{\sigma} = JE$ . Однако если проводник движется со скоростью  $\vec{W}$ , то вместо напряженности электрического поля  $\vec{E}$  необходимо брать «эффективную» напряженность электрического поля  $\vec{E}_{\text{эф}} = \vec{E} + \mu_0 \vec{W} \times \vec{H}$ , которая создает ток проводимости. Согласно закону Фарадея возникает дополнительная ЭДС при изменении магнитного потока за счет движения проводника (при неизменном магнитном поле).

Таким образом, при осесимметричном прохождении постоянного тока по ванне ДППТ объемная электромагнитная сила имеет лишь две проекции:  $f_r$  и  $f_z$ , которые порождают плоский вихревой характер движения жидкости, при этом азимутальная составляющая ОЭМС отсутствует. Это приводит к невозможности появления электровихревых течений вдоль ко-

ординаты  $\varphi$ . ЭВТ жидкости в ванне носят вихревой характер и возникают за счет энергии внешнего источника ЭДС.

#### *4.2.8 Циркуляция расплава в ванне ДППТ с осесимметричным подовым электродом*

В восстановительный период плавки скорости процессов раскисления и обессеривания металла зависят от скорости диффузии продуктов раскисления и сернистого железа в шлак. Она, в свою очередь, зависит от глубины ванны, среднего пути частиц неметаллических включений и сернистого железа до поверхности шлака, то есть от емкости печи. Скорость массопереноса можно существенно повысить, заставив металл в ванне циркулировать так, чтобы нижние слои металла перемещались к слою шлака. Такая циркуляция весьма желательна и для выравнивания температур жидкого металла в ванне.

Технология плавки металлов в ДСП и ДППТ связана с условиями, при которых тепло выделяется электрической дугой на поверхности расплава. Роль естественной конвекции очень мала, и это приводит к тому, что верхние слои металла перегреты по сравнению с нижними, причем тем больше, чем глубже ванна, и этот перегрев может составлять от  $70^0$  до  $100^0$  С. Направленная циркуляция металла облегчает равномерное распределение легирующих добавок по объему ванны, что особенно важно при выплавке высоколегированных сталей.

Циркуляция расплава должна обеспечивать ряд требований к скорости жидкости в ванне, основные из них:

- в любой точке ванны скорость не должны быть меньше заданного значения  $W_{мин}$ ;
- на свободной поверхности ванны и в области пятна дуги скорость расплава должна быть максимально возможной для эффективного отвода тепла в глубь ванны и взаимодействия металла со шлаком;

- вблизи футеровки скорость расплава как можно меньше и на практике не превышать некоторого предельного значения  $W_{\phi}$ .

Как было показано в 1 главе, наиболее перспективным способом привести расплав в движение является применение ОЭМС. Они используются для преодоления вязкостных и гравитационных сил и создают электровихревые течения.

Современная ванна ДППТ имеет осевую симметрию, и это, прежде всего, связано с желанием иметь агрегат с осесимметричными тепловыми и механическими характеристиками, параметрами износа футеровки и пр.

Как было установлено плотность тока в такой ванне меняется по объему расплава, то есть мы имеем его пространственную неоднородность. Как показано в работах [72, 79], только в этом случае возможно появление ЭВТ в жидкости.

Допущение об осевой симметрии полей физических величин, с одной стороны, позволяет оставаться в рамках трехмерного пространства, с другой – ставит эти величины в зависимость лишь от двух его координат.

Изучение осесимметричных ЭВТ связано с решением уравнений Навье-Стокса. Их нелинейный характер приводит к тому, что число краевых задач для них, допускающих точное решение, крайне ограничено [79]. К таким задачам приводит рассмотрение:

- течений, инвариантных относительно некоторого направления в пространстве;
- автомодельных течений, для описания которых от исходных уравнений в частных производных для функции одного сложного аргумента можно перейти к обыкновенным дифференциальным уравнениям.

К первому типу относятся течения с параллельными линиями тока, например, продольное обтекание бесконечного цилиндра в поперечном магнитном поле. В уравнениях, описывающих эти течения нелинейные члены тождественно равны нулю. В уравнениях, описывающих течения

второго типа (его примером может быть осесимметричное ЭВТ в окрестности критической точки) нелинейные члены отличны от нуля.

Определение параметров ЭВТ при осесимметричном растекании тока от пятна дуги до ПЭ посредством точных решений соответствующих уравнений не представляется возможным.

В данной главе посредством приближенного решения уравнений Навье-Стокса:

- найдем характеристики ЭВТ, возникающих при осесимметричном растекании тока от пятна дуги до подового электрода в ДППТ;
- разберем особенности течения в ванне под действием плазмы дуги и установим параметры этих течений;
- выясним зависимость ЭВТ от геометрии ванны и подового электрода, а также влияния на них тока дуги и характеристик расплава.

Исследование процесса конвективного перемешивания и теплообмена в ванне расплава в безындукционном приближении сводится к решению системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка. Такая система включает уравнение Навье-Стокса для магнитной гидродинамики, уравнение неразрывности и конвективного теплопереноса. В самой общей постановке такая система весьма сложна, и ее решение вызывает большие затруднения даже с использованием современных вычислительных средств. Поэтому примем некоторые упрощения и допущения.

Известно, что поле скоростей в ванне устанавливается значительно быстрее, чем поля концентраций примесей и температур. Скорость распространения теплообменных процессов равна скорости расплава, в то время как скорость распространения гидродинамических процессов равна скорости звука в нем. Поэтому в первом приближении возможна декомпозиция решения, заключающаяся в раздельном моделировании гидродинамических и теплообменных процессов, а значит, уравнения Навье-



Стокса можно решать независимо от уравнений теплопереноса. Аналогично, мы пренебрегаем влиянием переходных процессов установления электрического и магнитного полей на поле скоростей расплава. Эти допущения, конечно, не охватывают всех упрощений и приближений нашей модели, и мы более подробно рассмотрим их в следующем параграфе.

При разработке математической модели течения расплава был принят ряд допущений. А именно, считаем, что

- 1) можно разделить задачу магнитогидродинамики на две независимые: магнитную и гидродинамическую;
- 2) среда однородна и представляет собой несжимаемую ньютоновскую жидкость;
- 3) расплав изотермический и его характеристики остаются постоянными;
- 4) течение жидкости ламинарное и происходит под действием ОЭМС и сил вязкости потока плазмы дуги;
- 5) не учитывается влияние на движение расплава замыкание магнитных полей за пределами ванны;
- 6) течение жидкости ограничено областью ванны (рисунок 2.2), представляющей собой усеченный конус, то есть  $h_1 = 0$ ,  $h_2 = h_e$ , на поверхности металла шлак отсутствует;
- 7) движение в ванне осесимметричное, поэтому отсутствует азимутальное течение жидкости ( $W_\varphi = 0$ );
- 8) функция напряженности магнитного поля имеет одну составляющую  $H_\varphi = H_\varphi(r, z)$  ( $H_r = H_z = 0$ );
- 9) воздействие плазменной струи с расплавом протекает без химических и фазовых переходов как двух несмешивающихся жидкостей.

Проанализируем некоторые из перечисленных допущений. Первое основано на том, что магнитное число Прандтля  $P_{r,m} = \mu_0 \nu \sigma$  для жидких металлов весьма мало. Например, для жидкой стали

$P_{r,m} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 7,13 \cdot 10^{-7} \cdot 6 \cdot 10^5 = 5,4 \cdot 10^{-7}$ . Отсюда следует, что сносом магнитных силовых линий за счет движения расплава можно пренебречь [66, 74, 80]. Оценим магнитное число Рейнольдса  $Re_m = \mu_0 \sigma W L$ . Средняя скорость движения металла в ванне порядка  $W=1$  мм/с, при ее характерном размере  $L \sim 1$  м, получим  $Re_m = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6 \cdot 10^5 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \sim 10^{-3} \ll 1$ . Данная оценка позволяет не учитывать токи, индуцированные движением расплава [72, 74, 80].

Второе допущение вполне приемлемо, так как известно, что металлургические расплавы при температурах значительно выше температур затвердевания являются жидкостями Ньютона [81 – 84]. Третье – основано на том, что нагрев ванны дугой сверху не является эффективным для возникновения свободной конвекции, а существующий градиент температур по ванне (порядка  $100^0$  С) приводит к изменению плотности и вязкости металла не более чем на 5 %.

Четвертое допущение о ламинарном характере течения основывается на том, что в большем объеме ванны средняя скорость жидкости  $W_{cp}$  под действием ОЭМС не превышает 1 мм/с и оценка числа Рейнольдса для жидкой стали дает  $Re = W_{cp} L / \nu \sim 10^3$ . Кроме того, известно, что магнитное поле уменьшает степень турбулентности расплавленных металлов и при его воздействии течение, которое было турбулентным, становится ламинарным [85]. Остальные допущения обусловлены необходимостью упрощения.

Главным фактором, отличающим магнитную гидродинамику от классической, является наличие в магнитной гидродинамике объемной электромагнитной силы. Уравнения Навье-Стокса для изотермического ламинарного движения электропроводящей жидкости в присутствии магнитного поля включают в себя уравнение сохранения импульса, которое в векторной форме имеет вид [72, 83]

$$\gamma \left[ \frac{\partial \vec{W}}{\partial \tau} + \vec{W} \operatorname{grad} \vec{W} \right] = -\operatorname{grad} P - \gamma \vec{g} + \eta \nabla^2 \vec{W} + \vec{J} \times \vec{B} \quad (4.66)$$

и неразрывности

$$\operatorname{div} \vec{W} = 0. \quad (4.67)$$

Левая часть уравнения (4.66) представляет собой силу инерции, первое слагаемое правой части – результирующую сил давления, второе – силу тяжести ( $g$  – ускорение свободного падения), третье – вязкую силу ( $\eta$  – коэффициент динамической вязкости), четвертое — электромагнитную.

Объемную электромагнитную силу  $\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B}$  можно найти, исходя из уравнения Максвелла  $\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}$  и соотношения  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ . Как было показано ранее, при подовом электроде, ось которого совпадает с осью ванны, напряженность магнитного поля в ванне имеет только одну проекцию  $H_\varphi$ , исходя из чего, имеем следующие соотношения для проекций плотности тока в цилиндрической системе координат:

$$J_r = \operatorname{rot} \vec{H}_z = -\frac{\partial H}{\partial z}; \quad J_z = \operatorname{rot} \vec{H}_r = \frac{1}{r} \frac{\partial(rH)}{\partial r} \quad (4.68)$$

(здесь и в дальнейшем индекс  $\varphi$  опускаем).

Используя выражения (4.68), можно получить соответствующие проекции ОЭМС:

$$f_z = -\mu_0 H \frac{\partial H}{\partial z}, \quad f_r = \mu_0 H \frac{1}{r} \frac{\partial r H}{\partial r} = \mu_0 H \left( \frac{H}{r} + \frac{\partial H}{\partial r} \right).$$

С учетом рассмотренных выше допущений распишем систему уравнений (4.66) – (4.68) в цилиндрических координатах [726, стр. 224]. Плоское вихревое течение металла в безразмерном виде может быть представлено следующим образом [82 – 84]:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \nabla^2 u - \frac{u}{r^2} - S_\gamma \frac{H}{r} \frac{\partial H}{\partial r}, \quad (4.60)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \nabla^2 v - S_3 H \frac{\partial H}{\partial z}, \quad (4.70)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u}{r} = 0, \quad (4.71)$$

где  $u$ ,  $v$  – проекции безразмерных скоростей жидкости на оси  $r$  и  $z$  соответственно,  $P$  и  $\tau$  – безразмерное давление и время. Были выбраны следующие масштабы для функций и независимых переменных:  $R_e$  – характерная длина,  $v/R_e$  – масштаб скорости,  $R_e^2/\nu$  – единица времени,  $\nu^2\gamma/R_e^2$  – единица давления,  $I_0/(2\pi R_e)$  – единица напряженности магнитного поля,  $S_3 = \frac{\mu_0 I_0^2}{4\pi^2 \gamma \nu^2}$  – параметр электровихревого течения;  $\gamma$ ,  $\nu$  – плотность и коэффициент кинематической вязкости жидкости,  $I_0$  – ток дуги.

Решение системы (4.69) – (4.71) ищется в области  $0 \leq r \leq l$ ;  $0 \leq z \leq h_e/R_e$  (рисунок 4.17) при следующих краевых условиях.

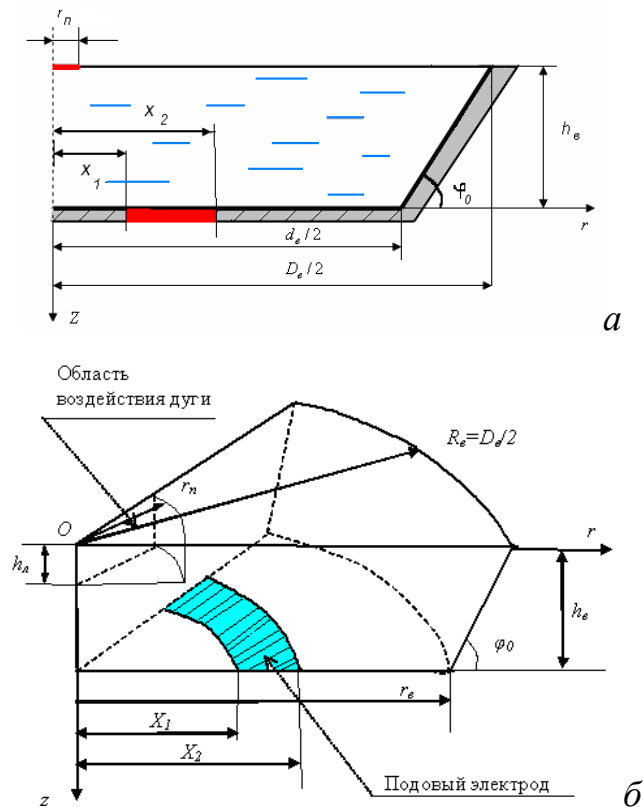


Рисунок 4.17 – Расчетная область ванны (а) и размеры области воздействия электрической дуги (б)

**Начальные условия** (при  $\tau=0$ )

$$u = v = 0.$$

**Граничные условия** (ГУ) (при  $\tau > 0$ )

Считаем магнитное поле заданным  $H = H(r, z)$ .

на твердых стенках ванны

$$u = v = 0; \quad (4.72)$$

на свободной поверхности ( $z=0$ ) имеем условие взаимодействия с атмосферой печи [86]

$$\eta_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = \eta_{жс} \frac{\partial u_{жс}}{\partial z}. \quad (4.73)$$

Учитывая, что  $\eta_z \ll \eta_{жс}$ ,  $u_z \approx u_{жс}$  получим

$$v = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 0; \quad (4.74)$$

на оси ванны ( $r=0$ )

$$\frac{\partial v}{\partial r} = u = 0. \quad (4.75)$$

Исключим из системы (4.69) – (4.71) давление, для чего продифференцируем уравнение (4.69) по  $z$  и вычтем из него уравнение (4.70), продифференцированное по  $r$ . Имеем

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 u}{\partial \tau \partial z} + \frac{\partial u}{\partial z} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial z} + \frac{\partial v}{\partial z} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} + v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \\ & = - \frac{\partial^2 P}{\partial r \partial z} + \frac{\partial^3 u}{\partial z^3} + \frac{\partial^3 u}{\partial r^2 \partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial z} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial u}{\partial z} - \\ & - S_9 \left[ \frac{2H}{r} \cdot \frac{\partial H}{\partial z} + H \frac{\partial^2 H}{\partial r \partial z} + \frac{\partial H}{\partial z} \cdot \frac{\partial H}{\partial r} \right], \end{aligned} \quad (4.76)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial^2 v}{\partial \tau \partial r} + \frac{\partial u}{\partial r} \cdot \frac{\partial v}{\partial r} + u \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial v}{\partial r} \cdot \frac{\partial v}{\partial z} + v \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial z} = \\
& = -\frac{\partial^2 P}{\partial r \partial z} + \frac{\partial^3 v}{\partial z^2 \partial r} + \frac{\partial^3 v}{\partial r^3} - \frac{\partial v}{r^2 \partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} - \\
& - S_9 \left[ H \frac{\partial^2 H}{\partial r \partial z} + \frac{\partial H}{\partial z} \cdot \frac{\partial H}{\partial r} \right].
\end{aligned} \tag{4.77}$$

Перейдем к функциям тока  $\Psi$  и завихренности  $\omega$ . Функцию  $\Psi$  подбираем так, чтобы удовлетворять уравнению неразрывности (4.6) и чтобы вдоль линии тока величина скорости сохраняла постоянное значение [83, 86 – 88]:

$$u = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial z}, \tag{4.78}$$

$$v = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r}. \tag{4.79}$$

Положим

$$\omega = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial r}. \tag{4.80}$$

Вычитая из (4.76) выражение (4.77) и учитывая (4.78 – 4.80), получим

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + u \frac{\partial \omega}{\partial r} + v \frac{\partial \omega}{\partial z} = \nabla^2 \omega - \frac{\omega}{r^2} - \frac{2}{r} S_9 H \frac{\partial H}{\partial z}.$$

Теперь система (4.69) – (4.71) принимает вид:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \nabla^2 \omega + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial z} \frac{\partial \omega}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \frac{\partial \omega}{\partial z} - \frac{1}{r^2} \omega - \frac{2}{r} S_9 H \frac{\partial H}{\partial z}, \tag{4.81}$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} = -\omega r. \tag{4.82}$$

Неизвестными в системе (4.81) – (4.82) становятся функции  $\Psi$  и  $\omega$ . Зададим для них граничные условия, вытекающие из (4.72) – (4.75).

*На твердых стенках* (для функции тока)

$$\Psi = \text{const}, \quad \partial \Psi / \partial n = 0.$$

Значение  $\Psi$  находится из уравнения (4.82) с точностью до константы.

В работах [86 – 88] показано, что для замкнутой односвязной области ее можно положить равной нулю.

На подине ванны ( $0 \leq r \leq r_g, z = h_g$ )

$$\Psi=0; \quad \partial\Psi/\partial z=0. \quad (4.83)$$

На ее боковых стенках  $r_g < r \leq R_g$

$$\left( \begin{array}{l} \text{при } \varphi_0 = 45^\circ, \quad z = h_g - \frac{h_g(r - r_g)}{R_g - r_g}; \\ \text{при } \varphi_0 \neq 45^\circ, \quad z = h_g - (r - r_g)\text{tg}\varphi_0 \end{array} \right)$$

$$\Psi=0; \quad \partial\Psi/\partial n=0. \quad (4.84)$$

На свободной поверхности жидкости ( $z=0, \quad r=0 \leq r < R_g$ )

$$\Psi = \partial^2 \Psi / \partial z^2 = 0, \quad \omega = 0. \quad (4.85)$$

На оси симметрии ванны ( $r=0, 0 < z < h_g$ )

$$\psi = 0, \quad \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) = 0, \quad \omega = 0. \quad (4.86)$$

На границах лунки (для  $z=h_n, r=0 \dots r_n$ )

$$\psi = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial z} = -r \bar{u}_n, \quad (4.87)$$

(для  $r=r_n, z=0 \dots h_n$ )

$$\psi = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial r} = r \bar{v}_n. \quad (4.88)$$

Таким образом, поставлена краевая задача (4.81) – (4.88), в системе  $\psi - \omega$  функций, которая представляет собой модель течения расплава в ванне ДППТ с осесимметричным ПЭ под действием ОЭМС (при известной напряженности магнитного поля) и потока плазмы дуги. Далее рассмотрим численное решение данной краевой задачи.

#### 4.2.9 Математическая модель тепломассопереноса в ванне

##### ДППТ с учетом ЭВТ

Объектом моделирования является нестационарное тепловое состояние расплава, находящегося в ванне ДППТ. Считаем известными начальное температурное поле жидкости, стационарные или нестационарные скорости ее течения, геометрические характеристики ванны и ее футеровки, а также технологические параметры дуги и теплофизические характеристики.

Как уже было показано дуга представляет собой канал цилиндрической формы радиуса  $r_0$ , переходящий в сужающийся кверху усеченный конус и расширяющийся к аноду, контактируя с расплавом по радиусу  $r_n$  (см. рисунок 4.8).

Напряжение на дуге является либо заданным технологическим параметром, либо определяется, исходя из ее средней полезной электрической мощности  $P_\delta$ :

$$U_\delta = \frac{P_\delta}{I_\delta}.$$

Длина дуги зависит от приложенного к ней напряжения [69, 34]:

$$l_\delta = (U_\delta - U_a - U_k) / b,$$

где  $U_a$ ,  $U_k$  — анодное и катодное падения напряжения соответственно,  $b$  — градиент потенциала в столбе дуги. Для условий дуговой сталеплавильной печи [89] принимаем  $U_a + U_k \approx 17$  В. Величина  $b$  зависит от периода плавки, например для восстановительного периода, колеблется от 0,5 до 1,2 В/мм [69].

В рабочем пространстве сталеплавильных печей дуги горят в парах металлов при внешнем давлении, близком к атмосферному. Это оказывает решающее влияние на распределение электрической мощности, так по данным ВНИИЭТО [59, 69] вся она переходит в тепло, причем 80 – 90% в



излучение столба дуги, остальное – в конвективный поток и тепловой поток электродных пятен. Мощность, выделяющаяся в электродных пятнах, рассчитывается как произведение тока дуги на сумму ее анодного и катодного падений напряжений и, для мощных сталеплавильных печей постоянного тока составляет 3 – 5 % от мощности дуги.

Согласно экспериментальным исследованиям многих авторов передаваемая металлу тепловая мощность в анодном пятне в основном зависит от тока дуги и ее длины [59, 69], причем зависимость от тока близка к линейной. С увеличением длины дуги тепловая мощность, выделяемая на аноде, сначала возрастает (достигает максимума при  $l_{dmax} \approx 8r_0$ , где  $r_0$  – радиус цилиндрической части столба дуги), а затем падает. Это объясняется тем, что для коротких дуг существенную долю составляет конвективная составляющая и мощность, выделяющаяся в электродных пятнах.

Для окислительного и восстановительного периодов режим работы дуговой печи постоянного тока соответствует дугам с длиной  $l_d \gg l_{dmax}$ , поэтому при этих режимах работы с увеличением длины дуги тепловой поток в ванну падает.

Для определения теплового воздействия дуги на расплав были приняты следующие допущения:

- подавляющая часть энергии дуги выделяется в виде излучения (хотя есть конвекция, химические и др. взаимодействия);
- дуга рассматривается в виде совокупности точечных источников излучения, расположенных между поверхностями зеркала ванны и торца электрода;
- среду между дугой и поверхностью полагаем лучепрозрачной. Это вполне справедливо в период жидкой ванны, когда горелки не работают и в рабочем пространстве практически отсутствуют  $CO_2$  и  $H_2O$ . Считаем, что вся выделяемая мощность дуги заключена в цилиндре

объемом  $V_0 = \pi r_0^2 l_0$  (рисунок 4.18). Интенсивность облучения некой площадки поверхности расплава посредством точечного цилиндрического излучателя мощностью  $dP$  можно определить [14, 35]:

$$dq = K_9 \frac{dP \cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi^2 R^2}, \quad (4.89)$$

где  $R$  – расстояние от источника излучения до центра площадки,  $K_9$  – поправочный экспериментальный коэффициент, учитывающий долю мощности дуги идущую на излучение,  $\varphi_1$  – угол между нормалью к оси дуги и направлением излучения,  $\varphi_2$  – угол между нормалью к поверхности ванны и направлением излучения.

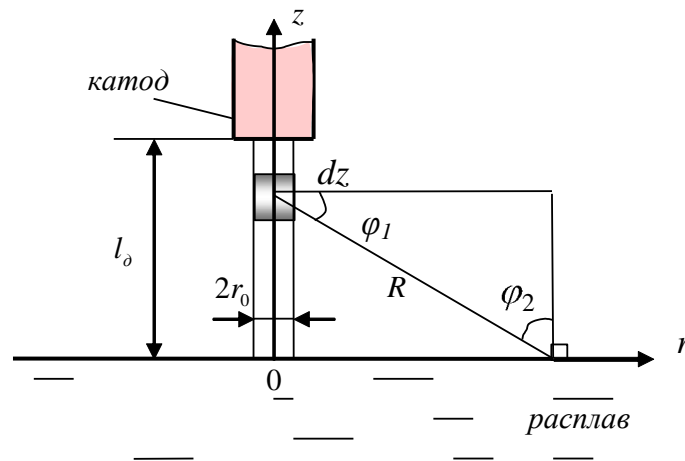


Рисунок 4.18 – Модель теплового излучения дуги на плоскую поверхность

Считаем, что полная выделяемая дугой мощность излучения  $P$  равномерно распределена по ее длине, поэтому в малом элементе объема дуги:

$dV_0 = \pi r_0^2 dz$  выделяется мощность  $dP = \frac{P dz}{l_0}$ . Из рисунка 4.18 видно, что

$\cos \varphi_1 = r / R$ ,  $\cos \varphi_2 = z / R$ ,  $R = \sqrt{r^2 + z^2}$ . Имеем тепловой поток на расстоянии  $r$  от оси дуги:

$$q_{изл} = \frac{K_9 P \cdot r \cdot l_0}{\pi^2 l_0} \int_0^{l_0} \frac{z}{(z^2 + r^2)^2} dz = \frac{K_9 P l_0}{2\pi^2 r (l_0^2 + r^2)}. \quad (4.90)$$

Это выражение после несложных преобразований переходит в форму-

лу, полученную А.Н. Макаровым [89, 90].

В работе [69] показано, что мощность дуги определяется ее длиной и током  $I_\delta$  и для инженерных расчетов можно считать, что

$$P = (U_a + U_\kappa + b \cdot l_\delta) I_\delta. \quad (4.91)$$

С учетом (4.22) и (4.23) получим

$$q_{изл} = \frac{K_\delta l_\delta (U_a + U_\kappa + b \cdot l_\delta) I_\delta}{2\pi^2 r (l_\delta^2 + r^2)}. \quad (4.92)$$

Характер полученной оценки (4.92) подтверждает прямую зависимость теплового потока излучения  $q$  на ванну от тока дуги и его уменьшение при увеличении длины дуги  $l_\delta$ .

Используя (4.90) можно оценить средний тепловой поток излучением в области привязки пятна дуги радиуса  $r_n$ :  $\bar{q}_n = \frac{2\pi}{\pi r_0^2} \int_0^{r_n} q \cdot r dr$ , получим

$$\bar{q}_n = \frac{K_\delta P l_\delta}{\pi^2 r_n^2} \int_0^{r_n} \frac{dr}{l_\delta^2 + r^2} = \frac{K_\delta P}{\pi^2 r_n^2} \operatorname{arctg}\left(\frac{r_n}{l_\delta}\right). \quad (4.93)$$

Расчеты по этой формуле не согласуются с экспериментально полученными тепловыми потоками в области пятна дуги [66, 68]. Объяснить это можно тем, что она выведена на основе допущения о лучепрозрачности среды, однако дуга не является лучепрозрачной, кроме того, в области анодного пятна тепло передается не только излучением, но и за счет конвекции [80].

В силу этого формулы (4.90) и (4.92) адекватно описывают теплообмен при  $r > r_n$ . Однако знание среднего теплового потока в анодной области пятна дуги для  $r \leq r_n$  является важным для проведения тепловых расчетов в ванне расплава.

Как было показано погружение дуги в металл  $h_n$  пропорционально току и в среднем составляет  $k_n = 3 \text{ мм/кА} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м/А}$ , плотность тока в анодном пятне –  $J_a = 5 - 10 \text{ А/мм}^2$ , поэтому его можно оценить как  $J_a = I_\delta / s$ ,

причем считаем, что величина  $s$  имеющая размерность площади не зависит от тока. Из экспериментальных данных [69] установлено, что  $s$  увеличивается с увеличением напряжения на дуге, а значит, зависит от ее длины. Зависимость среднего теплового потока в области пятна дуги можно оценить как

$$q_n = \frac{U_a \cdot I_0}{\pi \cdot r_n^2}. \quad \text{С учетом выражения для радиуса пятна дуги (4.23)}$$

имеем:

$$q_n = U_a J_n. \quad (4.94)$$

При  $U_a = 8$  В и  $J_n = 3 - 7$  А/мм<sup>2</sup> получим  $q_n = 2,4 - 5,6$  кВт/см<sup>2</sup>, что по порядку величины согласуется с известными экспериментальными данными [80].

В работе [66] мощность, выделяемая разрядом в области анода, определяли как

$$W_a = I_0 \left( U_a + \varphi + \frac{5}{2e} kT \right),$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона,  $\varphi$  – работа выхода для материала катода,  $T$  – температура газа на внешней границе прианодной области. При тепловом воздействии дуги на поверхность расплава необходимо учитывать конвективную передачу теплоты горячими газами, а также излучение и испарение самого металла. Все это позволяет считать, что для определения теплового потока в области пятна дуги можно использовать оценку (4.94).

Используя выражение (4.90) определяем тепловую мощность, получаемую поверхностью ванны

$$Q_{нов} = \int_F q_{изл} dF = \frac{K_3 P l_0}{\pi} \int_0^{R_0} \frac{dr}{l_0^2 + r^2}.$$

Доля этой мощности от общей мощности излучения дуги

$\xi_p = \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{R_6}{l_0} \right)$ . При уменьшении длины дуги  $\xi_p$  увеличивается и стремится к значению 0,5.

При разработке математической модели теплового состояния ванны ДППТ принимаем ряд допущений. А именно считаем, что

- в цилиндрической системе координат (ось  $Oz$  совпадает с осью ванны) температурные поля и тепловые потоки являются осесимметричными;
- нагрев ванны идет за счет теплового потока излучения от дуги, тепло в ванне распространяется за счет теплопроводности и вынужденной конвекции создаваемой ЭВТ, влиянием свободной конвекции не учитываем;
- можно пренебречь диссипацией энергии вязкими силами ( $\Phi=0$ ) (так как скорость жидкости невелика) и джоулевым тепловыделением в расплаве (из-за его высокой проводимости);
- можно не учитывать тепловые потери на поверхности водоохлаждаемого подового электрода и на свободной поверхности ванны за счет излучения на свод и боковые стенки печи;
- теплофизические свойства расплава постоянные и известно распределение скорости ЭВТ по ванне.

Будем решать задачу в области представленной на рисунке 4.19. Температурное поле движущейся жидкости описывается уравнением энергии, исходя из рассмотренных выше допущений, имеем:

$$\gamma c \left[ \frac{\partial t}{\partial \tau} + \mathbf{W} \cdot \operatorname{grad} \bar{t} \right] = \lambda \nabla^2 t \quad (4.95)$$

и с учетом осевой симметрии и постоянства теплофизических свойств

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + u \frac{\partial t}{\partial r} + v \frac{\partial t}{\partial z} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (4.96)$$

где  $t(\tau, r, z)$  – температура,  $\lambda, c, a = \lambda / \rho \gamma$  – коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности расплава соответственно.

Дополним (4.96) краевыми условиями. При задании начального условия (при  $\tau = 0$ ) считаем, что расплав в ванне имеет температуру выше температуры ликвидуса  $t_0 = t_L + 20$ .

$$t(r, z) = t_0, \quad (4.97)$$

где температура ликвидуса зависит от химического состава стали

$$t_L = 1537 - (88 \cdot C + 8 \cdot Si + 5 \cdot Mn + 4 \cdot Cu + 5 \cdot Cr + 25 \cdot S + 30 \cdot P). \quad (4.98)$$

Граничные условия (при  $\tau > 0$ ).

На свободной поверхности ванны падает тепловой поток от излучения дуги ( $z = 0, r = r_n \dots R_e$ ):

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial z} = q_{изл}(r), \quad (4.99)$$

где  $q_{изл}(r)$  – тепловой поток излучения на поверхность ванны определяем по формуле (4.92).

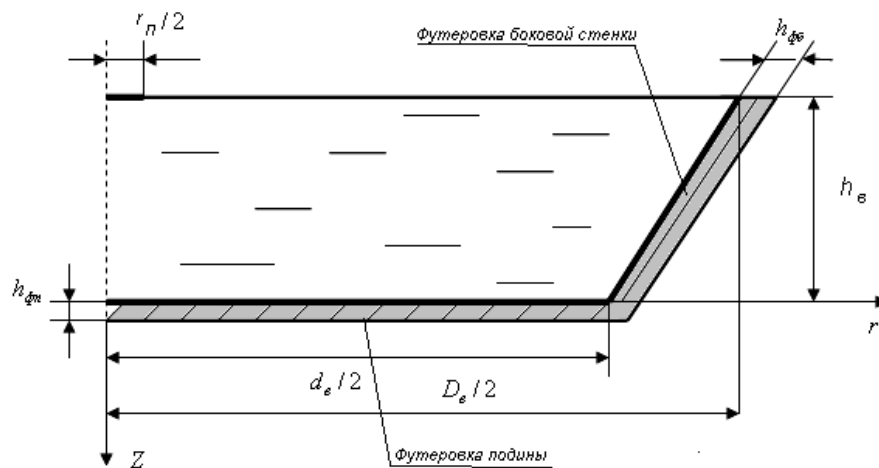


Рисунок 4.19 – Расчетная область ванны

В области пятна дуги ( $z = 0, r = 0 \dots r_n$ ):

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial z} = q_n(r), \quad (4.100)$$

где  $q_n$  – тепловой поток в области пятна дуги определяем по формуле (4.94).

На боковой поверхности ванны ( $z = 0 \dots h_g$ ,  $r(z) = D_g/2 - z \cdot \operatorname{ctg} \varphi_0$ ):

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = q_{\text{номб}},$$

где  $\vec{n}$  – нормаль к боковой поверхности ванны (см. рисунок 4.8).

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \cdot \cos \varphi_0 + \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \cdot \sin \varphi_0 = q_{\text{номб}}. \quad (4.101)$$

Тепловой поток через футеровку боковых стенок

$$q_{\text{номб}} = \frac{(t - t_{\text{окр}})}{\frac{1}{\alpha_{\text{окр}}} + \frac{h_{\text{фб}}}{\lambda_{\text{ф}}}} = \alpha_{\text{б}}(t - t_{\text{окр}}), \quad (4.102)$$

где  $\alpha_{\text{б}}$  – кажущийся коэффициент теплоотдачи при тепловых потерях от расплава в окружающую среду через футеровку боковых стенок,  $h_{\text{фб}}$ ,  $\lambda_{\text{ф}}$  – толщина футеровки боковых стен и коэффициент их теплопроводности соответственно;  $\alpha_{\text{окр}}$  – приведенный коэффициент теплоотдачи излучением и конвекцией от внешней поверхности стенки, имеющей температуру  $t_{\text{ст}}$  в окружающую среду с температурой  $t_{\text{окр}} = 20$  °С. Зададим его в виде регрессионной зависимости:

$$\alpha_{\text{окр}} = 5,053 \cdot 10^{-5} t_{\text{ст}}^2 + 4,713 \cdot 10^{-2} t_{\text{ст}} + 8,848, \text{ Вт/ (м}^2 \text{ град)}. \quad (4.103)$$

Область подины ванны ( $z = h_g$ ,  $r = 0 \dots d_g / 2$ )

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial z} = q_{\text{номн}}. \quad (4.104)$$

Тепловые потери через футеровку подины:

$$q_{\text{номн}} = \frac{(t - t_{\text{окр}})}{\frac{1}{\alpha_{\text{окр}}} + \frac{h_{\text{фн}}}{\lambda_{\text{фн}}}} = \alpha_{\text{под}}(t - t_{\text{окр}}), \quad (4.105)$$

где  $\alpha_{nod}$  – кажущийся коэффициент теплоотдачи при тепловых потерях от расплава в окружающую среду через футеровку подины,  $h_{\phi n}$ ,  $\lambda_{\phi n}$  – толщина футеровки подины и коэффициент ее теплопроводности соответственно.

На оси ванны ( $r = 0$ ,  $z = 0 \dots h_g$ )

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial r} = 0. \quad (4.106)$$

Таким образом, поставленная краевая задача (4.41) – (4.51) представляет собой модель теплового состояния расплава ванны при распространении тепла в ней за счет теплопроводности и конвекции.

Рассмотрим ряд дополнительных характеристик. Важной параметром теплового состояния расплава является его средние температуры:

по всему объему ванны

$$\bar{t} = \frac{1}{V_g} \int_V t dV = \frac{24}{h_g \left( D_g^2 + d_g^2 + D_g d_g \right)} \int_0^{h_g} \int_0^{\frac{D_g}{2} + \left( \frac{D_g - d_g}{2} \right) \frac{z}{h_g}} t(r, z) r \cdot dr \cdot dz, \quad (4.107)$$

ее поверхности и подины

$$\bar{t}_{z=0} = \frac{8}{D_g^2} \int_0^{D_g/2} r \cdot t(r, 0) \cdot dr; \quad (4.108)$$

$$\bar{t}_{z=h_g} = \frac{8}{d_g^2} \int_0^{d_g/2} r \cdot t(r, 0) \cdot dr. \quad (4.109)$$

Для анализа неравномерности температурного поля воспользуемся среднеквадратичным отклонением

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n t_i^2 - \bar{t}^2}. \quad (4.110)$$

#### 4.2.10 Математическая модель массопереноса в ванне ДППТ

Если в расплаве не происходят химические реакции, вызывающие образование переносимого вещества, то уравнение его переноса имеет следующий вид:



$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial r} + v \frac{\partial C}{\partial z} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right), \quad (4.111)$$

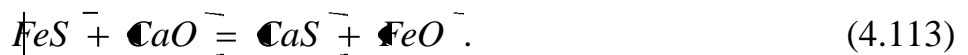
где  $C$  – концентрация вещества;  $D$  – коэффициент диффузии.

Рассмотрим процесс одношлакового рафинирования при плавке стали в ДППТ. Конечное содержание примеси в металле [91]

$$\Phi_k^- = \frac{100 \Phi_{\text{ш}}^-}{100 + L_E g_{\text{ш}}}, \quad (4.112)$$

где  $\Phi_{\text{ш}}^-$  – начальное содержание примеси;  $g_{\text{ш}}$  – количество шлака кг/100 кг металла;  $L_E = [C] / \mathbf{C}^-$  – коэффициент распределения примеси между металлом и шлаком.

Рассмотрим процесс удаления серы, происходящий за счет протекания реакции



При температуре расплава эта реакция протекает очень быстро [92], а скорость десульфурации лимитируется подводом  $FeS$  к поверхности металл-шлак, что в свою очередь определяется конвективным массопереносом в ванне.

Будем решать уравнение (4.111), где в качестве неизвестной функции считаем концентрацию  $FeS$ . Дополним его краевыми условиями. Начальное условие (при  $\tau = 0$ )

$$C(r, z) = [C]_n.$$

Граничные условия (при  $\tau > 0$ ).

На свободной поверхности ванны ( $z = 0, r = r_n \dots R_g$ )  $C(r, 0) = C_{\text{ш}}$ , где  $C_{\text{ш}} = (C)$ .

На боковой поверхности ванны ( $z = 0 \dots h_g, r(z) = D_g/2 - z \cdot \text{ctg} \varphi_0$ )  $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$ .

Область подины ванны ( $z = h_g, r = 0 \dots d_g/2$ )  $\frac{\partial C}{\partial z} = 0$ .

На оси ванны ( $z = 0 \dots h_g, r=0$ )

$$\partial C / \partial r = 0.$$

Таким образом, разработана математическая модель нестационарного теплопереноса в ванне расплава ДППТ.

### **4.3 Разработка математической модели теплового состояния расплава в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок**

#### *4.3.1 Методы воздействия на процессы затвердевания в кристаллизаторе с целью повышения качества слитка*

На границе затвердевания сплавов происходит ряд сложных процессов: выделение растворимых примесей, диффузия и термокапиллярный массоперенос, усадочное перемещение расплава и естественная конвекция. В различные периоды затвердевания преобладают разные движущие силы массопереноса. Наличие этих часто противоборствующих сил приводит к неустойчивости твердо-жидкой поверхности затвердевания и развитию различных морфологии кристаллической структуры отливки. Управляя конвективным теплопереносом, можно весьма эффективно изменять кристаллическую структуру литья. Помимо измельчения зерна увеличение скорости затвердевания препятствует развитию диффузии в жидкой фазе и ослабляет дендритную ликвацию.

Наиболее эффективными методами воздействия на процессы формирования литой структуры металла являются:

- воздействие на расплав затвердевающего металла упругими колебаниями (низкочастотной и высокочастотной вибрацией);
- наложение на расплав продольных и поперечных электромагнитных полей;
- теплофизические методы воздействия на кристаллизацию сплавов, введение микрохолодильников;
- физико-химические методы воздействия на кристаллизующийся металл; перемешивание расплава.

**Применение вибрации.** Целью использования вибрации является интенсификация процесса образования обломков кристаллов и перемешивания расплава в незатвердевшей части отливки.

Еще в начале XX в. было установлено, что интенсивное встряхивание кристаллизующегося слитка с частотой 1 – 100 раз/мин при амплитуде 15 – 20 мм способствует лучшему выделению газов из расплава, измельчению зерна, улучшению механических свойств. Для виброобработки расплава в форме служат пневматические, механические, гидравлические и электромагнитные вибраторы. Очевидно, что эффект от виброобработки расплава в форме будет достигнут, если одновременно обеспечиваются условия для затвердевания расплава от стенок формы, а режимы вибрирования должны обеспечивать разрушение растущих кристаллов.

**Использование ультразвуковых колебаний.** Обычно к ультразвуковым колебаниям относят упругие колебания с частотой  $16 \cdot 10^3 - 10^{10}$  Гц. Человеческое ухо способно слышать звуки с частотой от 15 до 15000 Гц. Установлено, что воздействие ультразвука на первичную кристаллизацию аналогично эффекту от виброобработки затвердевающего расплава. Продуктивным является введение ультразвуковых колебаний через плавящуюся проволоку или трубку с порошком модификатора или микрохолодильников.

**Применение электромагнитных полей.** Вынужденную вибрацию расплава в форме можно создать наложением бегущих, пульсирующих, вращающихся электромагнитных полей. Экспериментально установлено, что под одновременным действием скрещенных неоднородного электрического и однородного магнитного полей в расплаве возникает интенсивная циркуляция, которая обеспечивает эффект, аналогичный вибрированию формы.

Наложение электромагнитных полей приводит к усилению конвекции. С ростом напряженности магнитного поля, направленного перпенди-

кулярно конвективному движению расплава, значительно усиливается мощность этого движения. Например, при значении критерия Гартмана  $Ha = 10$ , характеризующего мощность поперечного магнитного поля, увеличивается значение критерия Грасгофа, характеризующего интенсивность конвективного потока металла, на четыре порядка [93]. При наложении продольного магнитного поля, направленного вдоль потока, эффект усиления незначителен.

**Введение в расплав микрохолодильников.** Микрохолодильники вводятся в расплав в виде металлических порошков, которые являются модификаторами или дополнительными центрами кристаллизации и измельчают зерно. Возможно даже их захлаживающее действие (что следует из названия). Размеры частиц используемых для этой цели порошков около 0,1 мм, их содержание от массы расплава колеблется от 3 до 10 % .

#### *4.3.2 Основные процессы при затвердевании стали*

Свойства и качество слитка и непрерывнолитых заготовок зависят более всего от типа микроструктуры литья и, особенно от расстояния между дендритами и его вторичными ветвями. Сплавы, затвердевающие с небольшими расстояниями между дендритами, обеспечивают меньшую дендритную неоднородность и повышенные механические свойства проката. При этом необходимо контролировать процессы ликвации примесей и выделение частиц вторичных фаз.

В затвердевающей стали наблюдаются три макроструктурные зоны (рисунок 4.20): внешняя микрозернистая 1, столбчатых кристаллов 2, центральная равноосных кристаллов 3.

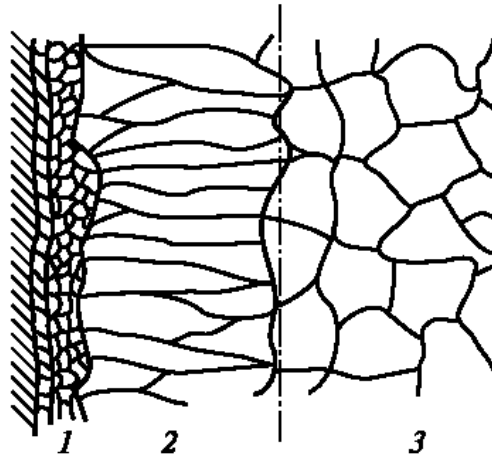


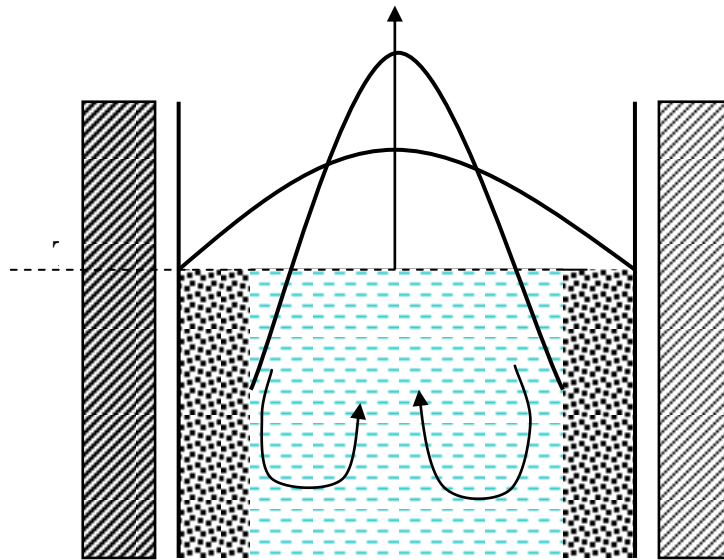
Рисунок 4.20 – Схема кристаллического строения затвердевающей стали

Контроль и управление процессами кристаллизации сплавов весьма успешно можно проводить путем внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл. Однако для получения эффективных результатов необходимо уточнить особенности основных процессов, сопровождающих затвердевание сплавов, и выявить основные параметры, на которые целесообразно воздействовать. В связи с этим необходимо провести обобщение представлений об основных процессах затвердевания. К ним относятся:

- условия роста дендритов,
- влияние конвективных потоков на тепло-массоперенос при затвердевании,
- влияние внешних воздействий на процессы затвердевания.

Рассмотрим условия роста дендритов. Движущей силой кристаллизации является скорость теплоотвода от поверхности растущего кристалла. Скрытая теплота затвердевания, выделяющаяся на фронте кристаллизации, должна непрерывно отводиться в объем расплава, окружающего дендрит, и непосредственно через затвердевающий дендрит к стенке изложницы. Основной причиной такого теплоотвода является создание переохлаждения в этом объеме  $\Delta T$ . В начальный момент кристаллизации при соприкосновении перегретой жидкой стали со стенкой изложницы интенсивность отвода тепла от затвердевающего объема и величина  $\Delta T$  сплава велики.

Быстрое охлаждение расплава приводит к образованию на стенке формы или в объеме расплава зародышей твердой фазы и последующему распространению их в затвердевающей отливке силами конвективного движения металла (рисунок 4.21). После начала зарождения твердой фазы начинает выделяться скрытая теплота кристаллизации сплавов и происходит разогрев расплава. Этот разогрев обычно повышает температуру расплава, приближая ее к равновесной температуре кристаллизации ( $T_{лик}$ ) сплава. При этих условиях рост новых зародышей прекращается, а рост образовавшихся зародышей продолжается.



*Рисунок 4.21 – Расположение зон переохлаждения металла в начальный период кристаллизации стали:  $T_1$  – температура начала теплоотвода,  $T_2$  – температура расплава при охлаждении его до  $T_{лик}$ ,  $V_u$  – скорость естественной конвекции*

При незначительном переохлаждении затвердевающего сплава выделяющаяся теплота кристаллизации замедляет рост кристаллов и усиливает диффузионное перераспределение ликвирующихся примесей. На этот процесс основное влияние оказывают следующие виды естественного конвективного движения расплава:

- междендритное перемещение расплава вследствие *усадки* стали;

- *термоконцентрационная* конвекция расплава;
- *термокапиллярная* конвекция;
- *естественная тепловая* конвекция внутри непрерывнолитой заготовки.

#### 4.3.3 Естественные гидродинамические процессы при затвердевании слитка в кристаллизаторе

При усадке затвердевших объемов расплава в междендритных пространствах образуются полости, в которые поступает расплавленный металл из внутренних объемов слитка.

Изменение плотности в зоне расплава и в зоне твердой фазы (по данным Р. Эллиота) показано на рисунке 4.22, а. Линии тока усадочного перемещения металла в объеме затвердевающего в изложницах металла с верхним обогревом слитка изображены на рисунке 4.22, б.

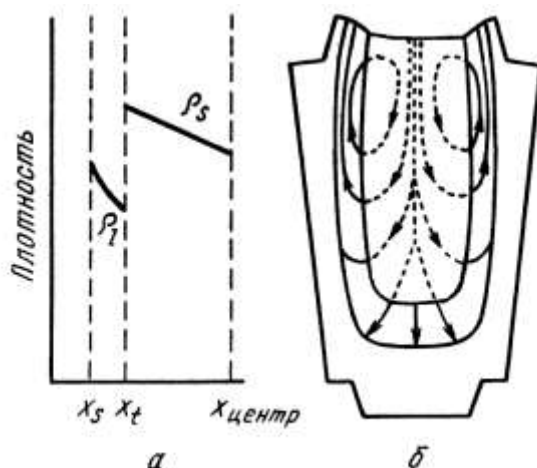


Рисунок 4.22 – Топография потоков расплава, возникающих вследствие усадки стали: а – распределение плотностей ликватов  $\rho_s$  и расплава  $\rho_l$  (в затвердевающем слитке); б – распределение потоков жидкой стали

Скорость движения такого потока можно рассчитать по формуле П. Зама и И. Штурма:

$$V_{yc} = \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_s} R, \quad (4.114)$$

где  $\rho_s, \rho_l$  – плотность стали при температуре солидуса и ликвидуса соответственно;  $R$  – скорость продвижения фронта затвердевания.

Оценим скорость усадки в кристаллизаторе. Будем считать, что на выходе из кристаллизатора имеем твердую корочку толщиной 30 мм, при непрерывной разливке время нахождения металла в кристаллизаторе порядка 80 – 100 с, отсюда  $R \approx 0,3$  мм/с,

$$V_{yc} = \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_s} R = \frac{7800 - 7400}{7800} 0,3 \approx 0,015 \text{ мм/с.}$$

Эта скорость направлена перпендикулярно движению слитка, поэтому даже при ее небольшом значении пренебрегать ею нельзя. Этот тип конвекции является причиной зональной ликвации слитка. Многими авторами экспериментально установлено, что даже медленные усадочные потоки вытесняют перегретые ликваты.

Рассмотрим роль *естественной тепловой* конвекции в процессах формирования непрерывнолитых заготовок. Естественная конвекция перегретого сплава вдоль границы затвердевания влияет на формирование кристаллической структуры и распределение неметаллических включений в объеме затвердевающего расплава. Это объясняется тем, что с увеличением интенсивности конвективного движения величина критерия Нуссельта  $Nu$  и коэффициент теплопередачи от перегретого расплава к границе затвердевания  $\alpha$  увеличиваются, а скорость роста кристаллов при этом существенно замедляется. При малых значениях критерия Прандтля, характерных для расплавленных металлов ( $Pr < 0,5$ ), коэффициент теплопередачи к охлаждающей стенке или границе затвердевания при ламинарном течении расплава может быть получен из уравнения Лефевра:

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} = 0,6(Gr \cdot Pr)^{0,25} = 0,6 \left( \frac{V_u^2 L^2}{\nu^2} \cdot \frac{\lambda}{a} \right)^{0,25}, \quad (4.115)$$



где  $V_u$  – скорость естественной конвекции;  $L$  – характерный размер обтекаемой поверхности;  $\lambda$ ,  $a$  – коэффициент теплопроводности и температуропроводности;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости.

Интенсивность теплопередачи при ламинарном режиме течения  $\alpha \sim V_u^{0.5}$ , а при турбулентном –  $\alpha \sim V_u^{0.8}$ .

Склонность к образованию столбчатых или равноосных дендритов в значительной степени определяется интенсивностью движения металла в незатвердевшей части отливки, которая зависит от отношения ускорения конвективного потока к ускорению силы тяжести  $\left(\frac{a}{g}\right)$ . Чем меньше это отношение, тем меньше интенсивность конвекции и больше склонность к развитию равноосных кристаллов. Свободная конвекция возникает в результате разности значений удельной массы охлажденного жидкого металла у границы затвердевания ( $T_2$ ) и перегретого расплава по оси слитка ( $T_1$ ). С увеличением температурного перепада в расплаве перед границей затвердевания  $\Delta T = T_1 - T_2$  возрастает скорость конвекции. Интенсивность развития естественной конвекции определяется критерием Грасгофа:

$$Gr = \frac{V_u^2 L^2}{\nu^2} = \frac{g \beta L^3 (T_1 - T_2)}{\nu^2}, \quad (4.116)$$

где  $L$  – характерный размер обтекаемой поверхности, в данном случае вертикальной; скорость естественной конвекции  $V_u = \sqrt{g \beta L (T_1 - T_2)}$ ;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\beta$  – коэффициент объемного теплового расширения жидкого металла;  $\Delta T = T_1 - T_2$  – разность температуры расплава являющейся движущей силой естественной конвекции.

При непрерывном литье в кристаллизаторе естественная конвекция наиболее существенна около разливочного стакана. С увеличением глубины проникновения  $L$  жидкого металла в районе лунки интенсивность естественной конвекции повышается пропорционально  $L^3$ .

#### 4.3.4 Цели моделирования. Основные допущения и ограничения модели

Рассмотрим процесс кристаллизации заготовки прямоугольного поперечного сечения в криволинейной МНЛЗ с радиальным кристаллизатором. Для условий ОАО «ММК» толщина заготовки одинакова для всех машин и составляет  $b=250$  мм, а ее ширина на МНЛЗ №1, №4 может быть от  $a=750$  до 2500 мм, а на МНЛЗ №2 и 3 – от  $a=910$  до 1350 мм. Скорость разливки может меняться от  $v=0,4$  до 1,0 м/мин и выбирается в зависимости от марки стали, параметров заготовки в соответствии с технологической инструкцией [94].

Считаем, что известны номер МНЛЗ и ее параметры, класс и химический состав стали, температура стали в промежуточном ковше, скорость разливки стали и ширина заготовки. Известны теплофизические свойства затвердевающего материала.

Качество получаемого слитка во многом определяется тепловыми условиями его затвердевания в кристаллизаторе. Ставилась задача определить:

- как изменяется во времени и соответственно по высоте кристаллизатора температурное поле затвердевающего слитка при различных технологических режимах работы МНЛЗ;
- как влияет эффективный коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , жидкой фазы на границы твердой и двухфазной области ( $\Psi(r,z,\tau)=1$ ); а также на границы жидкой и двухфазной области ( $\Psi(r,z,\tau)=0$ );
- как влияет горизонтальные составляющие скорости жидкой фазы  $u(x,y)$  на двумерные границы твердой и двухфазной области ( $\Psi(r,z,\tau)=1$ ); двумерные границы жидкой и двухфазной области ( $\Psi(r,z,\tau)=0$ ).

Задачу затвердевания заготовки решаем в декартовой системе координат. За начало отсчета принимаем точку касания разливочного стакана с жидким металлом (зона мениска). Расположим оси как показано на рисунке.

Принимаем следующие допущения и ограничения:

- считаем, что температура существенно меняется вдоль осей  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Температура в данной точке пространства при разливке в стабильном режиме не зависит от времени (в системе отсчета связанной с Землей);
- область моделирования тепловых процессов представляет собой параллелепипед  $ABCD A'B'C'D'$  (см. рисунок 4.23);
- для затвердевания жидкого металла используем квазиравновесную модель, принимаем, что в двухфазной зоне отсутствует диффузионное переохлаждение;
- считаем, что граничные условия на боковой грани  $ABB'A'$  такие же как на  $DCC'D'$ ; наблюдается симметрия граничных условий относительно плоскости  $EFF'E'$ . Это позволяет решать тепловую задачу для одной из половинок слитка, например  $EFF'E'DCC'D'$ .
- считаем, что в направлении  $z$  тепло передается только конвекцией, а передачей теплопроводностью можно пренебречь.

Докажем это. Определяющим для соотношения роли конвекции и теплопроводности является число Пекле

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{W_z \Delta z}{a},$$

где  $\Delta z$  – характерный размер, участок, где наблюдается максимальный градиент температур. Из практики известно, что максимальный градиент температур наблюдается вблизи контакта слитка с кристаллизатором в районе мениска. Это расстояние можно оценить как  $\Delta z \approx 100 \text{ мм} = 0,1 \text{ м}$ .

Минимальная скорость  $W_z = 0,4 \text{ м/мин} \approx 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ , коэффициент температуропроводности для твердой фазы  $a = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . При этих условиях  $Pe \approx 100$ . При выполнении условия  $Pe \gg 1$  можно пренебречь распространением тепла за счет теплопроводности. Это означает, что если выбрать любые две точки, имеющие одинаковые координаты  $x$  и  $y$ , а координата  $z_2 > z_1$  то температура второй точки зависит от температуры первой, а

температура первой не зависит от второй при заданном направлении движения слитка (см. рисунок 4.23).

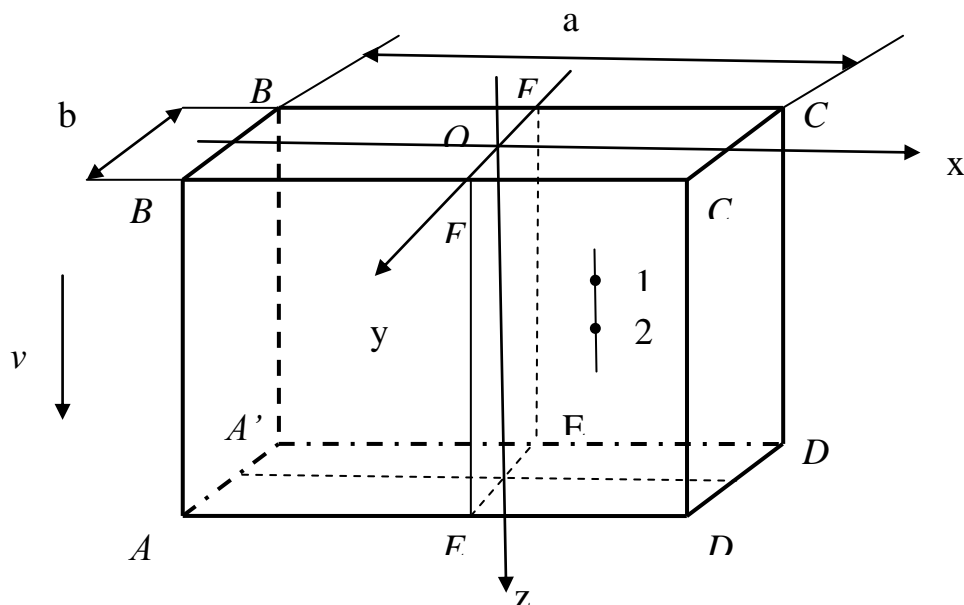


Рисунок 4.23 – Выбранная система координат

#### 4.3.5 Математическая модель теплового состояния заготовки в кристаллизаторе при наличии гидродинамических процессов

В основе математической модели лежит нелинейное уравнение теплопроводности при граничных условиях второго и третьего рода; учет теплоты затвердевания производится с помощью квазиравновесной теории двухфазной зоны стального слитка.

Распределение температуры в затвердевающем слитке в системе отсчета связанной с Землей описывается стационарным уравнением энергии с учетом фазового перехода:

$$c\rho V_z \frac{\partial t}{\partial z} - \rho L \frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right),$$

где  $\psi$  – доля твердой фазы, при  $\psi|_{t=t_{\text{сол}}} = 1$ ,  $\psi|_{t=t_{\text{лик}}} = 0$ .

Рассмотрим систему координат, связанную с произвольным объемом металла. Учитывая соотношение  $\frac{dz}{d\tau} = V_z$ , задача для выбранного объема становится нестационарной:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} - \rho L \frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right). \quad (4.117)$$

С учетом принятых допущений и используя подстановку  $\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial \tau}$

уравнение (4.117) можно записать:

$$\rho C_3 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) \text{ или более подробно} \quad (4.118)$$

$$\rho C_3 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial \lambda}{\partial x} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda}{\partial y} \cdot \frac{\partial t}{\partial y} + \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial y^2},$$

где величина эффективной теплоемкости представляется кусочно-непрерывной функцией:

$$C_3 = \begin{cases} C_{ж}, & \text{при } t > t_{лик}; \\ C_T \psi + C_{ж}(t_{лик})(1-\psi) - L \frac{\partial \psi}{\partial \tau}, & \text{при } t_{сол} < t < t_{лик}; \\ C_T(t), & \text{при } t < t_{сол}. \end{cases} \quad (4.119)$$

Коэффициент теплопроводности

$$\lambda = \begin{cases} k_\lambda \lambda_{ж}, & \text{при } t > t_{лик}; \\ \lambda_T \psi + \lambda_{ж}(1-\psi), & \text{при } t_{сол} < t < t_{лик}; \\ \lambda_T(t), & \text{при } t < t_{сол}. \end{cases} \quad (4.120)$$

Плотность затвердевающего слитка:

$$\rho = \begin{cases} \rho_{ж}, & \text{при } t > t_{лик}; \\ \rho_T \psi + \rho_{ж}(1-\psi), & \text{при } t_{сол} < t < t_{лик}; \\ \rho_T(t), & \text{при } t < t_{сол}. \end{cases} \quad (4.121)$$

Относительное количество твердой фазы, находящейся в равновесии с жидкостью при температуре  $t$ , может быть определено из диаграммы со-

стояния сплава  $Fe - C$  по правилу рычага. Если принять, что линии ликвидуса и солидуса – параллельные прямые, то

$$\psi = \frac{t_{лик} - t}{t_{лик} - t_{соо}}. \quad (4.122)$$

При постоянном темпе кристаллизации сплава внутри интервала температур  $t_l - t_c$  величина

$$-\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{1}{t_{лик} - t_{соо}}.$$

Для учета движения жидкого металла в горизонтальной плоскости необходимо совместно решать систему уравнений отдельно для жидкой области и твердой совместно с двухфазной:

$$\rho C_s \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial \lambda}{\partial x} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda}{\partial y} \cdot \frac{\partial t}{\partial y} + \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial y^2};$$

$$c_{ж} \rho_{ж} \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial t}{\partial x} + V_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{ж} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{ж} \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{ж} \frac{\partial t}{\partial z} \right).$$

#### *Краевые условия*

Из-за симметрии рассмотрим половину нашего слитка  $ABCD$  (рисунок 4.24). Будем считать, что поверхность  $AD$  находится со стороны большого радиуса, а поверхность  $BC$  со стороны малого. Начало координат сместим таким образом, чтобы ось  $Ox$  совпадала с поверхностью большого радиуса  $AD$ .

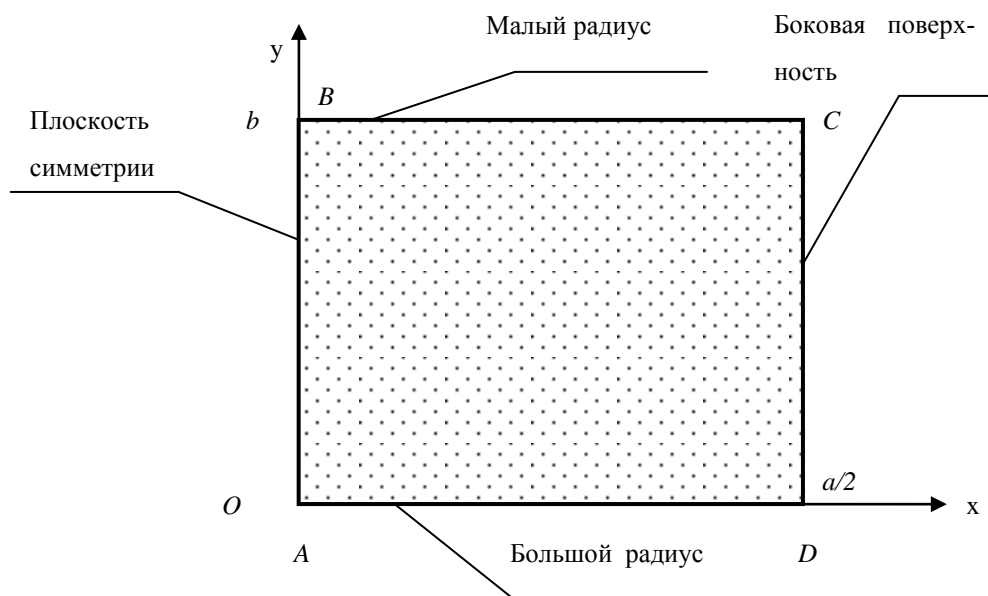


Рисунок 4.24 – Система координат и форма поперечного сечения заготовки

В начальный момент времени будем считать, что температура во всех точках расчетной области равна температуре металла в проковше:

$$t(x, y, 0) = T_{нк}. \quad (4.123)$$

Для определения граничного условия при теплоотдаче от затвердевающей жидкости используем метод конечных объемов. Для элемента объема, имеющего форму параллелепипеда  $f \Delta n$  лежащего вблизи поверхности охлаждающей стенки площадью  $f$  должно выполняться условие теплового баланса. Количество отводимого тепла кристаллизатором  $q$  равно количеству тепла фазового перехода и теплоемкости элемента объема

$$C_{\text{эф}} \Delta n \rho \frac{dt}{d\tau} \text{ и количеству тепла переданного из объема расплава } - \lambda \frac{\partial t}{\partial n}.$$

Нахождение слитка в кристаллизаторе соответствует моментам времени от  $\tau = 0$  до  $\tau_{kp} = \frac{H_k}{v}$ . При этом на поверхностях охлаждения действуют следующие граничные условия:

для поверхности  $CD$  ( $x = a/2, y = 0 \dots b$ ):

при  $t > t_{sol}$ ,

$$q = C_{\text{эф}} \Delta x \rho \frac{dt}{d\tau} - \lambda \frac{\partial t}{\partial x};$$

при  $t \leq t_{\text{sol}}$ ,

$$q = C_T \lambda \frac{\partial t}{\partial x};$$

для поверхности  $AD$  ( $y=0, \quad x=0 \dots a/2$ ) и  $BC$  ( $y=b, \quad x=0 \dots a/2$ ):

при  $t > t_{\text{sol}}$ ,

$$q = C_{\text{эф}} \Delta y \rho \frac{dt}{d\tau} - \lambda \frac{\partial t}{\partial y};$$

при  $t \leq t_{\text{sol}}$ ,

$$q = C_T \lambda \frac{\partial t}{\partial y}; \quad (4.124)$$

на оси симметрии:

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{AB} = 0. \quad (4.125)$$

На рисунке 4.25 показано изменение теплового потока по высоте кристаллизатора в зависимости от скорости непрерывной разливки стали по данным работы [95]. Максимальное значение его проявляется на расстоянии  $h = 170$  мм от верхней части широкой грани кристаллизатора, а минимальное – на выходе из кристаллизатора.

Экспериментально доказано, что величина теплового потока к стенке кристаллизатора прогрессивно падает по направлению движения непрерывной заготовки. Снижение теплового потока на расстоянии 100 мм от мениска объясняется тем, что часть тепла в этом месте теряется на излучение через мениск жидкого металла в окружающую среду. Показанная на рисунке 6.6 закономерность непрерывного уменьшения теплоотвода от жидкой стали, несомненно, вызывает постепенное падение скорости кристаллизации по высоте кристаллизатора.



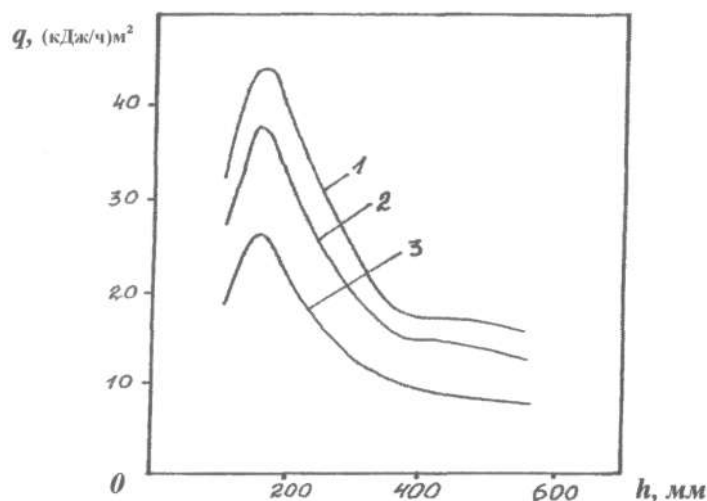


Рисунок 4.25 – Зависимость локального теплового потока в кристаллизаторе от расстояния до зеркала металла в кристаллизаторе при различных скоростях литья низкоуглеродистой стали: 1 – 2,0 м/мин; 2 – 1,5 м/мин; 3 – 0,8 м/мин

При уменьшении скорости разливки с 2,0 до 0,8 м/мин тепловой поток уменьшается в 1,8 раза. Неравномерность теплоотвода по высоте кристаллизатора и связанное с ней падение скорости кристаллизации стали вызывается главным параметром непрерывной разливки – образованием зазора между корочкой слитка и стенкой кристаллизатора. Отход заготовки и образование зазора наступает обычно на высоте 170 – 200 мм от мениска жидкой стали.

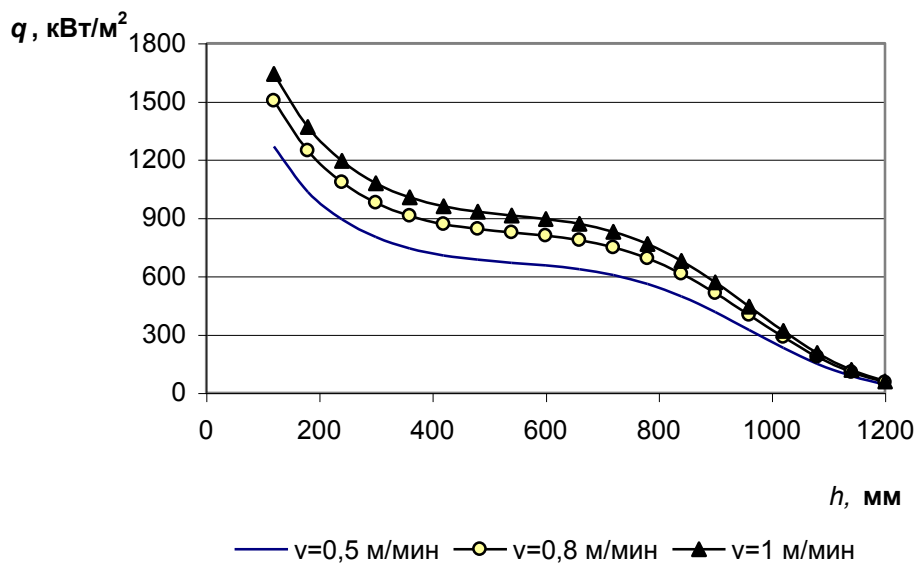
Плотность теплового потока  $q$  от горячего металла к рабочей поверхности кристаллизатора будем задавать, используя аппроксимационную зависимость, построенную по результатам исследований, проведенных методом термометрирования. Эксперименты были выполнены при эксплуатации кристаллизаторов, сконструированных на ОАО «Уралмаш – металлургическое оборудование», сечением 250×1550 мм в течение 145 плавов и диапазоне скоростей литья 0,6 – 1,2 м /мин на МНЛЗ №2 конвертерного цеха Новолипецкого металлургического комбината [93, 95].

Установлено, что тепловой поток зависит от ряда параметров разливки, главным образом от скорости разливки, и от расположения элемента стенки по высоте кристаллизатора. Согласно полученным данным в работах [93, 95], предлагается эмпирическая зависимость (рисунок 4.26):

$$q = v^{0,46668} \exp\{14,689 + h[-4,3376 + h(5,5939 - 3,1608h^2)] + 0,007815 / h / v - 5,7084 \cdot 10^{-8} h^{-5}\} \text{ Вт/м}^2, \quad (4.126)$$

где  $h$  – расстояние от данной точки рабочей поверхности до мениска, м;

$v$  – скорость разливки, м/мин.



*Рисунок 4.26 – Зависимость локального теплового потока в кристаллизаторе от расстояния от зеркала металла в кристаллизаторе при различных*

*скоростях литья низкоуглеродистой стали*

#### *4.3.6 Эффективный коэффициент теплопроводности циркулирующего расплава*

Уравнение (4.118) не учитывает движение жидкого металла в горизонтальной плоскости. В работах ряда авторов [96] предлагается косвенный способ учета явлений гидродинамического перемешивания расплава в жидком ядре. Для учета явлений конвективного теплопереноса в жидкой фазе вводят понятие эффективного коэффициента теплопроводности  $\lambda_{\text{Э}}$ ,

значение которого принимают в несколько раз больше коэффициента теплопроводности в жидкой фазе.

На интенсивность затвердевания стали влияют не только теплопоглощающие свойства материала стенки кристаллизатора, но и развитие мощных турбулентных потоков перегретой стали. Известно, что струя стали, попадающая в кристаллизатор из промковша, имеет большую кинетическую энергию, достаточную для перемешивания больших объемов металла. Подвод металла в кристаллизатор осуществляется различными способами: открытой струей, через проточный погружной стакан, через погружной стакан с боковыми отверстиями и т.п. Не анализируя подробно условий перемешивания металла в кристаллизаторе падающей струей, отметим лишь, что там, где эти потоки имеют большую скорость, происходит более интенсивный прогрев стенки кристаллизатора, а нарастание твердой корочки замедляется.

Движение расплава в незатвердевшей части слитка существенно усложняет расчет затвердевания слитка, поскольку для корректного учета явлений тепло- и массопереноса в жидкой фазе необходимо, наряду с уравнением теплопроводности, принимать во внимание систему уравнений движения жидкости и неразрывности. Наиболее простой выход из затруднения состоит в использовании некоторого эффективного коэффициента теплопроводности жидкой фазы  $\lambda_s$ , значение которого увеличено по сравнению с коэффициентом молекулярной теплопроводности  $\lambda$  в определенное число раз  $k_\lambda = \lambda_s / \lambda$ . Очевидно, чем интенсивнее циркуляция расплава, тем выше интенсивность переноса тепла, тем больше эффективный (приведенный) коэффициент теплопроводности.

По количественной оценке эффективного коэффициента в литературе встречаются противоречивые данные: одни авторы предлагают увели-

чивать величину  $\lambda_{\Sigma}$  в  $k_{\lambda} = 5 \div 10$  раз, а другие в  $k_{\lambda} = 10 \div 50$  раз. Критерием здесь могут служить только экспериментальные данные.

Для случая естественно (свободной) циркуляции жидкости в замкнутом пространстве значение приведенного коэффициента теплопроводности установлено эмпирически и представлено в виде зависимости

$$k_{\lambda} = k_{\lambda}(Gr \cdot Pr)$$

В работе [97] приведен график этой зависимости для горизонтального, вертикального слоев и шаровой полости. При перепаде температур в 1 градус на вертикальной стенке 0,1 м имеем  $Gr = 2,8 \cdot 10^6$ ,  $Pr = 0,15$ , при полученном значении  $Gr \cdot Pr = 4,2 \cdot 10^5$  коэффициент увеличения теплопроводности  $k_{\lambda} = 4,1$ .

Естественно при вынужденном течении металла эта величина должна быть больше.

#### **4.4 Разработка модели прямой и обратной связи информационных потоков с различных металлургических агрегатов полного цикла производства металла**

Информационные потоки, обеспечивающие функционирование всех служб и подразделений предприятия, образуют систему – единое информационное пространство предприятия [98].

Термин «Единое информационное пространство» применительно к предприятию означает, что любые сведения, имеющиеся на предприятии, могут быть получены по запросу в различных срезах и сочетаниях. Практически концепция единого информационного пространства реализуется при создании ERP (Enterprise Resource Planning) – систем.

ERP – системы взаимодействуют с системами оперативного управления производством – MES (Manufacturing Execution System) – системами. MES – системы обеспечивают решение следующих задач:

- контроль выполнения производственного плана;

- материальный учет;
- сбор и передача в ERP – систему актуальных данных о состоянии производства.

С большей степенью детализации можно сформулировать следующие задачи, решаемые системой:

- контроль состояния и распределение ресурсов – управление ресурсами производства: технологическим оборудованием, материалами, персоналом, документацией, инструментами, методиками работ;
- оперативное планирование – расчет производственных расписаний, основанный на приоритетах, атрибутах, характеристиках и способах, связанных со спецификой изделий и технологией производства;
- диспетчеризация производства – управление потоком изготавливаемой продукции по операциям, заказам, партиям, сериям, посредством рабочих нарядов;
- управление документами – контроль содержания и прохождения документов, сопровождающих изготовление продукции, ведение плановой и отчетной цеховой документации;
- сбор и хранение данных – взаимодействие информационных подсистем в целях получения, накопления и передачи технологических и управляющих данных, циркулирующих в производственной среде предприятия;
- управление персоналом – обеспечение возможности управления персоналом в ежеминутном режиме;
- управление качеством продукции – анализ данных измерений качества продукции в режиме реального времени на основе информации поступающей с производственного уровня, обеспечение должного контроля качества, выявление критических точек и проблем, требующих особого внимания;

- управление производственными процессами – мониторинг производственных процессов, автоматическая корректировка либо диалоговая поддержка решений оператора;
- управление техобслуживанием и ремонтом – управление техническим обслуживанием, плановым и оперативным ремонтом оборудования и инструментов для обеспечения их эксплуатационной готовности;
- отслеживание истории продукта – визуализация информации о месте и времени выполнения работ по каждому изделию. Информация может включать отчеты: об исполнителях, технологических маршрутах, комплектующих, материалах, партионных и серийных номерах, произведенных переделках, текущих условиях производства и т.п.;
- анализ производительности – предоставление подробных отчетов о реальных результатах производственных операций. Сравнение плановых и фактических показателей.

Вышеперечисленные задачи должны быть конкретизированы с учетом специфики металлургического производства. Производственная программа металлургического предприятия формируется из заказов. Каждый заказ характеризуется набором реквизитов. Существенны следующие реквизиты: типоразмер профиля; марка стали; дополнительные требования по химсоставу (если таковые имеются); дополнительные требования по механическим свойствам (если таковые имеются); дополнительные требования к качеству поверхности (если таковые имеются); дополнительные требования по геометрическим характеристикам профиля (если таковые имеются).

Для производства каждого заказа определяется технологический маршрут. Технологический маршрут состоит из технологических операций.

Заказ может состоять из одной или нескольких партий. Характеристики каждой партии однозначно определяются заказом, в состав которого входит данная партия.

Система должна отслеживать прохождение партии по всему технологическому маршруту. На каждой операции, входящей в технологический маршрут, фиксируются основные технологические параметры, определяющие соответствие изготавливаемой партии нормативным документам. На основании зафиксированных параметров и информации, поступившей с предыдущих технологических операций, формируется прогноз качественных характеристик партии. При обнаружении несоответствия качественных характеристик нормативным документам производится анализ наиболее вероятных причин потери качества.

Методологической основой современных ERP и MES систем является объектный подход [99, 100]. Следуя этому подходу, составим объектную модель рассматриваемой системы. Неотъемлемой частью данной модели являются информационные потоки.

Классы, моделирующие материальные объекты и операции над ними  
Изделие (Product) в модели соответствует партии.

Характеристики: нормативные документы; типоразмер профиля; марка стали; дополнительные требования по химическому составу (если таковые имеются); дополнительные требования по механическим свойствам (если таковые имеются); дополнительные требования к качеству поверхности (если таковые имеются); дополнительные требования по геометрическим характеристикам профиля (если таковые имеются); технологический маршрут (ссылка на документ).

Характеристики объекта Заготовка (Semi-product): нормативные документы; изделие (для производства которого предназначена заготовка); набор параметров; технологическая операция.

Характеристики объекта Технологический маршрут (Process flow); нормативные документы; последовательность технологических операций; набор изделий (ссылка на документ);

Характеристики объекта Технологическая операция (Manufacturing operation): нормативные документы; вид операции; оборудование; продукт на входе; продукт на выходе; набор операций детализированных (если таковые имеются); требования к продукту на входе; требования к продукту на выходе; требования к оборудованию; контролируемые параметры операции;

Характеристики объекта Технологическое оборудование (Manufacturing equipment): нормативные документы; перечень технологических операций; перечень составляющих технологических секций (если таковые имеются); контролируемые параметры технологических операций; реквизиты обрабатываемой продукции.

Характеристики объекта Технологическая операция детализированная (Detailed manufacturing operation): нормативные документы; вид операции; оборудование (технологическая секция); продукт на входе; продукт на выходе; требования к продукту на входе; требования к продукту на выходе; требования к оборудованию; контролируемые параметры операции.

Характеристики объекта Технологическая секция (Element): нормативные документы; перечень технологических операций; оборудование; контролируемые параметры технологических операций;

Объект класса «Технологическое оборудование» выполняет законченную операцию и может содержать отдельные объекты класса «Технологическая секция» (например, прокатный стан, включающий в себя набор клетей) или не содержать таковых (например, металлургическая печь).

Технологическая операция выполняется объектом класса «Технологическое оборудование», Технологическая операция детализированная выполняется объектом класса «Технологическая секция».



Классы, моделирующие средства принятия решений.

Характеристики объекта Блок обработки информации (Information processing block, IPB): нормативные документы; средства приема информации; средства передачи информации; перечень оборудования.

Характеристики объекта Блок анализа информации и прогноза качества (Analysis and Quality prediction block, AQPВ): нормативные документы; база знаний о технологическом процессе; хранилище данных о технологическом процессе; средства формирования прогноза; средства поиска вероятных причин отклонений в технологическом процессе.

Металлургические технологические процессы можно условно разделить на два принципиально различных вида. В процессах коксохимического, доменного, сталеплавильного производства в результате переработки нескольких видов сырья получается новый продукт, иного по сравнению с сырьем химсостава (кокс, чугун, сталь). В процессах обработки металлов давлением заготовка принимает заданную форму и приобретает требуемые механические свойства практически без изменения химсостава. Рассмотрим уточненные классы, используемые в описании прокатного передела.

В данном переделе можно выделить два вида технологических операций – формообразующие и неформообразующие. Формообразующие операции состоят в пластической деформации заготовки (обжатие в прокатной клетке в процессе листовой или сортовой прокатки). К неформообразующим операциям относят нагрев металла, удаление окалины (травление или механическое удаление), нанесение подсмазочного покрытия и смазки, перемещение, резку металла, упаковку.

Имеет смысл отдельно рассматривать процессы листовой и сортовой прокатки.

Характеристики объекта Прокатный стан горячей листовой прокатки (Hot rolling mill): нормативные документы; тип стана; количество клеток; максимальная ширина вала; мощность электродвигателей; макси-

максимально допустимое усилие прокатки; максимально допустимый момент прокатки; перечень переменных параметров.

Характеристики объекта Клеть стана горячей листовой прокатки (Hot rolling mill stand): нормативные документы; прочностные характеристики клетки; максимальный момент прокатки.

Информационные потоки в рассматриваемой системе поддерживаются объектами класса блок обработки информации (IPB).

Условно-постоянная (нормативно - справочная) информации хранится в базах данных; для поддержки систем интеллектуального анализа используются хранилища данных.

Переменная информация передается в систему автоматическими фиксирующими устройствами. Применяется опрос производственных объектов с определенной периодичностью или передача информации, определяемая событиями (изменением течения процесса, изменением состояния агрегата).

Технологическое оборудование коксохимического, доменного, сталеплавильного производств может находиться в одном из состояний: загрузка; процесс; выгрузка; простой (тихий ход).

Технологическое оборудование прокатного производства может находиться в одном из состояний: процесс; перевалка (ремонт); простой (ожидание).

С каждой единицы технологического оборудования данных производств в блок обработки информации (IPB) информация передается по следующей схеме:

- состояние технологического оборудования в текущий момент;
- параметры технологического процесса в текущий момент;
- реквизиты обрабатываемой продукции (если имеется продукция в обработке).

Таким образом, устанавливается соответствие между параметрами обрабатываемой продукции на каждом из агрегатов и отслеживаемыми партией и заказом.

Поступившая в блок обработки информации (IPB) информация с любой операции технологического процесса передается в блок анализа и прогноза качества (AQPВ). В данном блоке выполняются следующие действия:

- начальная обработка – проверяется принадлежность полученных данных интервалам, определенным в технологических инструкциях;
- на основании углубленного анализа полученных и накопленных данных вырабатывается прогноз качества заготовки в анализируемом переделе;
- при неблагоприятном ходе технологического процесса или прогнозе определяются наиболее вероятные причины и варианты их устранения; данные анализа передаются персоналу для принятия окончательного решения (в процессе анализа используются данные по всем отработанным операциям технологического процесса).
- при заранее определенных условиях или при вмешательстве персонала оперативные данные помещаются для хранения в хранилище данных.

Таким образом, формируются прямые и обратные информационные потоки. Прямые информационные потоки функционируют по схеме:

*«оборудование N - 1» – IPB (AQPВ) – «оборудование N».*

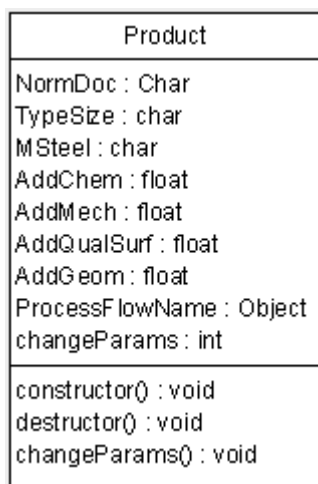
Обратные информационные потоки функционируют по схеме:

*«оборудование N» – IPB (AQPВ) – «весь предшествующий процесс»*

(с учетом выданной AQPВ оценки вероятности получения дефекта на одной из операций).

Система классов и взаимодействий между ними была разработана средствами унифицированного языка моделирования (UML) [100]. В качестве средства разработки UML – модели был выбран свободно распространяемый программный продукт ArgoUML [100].

На рисунке 4.27 представлена схема класса «Изделие», разработанная с помощью данного программного продукта. Перечисленные в описании параметры были описаны ранее. Конструктор и деструктор предназначены для включения нового изделия в сортамент и его исключения соответственно. Предусмотрена функция изменения параметров. Данный класс служит отправной точкой для создания с помощью наследования разветвленной иерархии, описывающей весь сортамент.



*Рисунок 4.27 – Графическое представление класса изделие средствами UML*

На рисунке 4.28 показано взаимодействие объектов классов «Блок обработки информации» и «Технологическое оборудование» при передаче управляющего воздействия. Отношение «один – ко – многим» показывает, что один объект типа «Блок обработки информации» взаимодействует со многими объектами типа «Технологическое оборудование».

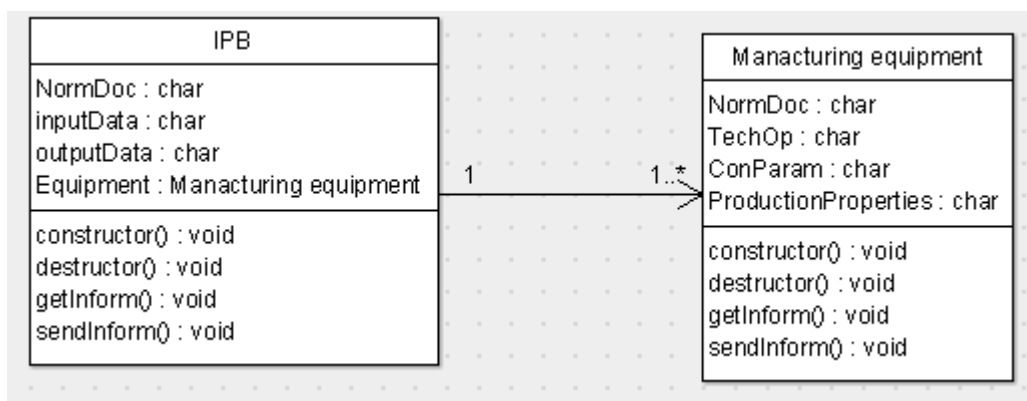


Рисунок 4.28 – Схема взаимодействия классов «Технологическое оборудование» и «Блок обработки информации»

Развитые средства UML (диаграммы классов, состояний, вариантов использования, деятельности, кооперации и т.д.) позволяют строить адекватные статические и динамические модели, описывающие информационные процессы в системе.

#### 4.5 Разработка статистической модели оценки и прогнозирования качества непрерывно-литой заготовки

##### 4.5.1 Анализ изображения как математическая задача

Под цифровым изображением понимается информация, организованная в виде некоторой числовой матрицы, записанной на какой-либо машинный носитель и воспроизводящей свойства изображаемого объекта и деформации, которые связаны со способом и процессом получения изображения. Под обработкой изображения понимается применение к нему системы преобразований, приводящих изображение к виду, удобному для анализа, или улучшающему его качество. Под анализом изображения понимается применение к нему системы преобразований, обеспечивающей извлечение из изображения полезной информации о свойствах изображаемого объекта или процесса [101].

На протяжении приблизительно двадцати пяти последних лет значительная часть прикладных задач обработки информации и анализа данных связана с изображениями (это особенно справедливо для приложений рас-

познавания образов и, отчасти, искусственного интеллекта). Этот процесс отражает как появление новых технических средств получения информации, обеспечивающих представление зарегистрированных и накопленных данных в виде изображений, так и рост известности и популярности собственно распознавания образов в качестве мощной и практичной методологии математической обработки и анализа информации и выявления скрытых закономерностей. В качестве примеров можно отметить обработку и анализ данных дистанционного зондирования посредством съемки со спутников объемных изображений объектов, получаемых с помощью голографических установок, результатов применения методов неразрушающих испытаний и контроля в промышленности, разработку «органов зрения» роботов и современных медицинских систем обследования и диагностики (рентгенография, машинная томография, эндоскопия и т. д.).

В области машинной обработки изображений обычно выделяют три основных направления: машинную графику, обработку изображений и распознавание зрительных образов – изображений. Задача распознавания изображений заключается в получении формального описания предъявленного изображения или в его отнесении к одному из известных классов. Задачи машинной графики сводятся к порождению изображения по исходной информации, представленной в форме, отличной от изображения. Распознавание изображений – в определенном смысле задача, обратная задаче машинной графики: при решении задачи распознавания изображение «задается», а в процессе решения оно «преобразовывается» в некоторое формальное описание (набор чисел, символов, граф и т. д.). При обработке изображений как начальной, так и финальной информацией служат изображения.

Создавая методы и системы автоматизированной обработки изображений, необходимо искать способы эффективной формализации изображений для того, чтобы иметь возможность работать с представлениями,

отражающими семантику изображения – информацию, заключенную в его внутренней структуре и структуре внешних связей части реального мира, воспроизводимой с помощью изображения.

При работе с изображениями необходимо разрешать задачи, возникающие в связи с тремя основными проблемами: описанием (моделированием) изображений; разработкой и выбором математических средств обработки и анализа изображений; аппаратной реализацией математических методов работы с изображениями.

Задачи, связанные с получением формальных описаний изображений как объектов анализа и формированием и выбором процедур анализа и распознавания, решаются при помощи изучения внутреннего строения, структуры и содержания изображения как результата тех операций, при помощи которых изображение может быть построено из подизображений и других объектов более простой природы. Поскольку этот способ характеристики изображения является операциональным, весь процесс обработки и распознавания изображения, включая построение формального описания – модели изображения, можно рассматривать как реализацию на изображении некоторой системы преобразований, которые определены на классах эквивалентности, представляющих ансамбли допустимых изображений [101].

При работе с изображениями характер и содержание задачи распознавания отличны от свойственных классической постановке математической теории распознавания [101, 102]. В чистом виде последняя применима при работе с такими видами информации, как результаты наблюдений, измерений, осмотра, экспертные оценки и т. п., т. е. при отсутствии отношений порядка, превращающих неупорядоченное множество признаков объекта в целостный объект. Формальные описания объектов распознавания в этом случае сравнительно просты, а требования к организации и представлению исходной информации минимальны – вполне допустимо

ограничиваться простыми таблицами типа «признак – значение признака» [103]. Основная особенность таких моделей состоит в том, что они представляются некоторым набором характеристик, взаимосвязь и взаимоотношения которых, вообще говоря, игнорируются. При этом предполагается, что каждый объект отождествляется с некоторой точкой многомерного признакового пространства, а класс объектов представляется «компактным» множеством таких точек. Этот способ описания совершенно не зависит от «материальной» специфики объектов распознавания: набором признаков можно с равным успехом задавать и клиническое состояние больного, и геологическое и геофизическое описание месторождения полезных ископаемых, и текущее состояние строительства крупного энергетического объекта. Простота построения таких моделей, естественно, очень привлекательна, и в тех случаях, когда механизм, составляющий суть изучаемого явления или объекта, неизвестен, либо признаки действительно автономны, либо, наконец, природа образов такова, что информация, отражающая отношения между составляющими, не очень важна для процесса анализа, обращение к таким моделям вполне правомерно.

Таким образом, в случае распознавания со стандартной информацией [103; 104, с. 5 – 8; 105, с. 1294 – 1309] не ставится как таковая задача построения формального описания объекта – оно задается неупорядоченным набором признаков и при его синтезе математические средства практически не используются, хотя сами признаки, в принципе, могут выделяться или выбираться с помощью математических методов. Собственно математические конструкции с помощью каких-либо формальных методов из этих признаков не строятся.

При переходе к задачам распознавания изображений возникают математические задачи, связанные с формальным описанием изображения как объекта анализа. Последний, главным образом, опирается на рассмотрение параметров четырех типов: контраста, цвета, формы и текстуры.



Контраст играет существенную роль в обработке изображений, поскольку часто именно им определяется качество «картинки». Цвет служит полезным признаком для разделения отдельных частей изображения, улучшая одновременно его эстетические качества. Форма (очертания) представляет группу признаков, которые используются для распознавания объектов, содержащихся в изображении, с учетом его геометрических свойств. Группа текстурных признаков широко используется при отнесении изображения как отдельного объекта распознавания к некоторому классу и для интерпретации результатов решения задачи распознавания.

При распознавании (т. е. при формализации изображения как объекта распознавания) «содержание» изображения характеризуется информацией трех типов: идентифицируемые объекты с хорошо определенной структурой, идентифицируемые объекты с плохо определенной структурой («нечеткие» образы), неидентифицируемые объекты.

Таким образом, в процессе анализа изображения должна использоваться информация, отражающая механизм формирования образа, т. е. как изображения в целом, так и объектов, на нем представленных. Учет структуры изображений сводится к определению того, какие объекты можно выделить на изображении, насколько они могут или должны быть элементарны и в каких отношениях пребывают эти объекты и элементы. Следовательно, в основе ввода структурной информации в описание объектов распознавания лежат изучение и использование структур отношений элементов, составляющих изображение. Реализуется этот метод при помощи построения модели изображения в виде иерархической структуры более простых объектов. В результате удается в явном виде представлять и использовать иерархическую структурную информацию, содержащуюся в изображении: изображение описывается через некоторую систему объектов, каждый объект описывается с помощью более простых объектов, последние снова описываются с помощью еще более простых объектов и т. д.

Задача распознавания изображений отличается рядом специфических особенностей, не свойственных задаче распознавания со стандартной информацией. Отметим их:

- построение модели изображения как объекта анализа становится самостоятельной задачей, разрешаемой в процессе анализа;
- модель изображения должна включать структурную или, по меньшей мере, реляционную информацию, т. е. она должна представлять собой некоторую формальную конструкцию, при получении которой последовательно проводится принцип учета иерархичности структуры объекта и отношений, существующих между отдельными элементами этой иерархии как в пределах одних и тех же уровней, так и между ними;
- изменяются понятия начальной и финальной информации. Процесс распознавания изображений имеет многоуровневый характер, при котором исходная модель изображения в результате применения к ней процедуры распознавания преобразовывается в модель изображения, относящуюся к другому морфологическому уровню; к полученной модели снова применяется процедура распознавания и т. д., причем правило остановки зависит от вида результатов, требующихся для решения конкретной задачи;
- тесная связь процессов описания и распознавания изображений и необходимость включения в итерационный процесс анализа в модели изображений, относящихся к различным морфологическим уровням, означают, что алгоритм распознавания изображений включает, помимо распознающего оператора и решающего правила [104, с. 5 – 8], оператор, осуществляющий приведение изображения к виду, удобному для распознавания.

Конкретными целями исследований и разработок в этой области являются создание автоматизированных систем обработки изображений

(АСОИЗ) и распознавания изображений (распознающих АСОИЗ), а также автоматизация процесса разработки таких систем. Достижение этих целей связано с решением математических задач, относящихся, главным образом, к следующим направлениям:

- изображение как способ организации и представления информации;
- математические методы получения формального описания изображения;
- разработка, выбор и исследование математических методов обработки изображений;
- разработка, выбор и исследование математических методов распознавания изображений;
- разработка и исследование эффективности программного обеспечения АСОИЗ и распознающих АСОИЗ;
- разработка, выбор и исследование эффективности вычислительных систем для обработки и распознавания изображений;
- аппаратная реализация алгоритмов обработки и распознавания изображений.

Решение этих задач, естественно, требует использования практически всей мощи и разнообразия математического аппарата и информационных технологий.

При разработке и анализе систем обработки изображений удобно, а часто и необходимо, иметь математическое описание подлежащих обработке изображений. Существуют два основных подхода к такому описанию: детерминированный и статистический. При детерминированном описании вводится математическая функция, представляющая изображение, и рассматриваются свойства изображения в каждой точке. При статистиче-

ском описании изображение определяется усредненными характеристиками.

Изображение может быть представлено как набор графических примитивов, отрисовка которых формирует изображение. Если изображение описывается двумерным массивом, каждый элемент которого представляет собой некоторое описание цвета, то такое изображение называют растровым. Растровое изображение можно представлять как прямоугольную матрицу точек различного цвета. Размер матрицы определяется количеством строк и столбцов изображения [106].

Существует несколько типов растровых изображений. Они отличаются друг от друга способами представления и хранения информации в цвете и яркости пикселя в памяти. Цвет образуется в результате смешивания нескольких составляющих, которые могут быть заданы в различных системах (или цветовых пространствах, color space). Термин «глубина цвета» (color depth) используется для обозначения того, сколько бит необходимо для хранения информации о цвете пикселя. Глубина цвета измеряется в битах на пиксель. Объем памяти в байтах, необходимый для хранения растрового изображения, можно определить по формуле  $V = \frac{c \cdot r \cdot d}{8}$ , где  $c$  – количество столбцов;  $r$  – количество строк;  $d$  – глубина цвета.

Обычно выделяют следующие типы изображений, каждый из которых предназначен для решения определенного круга задач: бинарные; полутоновые; палитровые; полноцветные.

Пиксели бинарного (black and white) изображения могут принимать только два значения 0 и 1, которые обозначают соответственно черный и белый цвета. Глубина цвета для бинарных изображений составляет  $1 \frac{\text{бит}}{\text{пиксел}}$ .

Полутоновыми (Intensity, Grayscale) называют изображения, пиксели которых могут принимать одно из значений интенсивности какого-либо

одного цвета в диапазоне от минимальной до максимальной интенсивности. Обычно предполагается, что в полутоновом изображении хранятся градации серого цвета в диапазоне от черного до белого. Поэтому иногда полутоновые изображения называют серыми или изображениями в градациях серого, в качестве синонима интенсивности используется термин «яркость пикселя».

В настоящее время наиболее широкое применение имеют полутоновые изображения с глубиной цвета  $8 \frac{\text{бит}}{\text{пиксел}}$ . Они могут хранить 256 значений яркости (от 0 до 255).

В отличие от полутоновых изображений, в которых значение пикселя непосредственно соответствует его яркости, в палитровых (Indexed) изображениях значения пикселей являются ссылками на ячейки карты цветов (colormap), которые и содержат описание цвета пикселя в некоторой цветовой системе. Бинарные и полутоновые изображения могут быть представлены в виде палитровых без потери информации.

Полноцветными (True color) называют изображения, пиксели которых непосредственно хранят информацию об интенсивностях цветовых составляющих. Это изображение хранит полную информацию о цвете, но требует значительного количества памяти и является избыточным и неэффективным для большинства реальных задач обработки изображения.

Построению и развитию системы количественных характеристик воспроизведения одноцветных изображений уделялось большое внимание [54]. Разумные количественные меры должны хорошо согласовываться с результатами субъективных оценок. Кроме того, желательно, чтобы эти меры имели простую аналитическую форму и их можно было применять в качестве критериев оптимальности при оптимизации или выборе параметров систем обработки изображений.

Количественные меры воспроизведения можно разделить на две группы: одиночные и парные. Одиночная мера представляет собой число, сопоставляемое изображению на основе анализа его структуры. Парная мера является числовым результатом сравнения двух изображений [107, 108].

Измерение верности в цифровой системе изображения можно провести, используя либо непрерывное изображение, сформированное из массива отсчетов, либо сам этот массив. Обычно предпочитают второй способ, так как он проще с практической точки зрения. Однако для того чтобы измерения на массиве отсчетов согласовались с результатами субъективных оценок, воспроизводящее устройство не должно создавать больших или, по крайней мере, непредсказуемых искажений изображения.

Рассмотрим некоторую функцию целочисленного аргумента  $F(x, y)$ , определенную в прямоугольной области, для которой  $-L_x \leq x \leq L_x$  и  $-L_y \leq y \leq L_y$ , где  $L_x$  и  $L_y$  – половина ширины и высоты изображения.

Для этой функции можно рассмотреть следующие математические одиночные характеристики:

–одиночная оценка

$$Q = \sum_{i=-L_x}^{L_x} \sum_{j=-L_y}^{L_y} F(x_i, y_j); \quad (4.127)$$

–отношение Штреля

$$Q_s = \frac{\sum_{i=-L_x}^{L_x} \sum_{j=-L_y}^{L_y} F(x_i, y_j)}{\sum_{i=-L_x}^{L_x} \sum_{j=-L_y}^{L_y} F_0(x_i, y_j)}, \quad (4.128)$$

где  $F_0(x, y)$  – матрица эталонного изображения;

– величина эквивалентного прямоугольника пропускания

$$Q_p = \sum_{i=-L_x}^{L_x} \sum_{j=-L_y}^{L_y} F^2(x_i, y_j). \quad (4.129)$$

Для построения парных мер качества введем для рассмотрения эталонное изображение  $\bar{F}(x, y)$  и искаженное  $F(x, y)$ . Для этого случая получим следующие математические парные характеристики:

–взаимная корреляция

$$K = \sum_{i=-L_x}^{L_x} \sum_{j=-L_y}^{L_y} F(x_i, y_j) \bar{F}(x_i, y_j); \quad (4.130)$$

–нормированная взаимокорреляционная мера

$$K_n = \frac{\sum_{i=-L_x}^{L_x} \sum_{j=-L_y}^{L_y} F(x_i, y_j) \bar{F}(x_i, y_j)}{\sum_{i=-L_x}^{L_x} \sum_{j=-L_y}^{L_y} F^2(x_i, y_j)}; \quad (4.135)$$

–нормированная абсолютная ошибка

$$K_a = \frac{\sum_{i=-L_x}^{L_x} \sum_{j=-L_y}^{L_y} |F(x_i, y_j) - \bar{F}(x_i, y_j)|}{\sum_{i=-L_x}^{L_x} \sum_{j=-L_y}^{L_y} F(x_i, y_j)}; \quad (4.136)$$

–нормированная среднеквадратичная ошибка

$$K_s = \frac{\sum_{i=-L_x}^{L_x} \sum_{j=-L_y}^{L_y} (F(x_i, y_j) - \bar{F}(x_i, y_j))^2}{\sum_{i=-L_x}^{L_x} \sum_{j=-L_y}^{L_y} F^2(x_i, y_j)}; \quad (4.137)$$

–пиковая среднеквадратичная ошибка

$$K_p = \frac{1}{4L_x L_y} \frac{\sum_{i=-L_x}^{L_x} \sum_{j=-L_y}^{L_y} (F(x_i, y_j) - \bar{F}(x_i, y_j))^2}{\max_{\substack{x_i \in [-L_x, L_x] \\ y_j \in [-L_y, L_y]}} F(x_i, y_j)}. \quad (4.134)$$

На практике обычно предпочитают пользоваться среднеквадратичной, а не абсолютной ошибкой, поскольку первая более удобная для анализа, чем вторая [107, 108].

По характеру используемых характеристик можно сказать, что они выполняют статистическое описание изображений.

#### 4.5.2 Математическая модель для описания изображения серного отпечатка темплета от непрерывно-литой заготовки прямоугольного сечения

Характер изображения серного отпечатка темплета непрерывно-литой заготовки позволяет рассматривать его как изображение типа Grayscale.

Для описания изображения серного отпечатка можно ввести дискретную функцию  $F(x, y)$ , определенную в прямоугольной области, для которой  $-L_x \leq x \leq L_x$  и  $-L_y \leq y \leq L_y$ , где  $L_x$  и  $L_y$  – половина ширины и высоты фрагмента изображения серного отпечатка. Для одноцветной системы типа изображения Grayscale эта функция представляет собой распределение яркостей в точках изображения. Для изображения серного отпечатка в качестве значений функции  $F(x, y)$  будем рассматривать относительную величину  $\frac{c(x, y)}{c_{\max}}$ , где  $c(x, y)$  – яркость точки,  $c_{\max}$  – максимальное значение яркости. Такая интерпретация приводит к получению числовой матрицы размерностью  $2L_x \times 2L_y$ , в которой значение каждого элемента принадлежит диапазону  $[0, 1]$ . Значение 0 – соответствует точке черного цвета, 1 – точке белого цвета, все остальные значения определяют точку серого цвета с различной яркостью.

При такой интерпретации функции  $F(x, y)$  одиночная оценка верности (4.127) будет определять общую яркость серного отпечатка, которая должна иметь различные допустимые диапазоны для разных марок стали.

Если в качестве эталонного изображения  $F_0(x, y)$  рассмотреть функцию, состоящую из единиц, то отношение Штреля (4.128) будет характеризовать среднюю яркость серного отпечатка, которое можно рассчитывать

$$Q_s = \frac{\sum_{i=-L_x}^{L_x} \sum_{j=-L_y}^{L_y} F(x_i, y_j)}{c \cdot r}. \quad (4.128a)$$



На рисунке 4.29 представлены значения средней яркости отпечатков при различном процентном содержании углерода в стали. Распределение точек на рисунке 4.29 позволяет утверждать, что чем выше процентное содержание углерода в металле, тем ниже верхняя граница яркости отпечатка и тем отпечаток в целом темнее.

На рисунке 4.30 приведен фрагмент серного отпечатка от поперечного темплета прямоугольной заготовки с указанием видов внутренних дефектов.

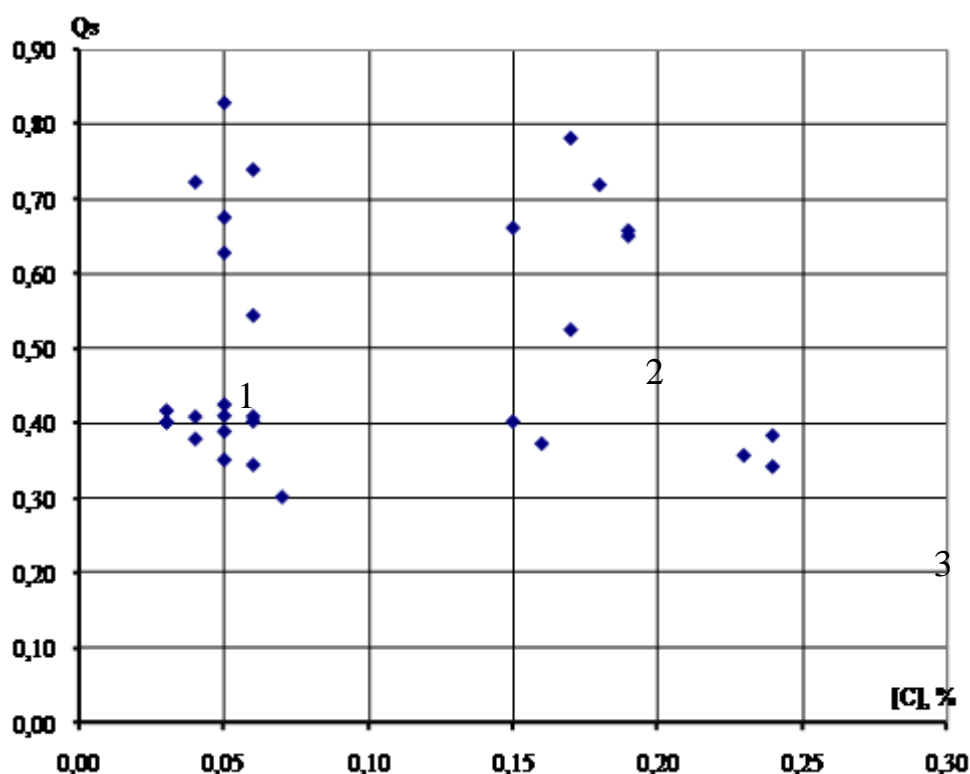
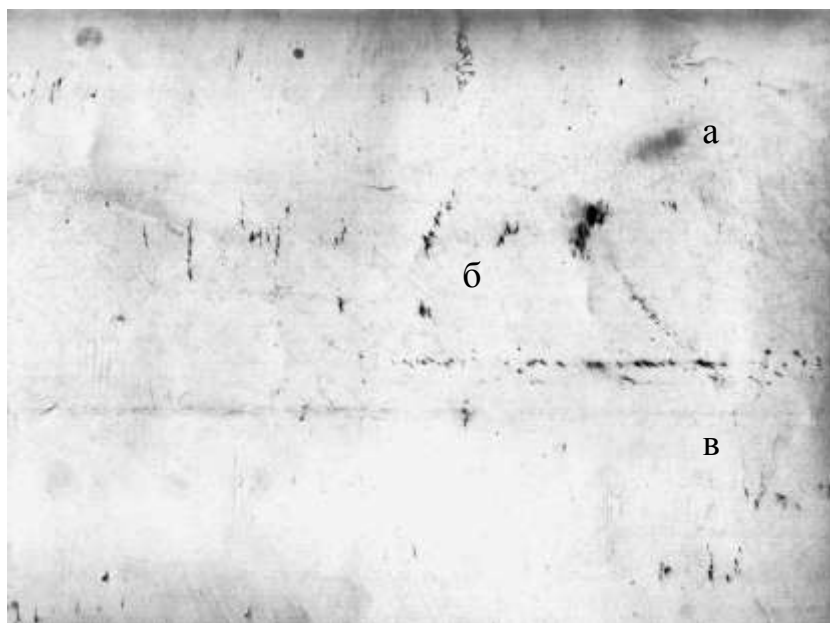


Рисунок 4.29 – Значения отношения Штреля при различном процентном содержании углерода в металле: 1 – группа точек для стали 08Ю; 2 – группа точек для стали СтЗсп; 3 – группа точек для стали 17Г2С

Для сегментации однородных областей на изображении серного отпечатка в качестве  $\bar{F}(x, y)$  рассмотрим функцию, состоящую из значений среднего цвета данного отпечатка. В этом случае можно определить области потемнения на изображении и позднее исследовать эти участки на связность, форму и ориентацию на поверхности.

Несмотря на то, что можно определить статистические характеристики изображения, еще нельзя утверждать о наличии дефектов и провести их идентификацию. Относительное постоянство геометрических размеров серных отпечатков для слябовых заготовок, выпускаемых в ККЦ ОАО «ММК», позволяет выделить отдельные области, в которых формируются дефекты различных видов.

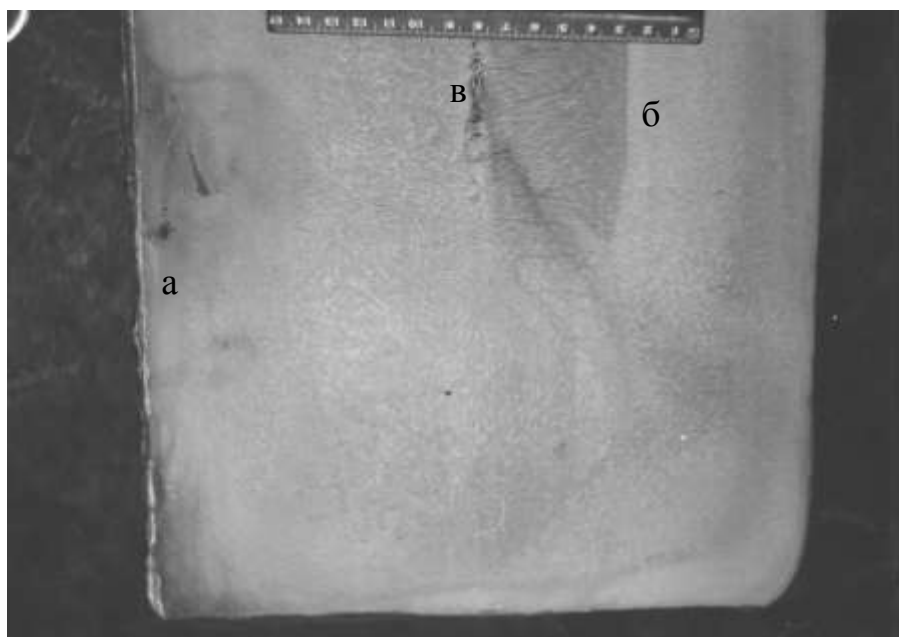


*Рисунок 4.30 – Фрагмент серного отпечатка с характерными видами и формами дефектов в масштабе 1:8: а – точечная неоднородность; б – трещины перпендикулярные широкой грани; в – осевые трещины*

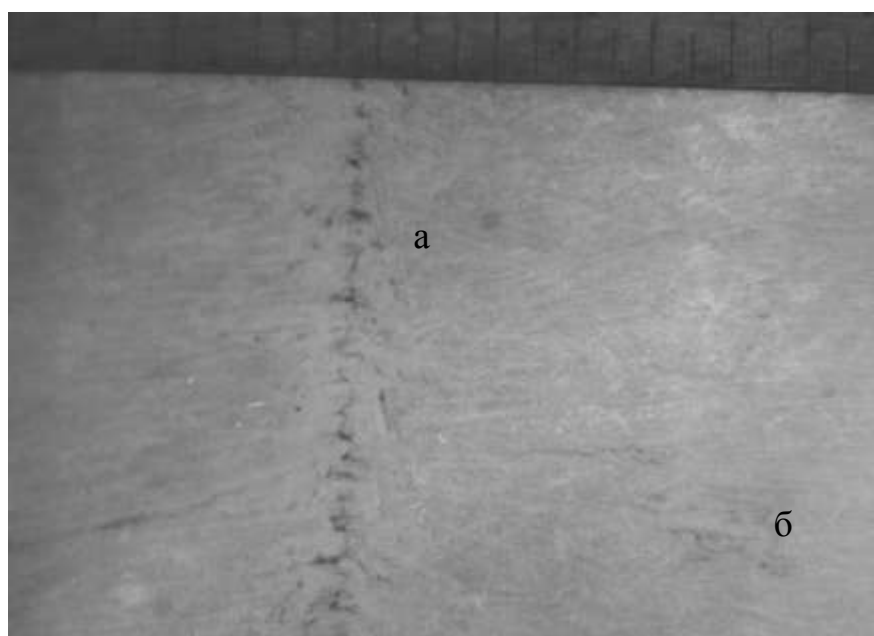
Подобная картина наблюдается и при исследовании поверхности травленого темплета, но дефекты могут быть менее видны на фоне проявившихся элементов кристаллической структуры – столбчатых и разориентированных кристаллов [109, с. 87 – 92]. На рисунках 4.31 и 4.32 представлены фотографии фрагментов травленых темплетов с внутренними дефектами в разном масштабе. Масштаб изображения можно оценить по делениям линейки.

Наблюдения за распределением внутренних дефектов на поверхности темплета и соответственно серного отпечатка позволили построить

схему их распространения и установить относительные геометрические размеры каждой области относительно сечения заготовки (см. рисунок 4.33).



*Рисунок 4.31 – Фотография фрагмента травленого темплета от заготовки плавки № 201744: а – точечная неоднородность; б – трещины перпендикулярные широкой грани; в – осевые трещины*



*Рисунок 4.32 – Фотография фрагмента травленого темплета от заготовки плавки № 20162: а – осевые трещины; б – трещины перпендикулярные широкой грани*

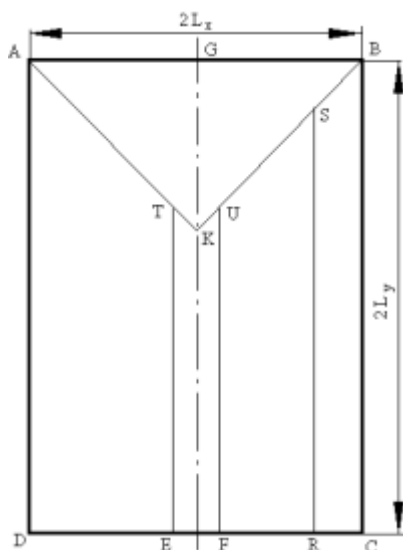


Рисунок 4.33 – Схема расположения областей с различными видами внутренних дефектов на серном отпечатке и травленном темплете для заготовок прямоугольного сечения

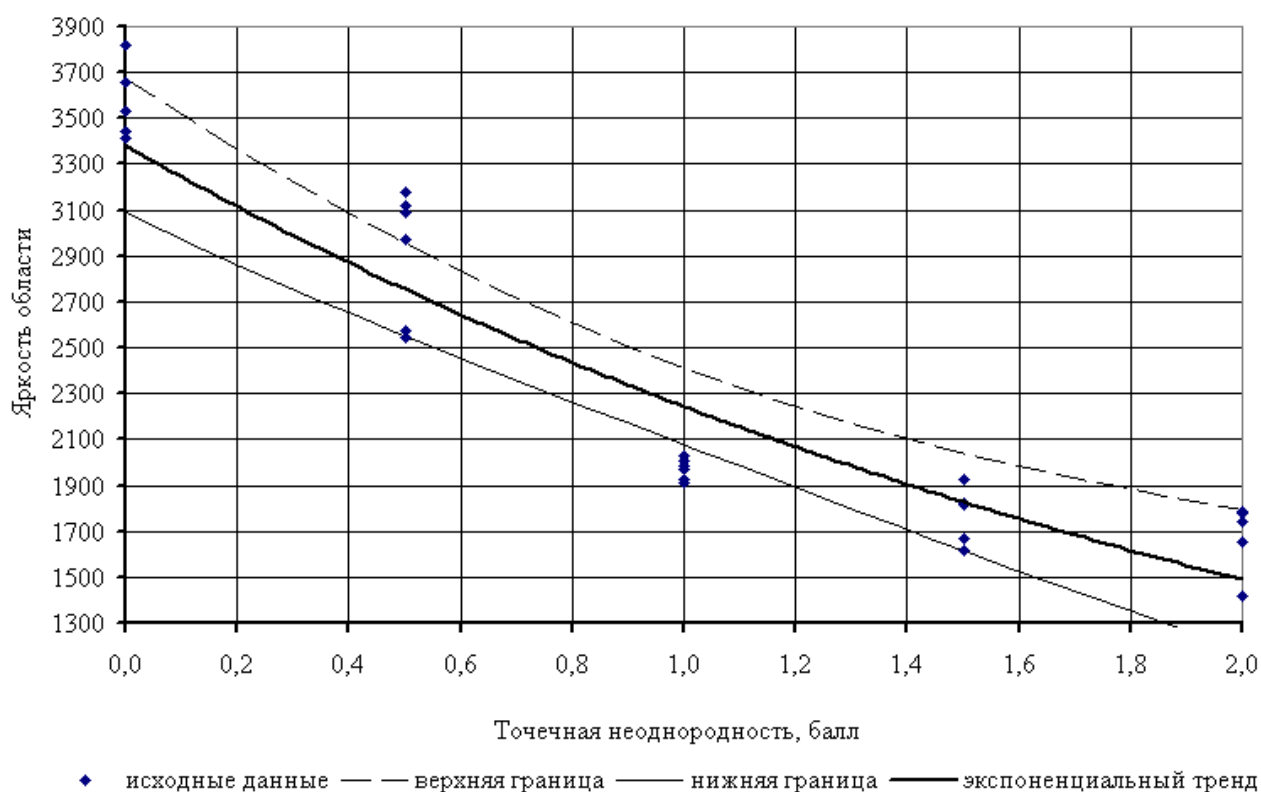
В таблице 4.3 приведены обозначения и геометрические размеры для областей с различными видами дефектов для заготовок прямоугольного и квадратного сечения.

Таблица 4.3 – Обозначения и геометрические размеры областей распространения дефектов для заготовок прямоугольного сечения

Область	Обозначение	Размер области	
		минимальный	максимальный
Осевые дефекты	<i>EFUN</i>	$EF = 2 \cdot 0,08L_x$	$EF = 2 \cdot 0,12L_x$
Точечная неоднородность	<i>BCRS</i>	$CR = 2 \cdot 0,12L_x$	$CR = 2 \cdot 0,16L_x$
Трещины, перпендикулярные широкой грани заготовки со стороны большого радиуса МНЛЗ	<i>ADET</i>	$DE = 0,44L_x$	$DE = 0,46L_x$
Трещины, перпендикулярные широкой грани заготовки со стороны малого радиуса МНЛЗ	<i>FRSU</i>	$FR = 0,28 L_x$	$FR = 0,34L_x$
Трещины, перпендикулярные узкой грани заготовки	<i>ABK</i>	$GK = 2 \cdot 0,4L_x$	$GK = 2 \cdot 0,6L_x$

Для каждой области можно рассмотреть математические характеристики: одиночную оценку, отношение Штреля и т.п., которые будут характеризовать нарушения сплошности заготовки в выделенной области и, следовательно, отдельный вид дефекта. Следует предполагать, что снижение яркости области говорит о наличии потемневших областей и, следовательно, развитии внутренних дефектов в заготовке.

Ни рисунках 4.34 – 4.36 приведены экспериментальные точки и линии тренда, характеризующие снижение яркости областей в зависимости от балла соответствующего дефекта, подтверждающие выдвинутое предположение. Для каждой зависимости указана средняя относительная ошибка аппроксимации  $A$ , характеризующая среднее относительное отклонение исходных данных от аппроксимирующей кривой.



*Рисунок 4.34 – Зависимость яркости области BCRS серного отпечатка прямоугольной заготовки и балла развития точечной неоднородности,  $A=10\%$*

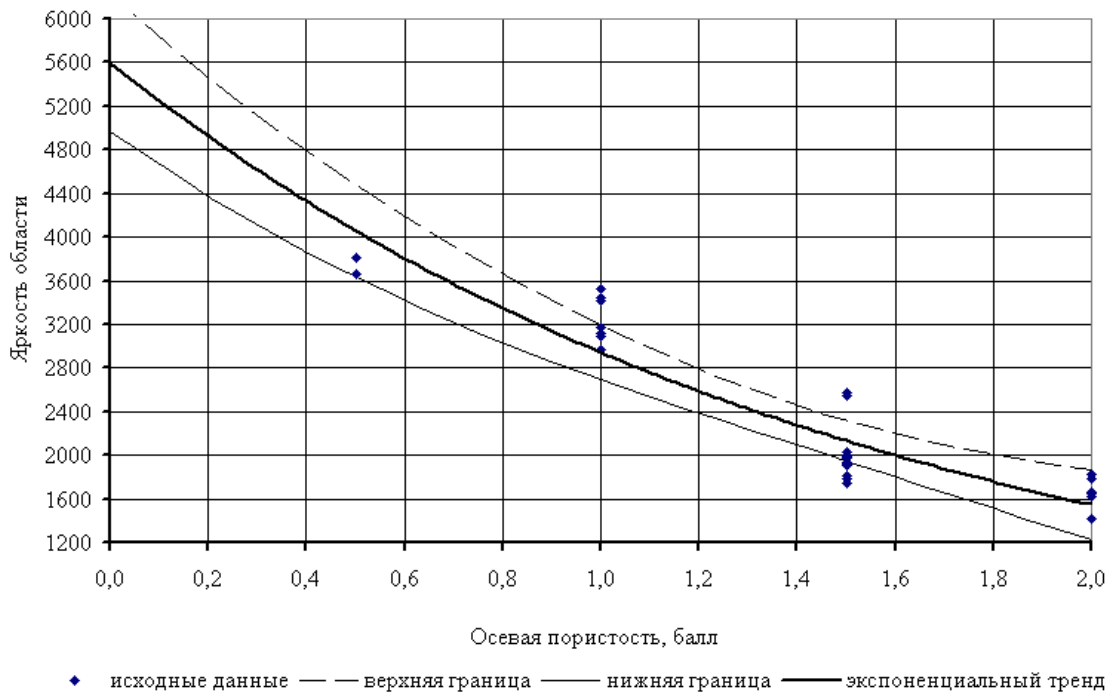


Рисунок 4.35 – Зависимость яркости области EFUN серного отпечатка прямоугольной заготовки от балла развития осевой рыхлости,  $A=10\%$

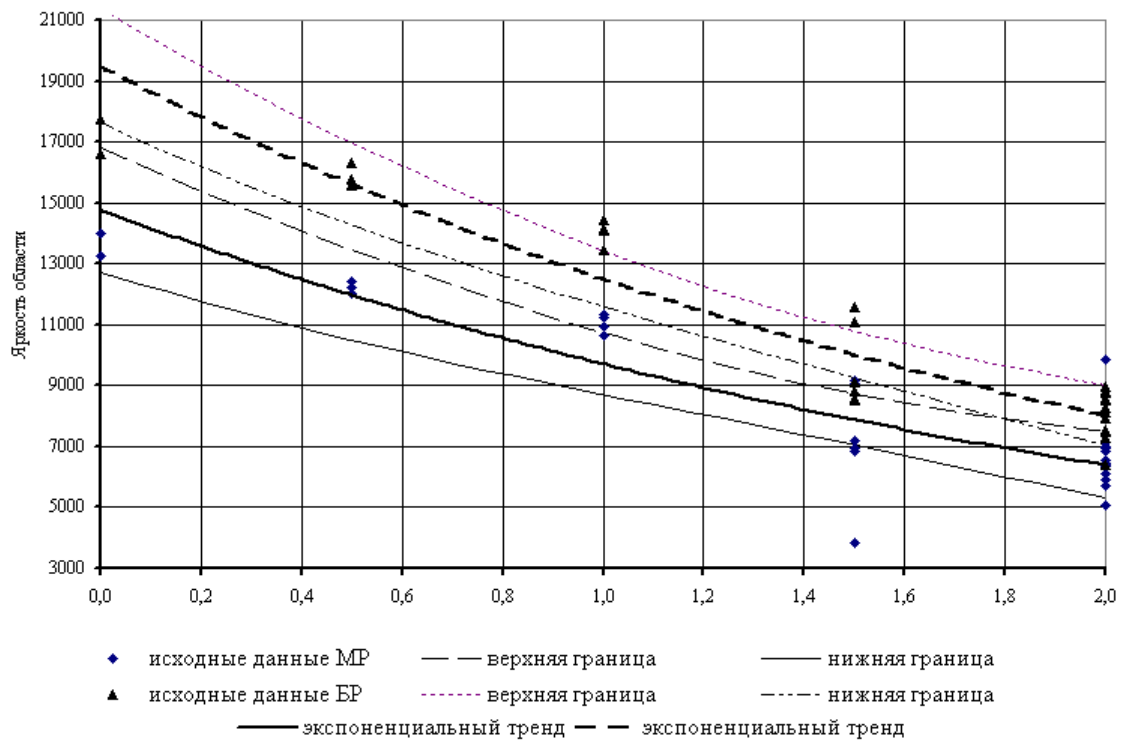


Рисунок 4.36 – Зависимость яркости для области трещин, перпендикулярных широкой грани заготовки со стороны большого и малого радиуса машины непрерывного литья заготовок,  $A_{БР}=9\%$  и  $A_{МР}=11\%$

На основе приведенных графиков и таблиц классификации дефектов были построены градировочные таблицы для перевода атрибутивного показателя качества в количественные меры без нарушения условий оценки по соответствующему ОСТ (таблице 4.4).

Таблица 4.4 – Соотношения баллов дефектов непрерывно-литой заготовки и одиночной оценки

Балл дефекта	$Q_{ТН}$	$Q_{ОР}$	$Q_{ТПШ}$	
			со стороны малого радиуса МНЛЗ	со стороны большого радиуса МНЛЗ
0	$>3500$	$>4000$	$>14000$	$>18000$
0,5	$3000 \div 3500$	$3500 \div 4000$	$12000 \div 14000$	$16000 \div 18000$
1,0	$2500 \div 3000$	$2500 \div 3500$	$11000 \div 12000$	$15000 \div 16000$
1,5	$1500 \div 2500$	$1500 \div 2500$	$8000 \div 11000$	$10000 \div 15000$
2,0	$<1500$	$<1500$	$5000 \div 8000$	$7000 \div 10000$
2,5	–	–	$<5000$	$<7000$

Примечания:  $Q_{ТН}$  – одиночная оценка для области точечной неоднородности SBCR;  $Q_{ОР}$  – одиночная оценка для области осевой рыхлости;  $Q_{ТПШ}$  – одиночная оценка для области трещин, перпендикулярных широкой грани заготовки со стороны большого и малого радиуса МНЛЗ.

Как было сказано выше, не все отобранные серные отпечатки были подвергнуты автоматизированной обработке из-за нарушения технологии их изготовления. Поэтому появилась необходимость в разработке математических критериев, на основе которых можно было бы выполнить классификацию изображения на «годные» и «негодные» к обработке и исключить их из дальнейшего рассмотрения с адекватным обоснованием этого исключения [110, с. 119 – 125].

В качестве таких критериев были выбраны три выражения: критерий определения границы неоднородности области или критерий выделения области дефекта (4.135) и (4.136); критерий «серости» отпечатка (4.137); критерий контрастности серного отпечатка (4.138).

Критерии выделения однородной области записываются в виде:

$$|F(x_i; y_i) - F(x_{i+1}; y_i)| < G_{\text{обл}}, \text{ где } i = \overline{1; 2 \cdot L_x}; \quad (4.135)$$

и

$$|F(x_i; y_i) - F(x_i; y_{i+1})| < G_{\text{обл}}, \text{ где } i = \overline{1; 2 \cdot L_x}, \quad (4.136)$$

где  $G_{\text{обл}}$  – константа ограничения, определяемая эмпирическим путем.

По смыслу выражения (4.135) и (4.136) определяют границу разности в яркости между двумя точками изображения, при которой область переходит из состояния сплошной среды к области дефекта и обратно. На основе этого критерия выделяются области образования дефектов и рассчитывается их площадь.

Критерий «серости отпечатка» определяет границу среднего значения яркости или отношения Штреля, при котором потемнение изображения вызвано либо нарушением технологии, либо временными характеристиками:

$$\bar{F}(x_i; y_i) \leq Q_{\text{min}}, \quad (4.137)$$

где  $Q_{\text{min}}$  – минимальное значение отношения Штреля. На основе экспериментальных данных установлено, что при  $Q_{\text{min}} \leq 0,3$  изображение серного отпечатка является «нераспознаваемым».

Критерий контрастности изображения определяет возможность выделения «черно-белых» точек на изображении:

$$\max_{\substack{x \in \overline{1; L_x} \\ y \in \overline{1; L_y}}} |f(x, y) - Q_s| \leq G_{\text{кр}}, \quad (4.138)$$

где  $G_{\text{кр}}$  – критическое значение максимальной разности значения функции в данной точке и средней яркости отпечатка. При выполнении критерия (4.138) нет смысла рассматривать изображение отпечатка как неоднородную область.

Таким образом, показано, что возможна формализация изображения с помощью матричной функции и по значениям этой функции и по ее ста-



статистическим характеристикам возможна оценка качества изображения, сегментация изображения на объекты нерегулярной формы.

#### 4.5.3 Аналитическое выделение точек и областей пониженной яркости на изображении серного отпечатка темплета непрерывно-литой заготовки

На основе статистических характеристик, была решена задача выделения и подсчета количества точек изображения серного отпечатка с пониженной яркостью, то есть тех точек, в которых возможно существование дефекта. Для этого были введены две функции: функция (4.139) – для выделения дефектной точки с пониженной яркостью и инвертирования цвета этой точки и функция (4.140) – для дискретизации точек с пониженной и повышенной яркостью.

Функция для выделения точки сниженной яркостью на изображении серного отпечатка имеет вид:

$$F_i(x, y) = \begin{cases} 1 - F(x, y) & \text{при } Q_s - F(x, y) \geq h; \\ 1 - Q_s & \text{для остальных случаев.} \end{cases} \quad (4.139)$$

где  $h$  – эмпирическая величина, определяющая разность между средней яркостью отпечатка и яркостью в выбранной точке, при которой считаем точку «дефектной».

Бинарная функция для отметки «дефектной» точки на изображении имеет вид

$$D(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{при } F_i(x, y) \geq 1 - Q_s; \\ 0 & \text{для остальных случаев.} \end{cases} \quad (4.140)$$

Следует отметить, что с помощью функции (4.140) происходит фиксирование факта наличия точки с пониженной яркостью: 1 – точка имеет пониженную яркость по отношению к общему серому фону изображения, 0 – точка имеет яркость выше среднего серого фона изображения и не может относиться к области внутреннего дефекта.

Применение функции (4.139) позволило получить числовые матрицы для каждого изображения серного отпечатка, содержащие инвертированные значения цветов каждой точки. Визуализация этой матрицы позволила получить диаграммы проявления внутренних дефектов на поверхности поперечного темплета.

Вид поверхности поперечного темплета после применения функции (4.139) приведен на рисунке 4.37. Чтение диаграммы по полной поверхности является затруднительными из-за большой плотности расположения выбранных точек. Поэтому для удобочитаемости таких диаграмм предлагаются два способа:

- выделение плоских сечений в заданных точках по оси ОУ и построение графиков значений функции  $F_i(x; y)$  по этим сечениям;
- выделение двумерных областей диаграммы по некоторой схеме и построение графика значений функции  $F_i(x; y)$  только в выбранных областях.

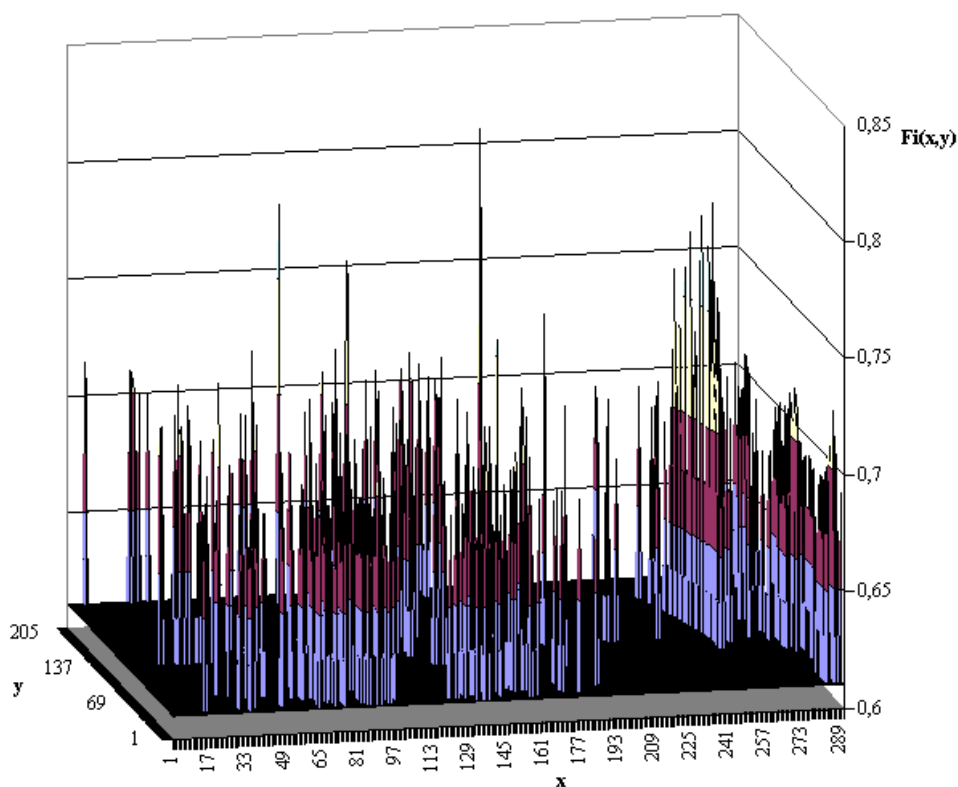


Рисунок 4.37 – Диаграмма значений функции  $F_i(x; y)$  для плавки №100123

Примеры построения таких диаграмм по первому способу приведены на рисунках 4.38 – 4.40 и по схеме рисунка 4.41 – на рисунке 4.42 и 4.43.

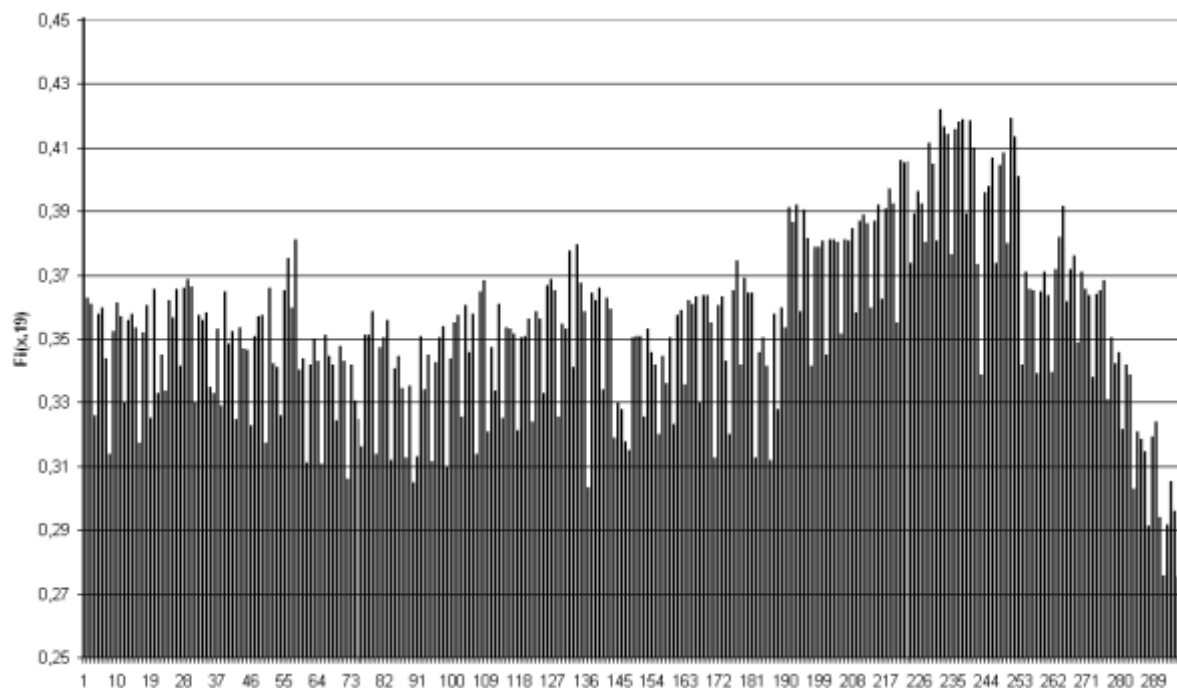


Рисунок 4.38 – Диаграмма значений функции  $F_i(x; y)$  при  $y=19$

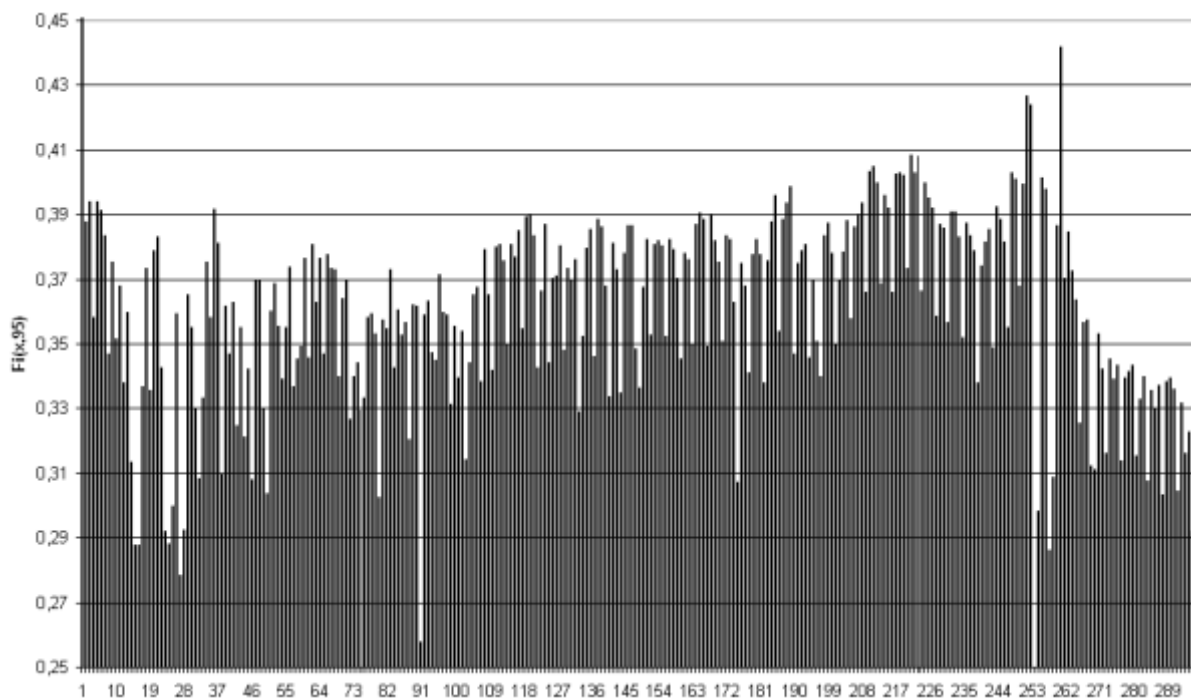


Рисунок 4.39 – Диаграмма значений функции  $F_i(x; y)$  при  $y=95$

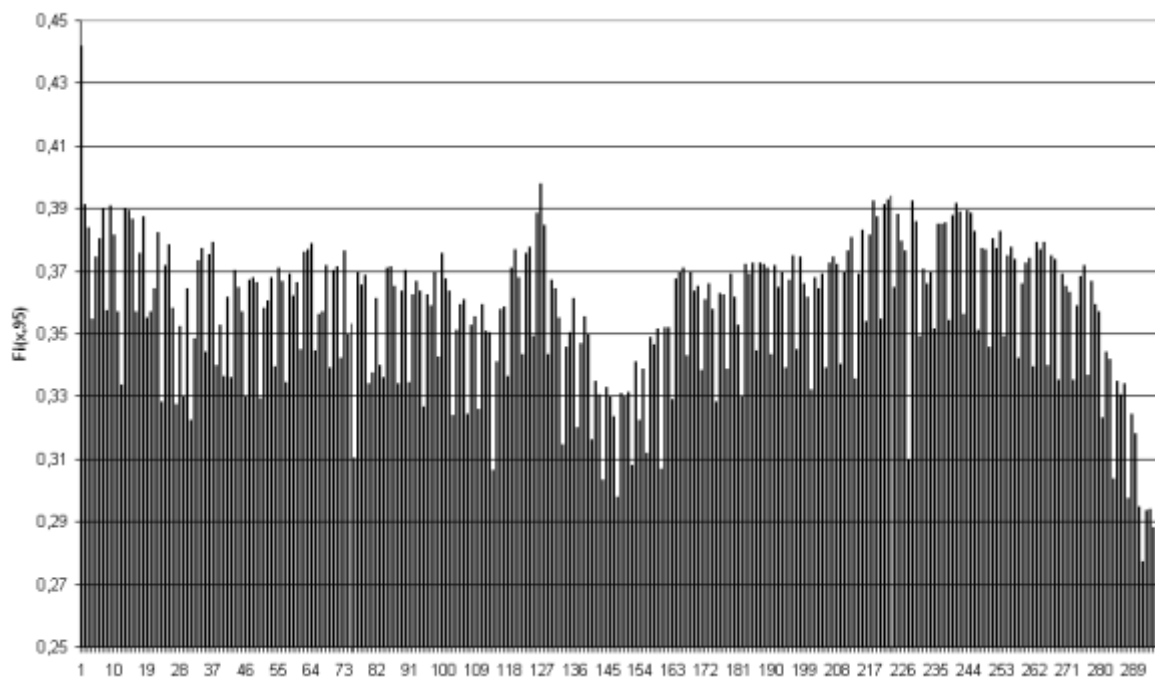


Рисунок 4.40 – Диаграмма значений функции  $F_i(x; y)$  при  $y=209$

Экстремумы для функции  $F_i(x; y)$  соответствуют инвертированным значениям цвета для точек с пониженной яркостью.

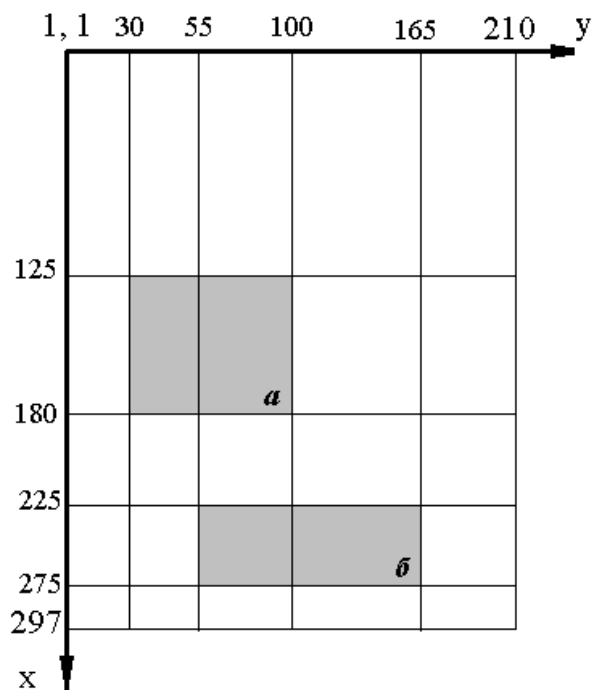


Рисунок 4.41 – Схема расположения выбранных областей на поверхности изображения серного отпечатка прямоугольной заготовки

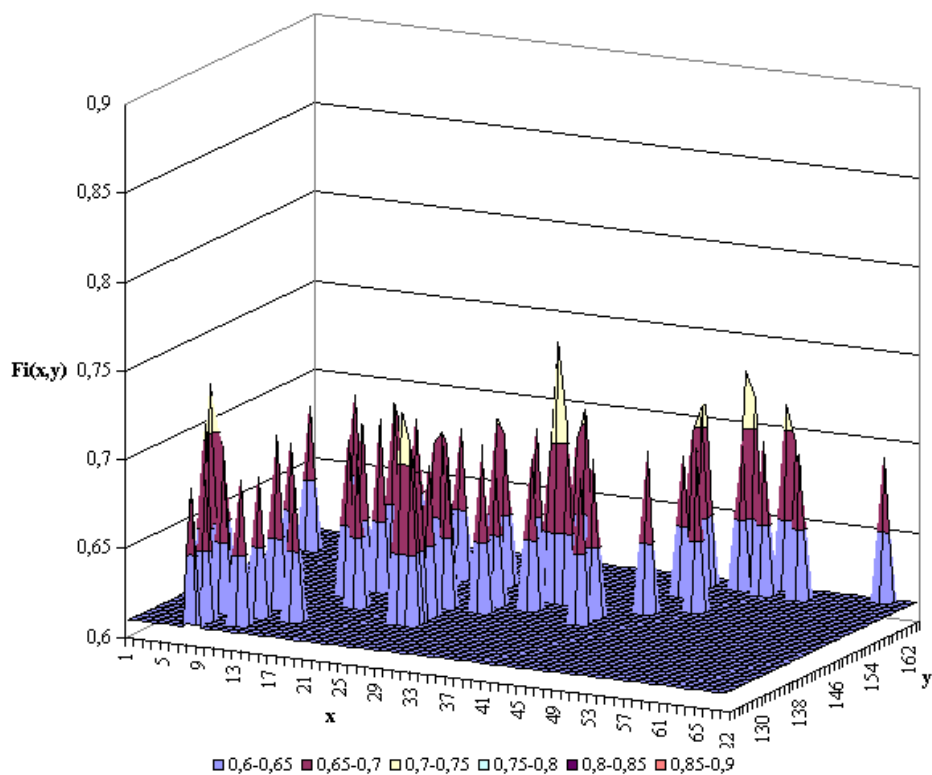


Рисунок 4.42 – Фрагмент диаграммы значений функции  $F_i(x; y)$  по области а

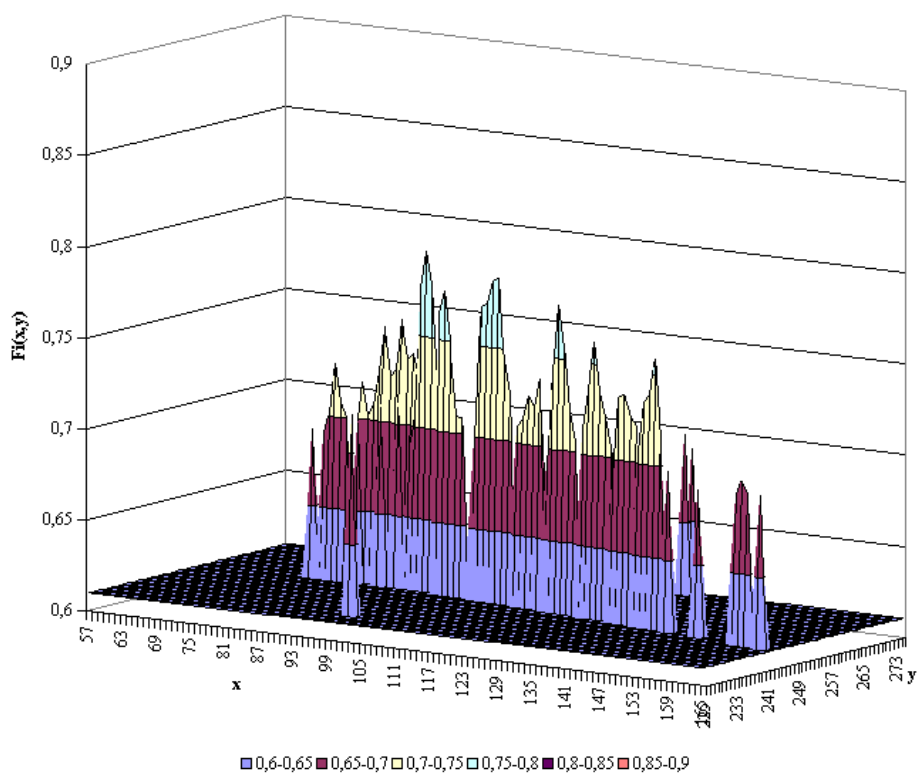


Рисунок 4.43 – Фрагмент диаграммы значений функции  $F_i(x; y)$  по области б

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Область применения полученных результатов: автоматизированные информационные системы на крупных металлургических предприятиях и при проведении научных исследований технологических процессов в металлургии.

К основным результатам научно-исследовательской работы относятся следующее:

1) разработана математическая модель для изучения электровихревых течений в токонесущих расплавах металлургических агрегатов;

2) разработана математическая модель тепломассообмена в ванне токонесущих расплавах металлургических агрегатов;

3) выполнены онтологический анализ процесса непрерывной разливки стали, оценка материальных и информационных потоков, структуризация и систематизация показателей процесса. Теоретически обосновано снижение качества литой стальной заготовки из-за низкой достоверности оценок теплового состояния;

4) разработана математическая модель тепломассообмена в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок на основе функционального моделирования движения материальных и информационных потоков;

5) предложены математическая модель и критерии распознавания объектов, характеризующих дефекты заготовки, на фоне изображения серного отпечатка с низкой контрастностью. Модель и критерии, в отличие от известных, учитывают нерегулярность и случайность расположения объектов, низкую контрастность изображения, что позволяет автоматизировать процесс получения экспертной информации, отвечающей требованиям отраслевого стандарта.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Энциклопедический словарь по металлургии: Справочное издание. В 2-х т. / Н.П.Лякишев и др. – М. : «Интермет Инжиниринг», 2000. – Т. 2 : П – Я. – 409 с.
2. Энциклопедический словарь по металлургии: Справочное издание. В 2-х т. / Н.П.Лякишев и др. – М. : «Интермет Инжиниринг», 2000. – Т. 1: А – О. – 412 с.
3. Воскобойников, В.Г., Кудрин, В.А., Якушев, А.М. Общая металлургия [Текст]: учебник для вузов / Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. – 6-изд., перераб. и доп. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2005 – 768 с. : 253 ил.
4. Современная технология производства стали / Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. – М. : «Теплотехник», 2007. – 528 с.
5. Борисов, В.Т. Теория квазиравновесной кристаллизации металлических сплавов / В.Т. Борисов, В.В. Виноградов, В.А. Ефимов, В.Т. Журавлев, Я.Я. Клявинь // Кристаллизация и компьютерные модели. – Ижевск, 1996. – С. 5 – 8.
6. Борисов, В.Т. Теория двухфазной зоны и ее применение к задачам непрерывного слитка / В.Т. Борисов, И.Н. Голиков, А.И. Манохин, Р.А. Уразаев // Непрерывная разливка стали. – М. : Металлургия, 1974. – № 2. – С. 5 – 15.
7. Уманский, В.И. Установки непрерывной разливки стали в капиталистических странах / В.И. Уманцев. – М. : НИИЦ ЧМ, 1963. – 165 с.
8. Борисов, В.Т. Исследование влияния теплофизических параметров затвердевания сплавов на их дендритную структуру / В.Т. Борисов, А.Г. Кужельный, А.И. Духин, Л.А. Соколов, Ю.Е. Матвеев, А.И. Тарасенко, Т.Н. Соболева – М. : Металлургия, 1974. – №2. – С. 38 – 40.
9. Борисов, В.Т. О применимости теории квазиравновесной зоны к описанию кристаллизации слитка / В.Т. Борисов, В.В. Виноградов, А.И. Духин,

- А.И. Манохин, Ю.Е. Матвеев, Л.А. Соколов, В.Т. Шишков // Известия АН СССР. Металлы. – 1971. – №6. – С. 104 – 106.
10. Борисов, В.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка / В.Т. Борисов. – М. : Metallurgy, 1987. – 406 с.
11. Борисов, В.Т. Метод определения проницаемости двухфазной зоны затвердевающего сплава / В.Т. Борисов, Н.Ю. Колядина Ю.З. Матвеев // Заводская лаборатория. – 1980. – №10. – С. 911 – 915.
12. Самойлович, Ю.А. Изучение температурного поля в листовых слитках при непрерывной разливке стали на вертикальных машинах / Ю.А. Самойлович, В.А. Горяйнов, А.Г. Подорванов, З.К. Кабаков, В.П. Перминов // Сталь. – 1975. – №12. – С. 1087 – 1092.
13. Самойлович, Ю.А. Формирование слитка / Ю.А. Самойлович. – М. : Metallurgy, 1977. – 158 с.
14. Травин, О.В. Материаловедение / О.В. Травин, Н.Т. Травина. – М. : Metallurgy, 1989. – 382 с.
15. Флемингс, М. Процессы затвердевания : пер. с англ. / М. Флемингс. – М. : Мир, 1977. – 424 с.
16. Журавлев, В.А. К теории формирования непрерывного слитка / В.А. Журавлев // Непрерывная разливка стали. – М. : Metallurgy, 1974. – Т. 2. – С. 29 – 35.
17. Евтеев, Д.П. О выборе граничных условий при расчетах затвердевания слитка / Д.П. Евтеев, Л.А. Соколов, В.И. Лебедев // Сталь. – 1975. – №1. – С. 32 – 34.
18. Журавлев, В.А. О макроскопической теории кристаллизации сплавов / В.А. Журавлев // Изв. АН СССР. – 1975. – № 5. – С. 93 – 96.
19. Шварцкопф, А.А. Оптимизация нагрева и охлаждения слитка : дис. ... канд. техн. наук / Александр Александрович Шварцкопф : Магнитогорский горно-металлург. ин-т. – Магнитогорск, 1985. – 205 с.



20. Петров, А.И. Автоматизация управления электрошлаковым переплавом / А.И. Петров, Н.А. Понаморев, В.А. Журавлев, В.В. Четвертных. – Устинов : Удмуртия, 1985. – 276 с.
21. Чалмерс, Б. Теория затвердевания / пер. с англ. Алексеева В.А. / Б. Чалмерс. – М. : Metallurgia, 1968. – 286 с.
22. Карташов, Э.М. Аналитические методы решения краевых задач уравнения теплопроводности в области с движущимися границами / Э.М. Карташов, Б.Я. Любов // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1974. – № 6. – С. 83.
23. Коздоба, Л.А. Вычислительная теплофизика / Л.А. Коздоба. – Киев : Наук. думка, 1992. – 354 с.
24. Скворцов, А.А. Теплопередача и затвердевание стали в установках непрерывной разливки / А.А. Скворцов, А.Д. Акименко. – М. : Metallurgia, 1966. – 276 с.
25. Соболев, В.В. Теплофизика затвердевания металла при непрерывном литье / В.В. Соболев, П.М. Трефилов. – М. : Metallurgia, 1988. – 543 с.
26. Лапотышкин, Н. М. Трещины в стальных слитках / Н.Т. Лапотышкин, А.В. Лейтес. – М. : Metallurgia, 1969. – 111 с.
27. Сладкоштеев, В.Т. Качество стали при непрерывной разливке / В.Т. Сладкоштеев, В.И. Ахтырский, Р.В. Потанин. – М. : Metallurgizdat, 1963. – 230 с.
28. Манохин, А.И. Влияние вторичного охлаждения на структуру и осевую пористость непрерывного квадратного слитка / Л.А. Соколов, А.Я. Глазков, В.И. Борисов. // Сталь. – 1973. – №4. – С. 512 – 514.
29. Гласкова, Г.В. Математическая обработка результатов измерения при определении дендритной ликвации в сталях / Г.В. Гласкова, Ю.Н. Внуков. // Заводская лаборатория. – 1975. – № 6. – С. 674 – 677.
30. Галенко, П.К. Дендритное и зеренное структурообразование при компьютерном моделировании переохлажденных сплавов / П.К. Галенко //

Проблемы кристаллизации сплавов и компьютерное моделирование. – Ижевск : 1990. – 276 с.

31. Лапотышкин, Н.М. Строение осевой зоны непрерывного слитка и качество металла / Н.М. Лапотышкин // Сталь. – 1969. – №1. – С. 23 – 26.

32. Соболев, В.В. Процессы тепломассопереноса при затвердевании непрерывных слитков / В.В. Соболев, П.М. Трефилов. – Красноярск : Изд-во Красноярск. ун-та, 1984. – 352 с.

33. Краснов, Б.И. Оптимизация режима кристаллизации слитка на машинах непрерывного литья заготовок / Б.И. Краснов, Д.П. Евтеев // Сталь. – 1974. – № 10. – С. 897.

34. Соболев, В.В. Оптимизация тепловых режимов затвердевания расплавов / В.В. Соболев, П.М. Трефилов. – Красноярск : Изд-во Красноярск. ун-та, 1986. – 356 с.

35. Соколов, Л.А. Оптимальные условия затвердевания непрерывного сортового слитка / Л.А. Соколов, А.И. Манохин, Н.И. Никитенко // Сталь. – 1969. – № 12. – С. 1092 – 1094.

36. Девятков, Д.Х. Оптимальное управление тепловой обработкой в непрерывной разливке стали / Д.Х. Девятков. – Магнитогорск : МГМА, 1998. – 130 с.

37. Девятков, Д.Х. Оптимальное управление нагревом слитков с незавершенным процессом затвердевания / Д.Х. Девятков, В.М. Рябков // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1972. – № 5. – С. 78 – 80.

38. Клявинь, Я.Я. Некоторые решения задач затвердевания полученные с использованием метода оптимального управления / Я.Я. Клявинь, Я.Р. Шмит. // Известия АН Латвийской ССР. – 1974. – №5. – С. 84 – 87.

39. Берзинь, В.А. Оптимизация режимов затвердевания непрерывного слитка / В.А. Берзинь [и др.] – Рига : Зинатне, 1977. – 248 с.

40. Селиванов, В.Н. Усовершенствование режима вторичного охлаждения непрерывно–литых слэбов / В.Н. Селиванов [и др.] // Труды V конгресса сталеплавильщиков. – М. : Черметинформация, 1998. – С. 411 – 412.
41. Масальский, С.С. Оптимизация режима вторичного охлаждения непрерывно-литых слэбов / С.С. Масальский, В.Н. Селиванов, Б.А. Буданов, А.М. Столяров // Теплотехника и теплоэнергетика в металлургии : сб. науч. тр. – Магнитогорск : МГТУ, 1999. – С. 146 – 150.
42. Масальский, С.С. Выбор оптимального изменения температуры поверхности слитков при непрерывном литье / С.С. Масальский [и др.] // Литейные процессы : межрегион. сб. науч. тр. – Магнитогорск : МГТУ, 2000. – С. 164 – 169.
43. Тахаутдинов, Р.С. Определение оптимальных режимов вторичного охлаждения непрерывно-литых слэбов / Р.С. Тахаутдинов, Ю.А. Бодяев, В.Н. Селиванов, А.М. Столяров, Б.А. Буданов, В.А. Моренко, С.С. Масальский // Труды VII конгресса сталеплавильщиков. – М. : Черметинформация, 2003. – С. 564–566.
44. Тахаутдинов, Р.С. Исследование химического состава переходного участка непрерывно-литых слэбов при разливке стали разных марок методом «плавка на плавку» / Р.С. Тахаутдинов, В.Н. Селиванов, А.М. Столяров, Д.В. Юречко // Труды VII конгресса сталеплавильщиков. – М. : Черметинформация, 2003. – С. 558 – 560.
45. Столяров, А.М. Распределение металла в кристаллизаторе слэбовой МНЛЗ / А.М. Столяров, В.Н. Селиванов // Известия Челяб. НЦ УрО РАН, 2003. – № 2. – С. 42 – 45.
46. Столяров, А.М. Изучение переходного участка непрерывно-литых слэбов при разливке стали методом «плавка на плавку» / А.М. Столяров, Д.В. Юречко // Теория и технология металлургического производства : межрегион. сб. науч. тр. – Магнитогорск : МГТУ, 2003. – Вып. 3. – С. 68 – 73.

47. Столяров, А.М. Модель процесса формирования переходного участка непрерывно-литых слябов / А.М. Столяров // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. – Магнитогорск : МГТУ, 2003. – Вып. 3. – С. 73 – 79.
48. Способ непрерывного литья заготовок на машине с криволинейной технологической осью: пат. 2218237 Рос. Федерация: МПК В 22 D 11/00 / Селиванов В.Н., Столяров А.М., Буданов Б.А.
49. Пустыльник, Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е.И. Пустыльник. – М. : Наука, 1968. – 212 с.
50. Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский. – М. : Высш. шк., 1988. – 378 с.
51. Налимов, В.В. Логические основания и планирование эксперимента / В.В. Налимов, Т.И. Голиков. – М. : Металлургия, 1976. – 197 с.
52. Носов, С.В. Динамическое регулирование расходов воды в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок / С.В. Носов [и др.] // Сб. трудов Центральной лаборатории ОАО «ММК». – Магнитогорск : Магнитогорск. Дом печати, 2003. – Вып. 7. – С. 103 – 109.
88. Глинков, Г.М. Контроль и автоматизация металлургических процессов / Г.М. Глинков, А.И. Косырев, Е.К. Шевцов. – М. : Металлургия, 1989. – 352 с.
53. Журавлев, Ю.И. Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания и классификации / Ю.И. Журавлев // Проблемы кибернетики. – 1978. – Вып. 33. – С. 5 – 8.
54. Журавлев, Ю.И. Задачи распознавания и классификации со стандартной обучающей информацией / Ю.И. Журавлев // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1980. – Т. 20. – № 5. – С. 1294 – 1309.

55. Горелик, А.Л. Современное состояние проблемы распознавания : Некоторые аспекты / А.Л. Горелик, И.Б. Гуревич, В.А. Скрипкин. – М. : Радио и связь, 1985. – 160 с.
56. Рудаков, П.И. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.x / П.И. Рудаков, И.В. Сафронов ; под общ. ред. канд. техн. наук В.Г. Потемкина – М. : Диалог – МИФИ, 2000. – 416 с.
57. Еднерал, Ф.П. Электрометаллургия стали и ферросплавов / Ф.П. Еднерал – М. : Metallurgia, 1977. – 488 с.
58. Егоров, А.В. Электроплавильные печи черной металлургии / А.В. Егоров – М. : Metallurgia, 1985. – 280 с.
59. Окороков, Н.В. Дуговые сталеплавильные печи / Н.В. Окороков – М. : Metallurgia, 1971. – 344 с.
60. Егоров, А.В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей / – М. : МИСиС, 2000. – 272 с.
61. Ячиков, И.М. Методы расчета технико-экономических характеристик дуговой сталеплавильной печи: Учеб. пособие / И.М. Ячиков – Магнитогорск : МГТУ, 2006. – 112 с.
62. Еланский, Г.Н. Неделя высоких технологий / Г.Н. Еланский // Сталь. – 2000. – № 2. – С. 27 – 30.
63. Первый опыт эксплуатации новой высокопроизводительной ДППТ на заводе фирмы Штальверк Тюринген ГмбХ / Ромен Хенрион, Жан-Мишель Денглер, Герольд Лахман и др. // Metallургическое производство и технология metallургических процессов. – 1998. – С. 40 – 47.
64. Малиновский, В.С. Подовый электрод электропечи / Малиновский В.С. // Патент РФ № 212187.
65. Бортничук Н.И., Крутянский, М.М. Плазменно-дуговые плавильные печи / Н.И. Бортничук, М.М. Крутянский – М. : Энергоиздат, 1981. – 120 с.
66. Ерохин, А.А. Закономерности плазменно-дугового легирования и рафинирования металлов / А.А. Ерохин – М. : Наука, 1984. – 185 с.

67. Давление плазменной дуги на металл / Г.В. Торхов, Ю.В. Латаш, А.К. Кадрин и др. // ФХОМ. – 1984. – № 1. – С. 64–69.
68. Финкельбург, В., Меккер, Г. Электрические дуги и термическая плазма: пер. с нем. / В. Финкельбург, Г. Меккер – М. : Иностранная литература, 1961. – 370 с.
69. Никольский, Л.Е., Смоляренко, В.Д., Кузнецов, Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей / Л.Е. Никольский, В.Д. Смоляренко, Л.Н. Кузнецов – М. : Металлургия, 1981. – 320 с.
70. Макаров, А.Н., Свенчанский, А.Д. Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей / А.Н. Макаров, А.Д. Свенчанский – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 96 с.
71. Ерохин, А.А. Силовое воздействие дуги на расплавленный металл / А.А. Ерохин // Автомат. Сварка. – 1979. – № 7. – С. 21 – 26.
72. Гельфгат, Ю.М., Лиелаусис, О.А., Щербинин, Э.В. Жидкий металл под действием электромагнитных сил / Ю.М. Гельфгат, О.А. Лиелаусис, Э.В. Щербинин – Рига : Зинатне, 1975. – 248 с.
73. Свенчанский, А.Д., Смелянский, М.Я. Электрические промышленные печи / А.Д. Свенчанский, М.Я. Смелянский – М. : Энергия, 1970. – Ч. 2. – 264 с.
74. Повх, И.Л., Капуста, А.Б., Чекин, Б.В. Магнитная гидродинамика в металлургии / И.Л. Повх, А.Б. Капуста, Б.В. Чекин – М. : Металлургия, 1974. – 240 с.
75. Ландау, Л.Д., Лифшиц, Е.М. Механика. Электродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – М. : Наука, 1969. – 271 с.
76. Ландау, Л.Д., Лифшиц, Е.М. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – М. : Наука, 1982. – 620 с.
77. Марков, Н.А., Чердовских, П.П. Распределение электрического тока в ванне дуговой печи / Н.А. Макаров, П.П. Чердовский – М.-Л. : Энергия, 1966. – 104 с.

78. Погорелов, А.В. Аналитическая геометрия // А.В. Погорелов – М. : Наука, 1978. – 208 с.
79. Электровихревые течения / В.В. Бояревич, Я.Ж. Фрейберг, Е.И. Шилова, Э.В. Щербинин – Рига : Зинатне, 1985. – 315 с.
80. Ерохин, А.А. Плазменно-дуговая плавка металлов и сплавов / А.А. Ерохин – М. : Наука, 1975. – 188 с.
81. Чудновский, А.Ю. О моделировании электровихревых течений // Магнитная гидродинамика. – 1989. – № 3. – С. 69 – 74.
82. Бакакин, А.В., Хорошилов, В.О., Кельманов, В.Е. Математическое моделирование течения металла в сталеразливочном ковше при продувке инертным газом / А.В. Бакакин, В.О. Хорошилов, В.О. Кельманов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1981. – № 4. – С. 52 – 56.
83. Игнатов, И.И., Сандлер, В.Ю. Теплоперенос в ванне ДСП после расплавления металла / И.И. Игнатов, В.Ю. Сандлер // Сб. Математическое моделирование и расчет дуговых и плазменных сталеплавильных печей – М.: ВНИИЭТО, 1983. – С. 20–25.
84. Чернятевич, А.Г., Наливайко, А.П., Приходько, А.А. Численное моделирование перемешивания и теплообмена в конверторной ванне / А.Г. Чернятевич, А.П. Наливайко, А.А. Приходько // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1984. – № 5. – С. 44 – 48.
85. Верте, Л.А. Магнитная гидродинамика в металлургии / Л.А. Верте – М. : Металлургия, 1975. – 288 с.
86. Берковский, Б.М., Полевиков, В.К. Вычислительный эксперимент в конвекции / Б.М. Берковский, В.К. Полевиков // Мн. : Университетское, 1988. – 167с.
87. Грязнов, В.Л., Полежаев, В.Н. Исследование некоторых разностных схем и аппроксимаций граничных условий для численного решения уравнений тепловой гравитационной конвекции / В.Л. Грязнов, В.Н. Полежаев – М. : Наука, 1974. – 71 с.

88. Берковский, Б.М., Ноготов, Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена / Б.М. Берковский, Е.Ф. Ноготов – Минск : Наука и техника, 1976. – 144 с.
89. Макаров, А.Н. Теплообмен в дуговых сталеплавильных печах / А.Н. Макаров – Тверь : ТГТУ, 1998. – 184 с.
90. Макаров, А.Н. Математическая модель плазменно-дуговой печи с доминирующим излучением как электротеплового преобразователя / А.Н. Макаров // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1989. – № 7. – С. 139 – 142.
91. Бигеев, А.М., Бигеев, В.А. Производство стали / А.М. Бигеев, В.А. Бигеев – Магнитогорск : МГТУ, 2000. – 540 с.
92. Левич, В.Г. Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич – М. : Физматгиз, 1959. – 525 с.
93. Расчетно-теоретические исследования тепловых процессов в кристаллизаторе / Буланов Л.В., Асанова Р.Ф., Волегова В.Е., Лобанов Е.П. // Сталь. – 1999. – №9. – С. 24 – 26.
94. Внутризаводской справочник марок сталей, Магнитогорск 1991 год.
95. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / Под общей ред. Г.А. Шалаева. – Екатеринбург : Уральский центр ПР и рекламы, 2003. – 320 с.
96. Журавлев, В.А., Китаев, Е.М. Теплофизика формирования непрерывного слитка // В.А. Журавлев, Е.М. Китаев – М. : Металлургия, 1974. – 216 с.
97. Михеев, М.А., Михеева, И.М. Основы теплопередачи // М.А. Михеев, И.М. Михеева – М. : Энергия, 1973. – 320 с.
98. Девятов, Д.Х., Каплан, Д.С. Корпоративная информационная система металлургического предприятия / Д.Х. Девятов, Д.С. Каплан – Магнитогорск : МГТУ, 2008. – 306 с.
99. Шлеер, С., Меллор, С. Объектно-ориентированный анализ: моделирование мира в состояниях : пер. с англ. / С. Шлеер, С. Меллор – Киев : Диалектика, 1993. – 240 с.



100. Колесов, Ю.Б., Сениченков, Ю.Б. Моделирование систем. Объектно-ориентированный подход. Учебное пособие / Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков – СПб. : БХВ – Петербург, 2006. – 192 с.
101. Павлидис, Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений: пер. с англ. / Т. Павлидис. – М. : Радио и связь, 1986. – 400 с., ил.
102. Логунова, О.С. Оценка статистическими методами серного отпечатка поперечного темплета непрерывно-литой заготовки / О.С. Логунова, В.В. Павлов, Х.Х. Нуров // Электрометаллургия. – 2004. – № 5. – С. 18 – 24.
103. Горелик, А.Л. Современное состояние проблемы распознавания : Некоторые аспекты / А.Л. Горелик, И.Б. Гуревич, В.А. Скрипкин. – М. : Радио и связь, 1985. – 160 с.
104. Журавлев, Ю.И. Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания и классификации / Ю.И. Журавлев // Проблемы кибернетики. – 1978. – Вып. 33. – С. 5 – 8.
105. Журавлев, Ю.И. Задачи распознавания и классификации со стандартной обучающей информацией / Ю.И. Журавлев // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1980. – Т. 20. – № 5. – С. 1294 – 1309.
106. Рудаков, П.И. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.x / П.И. Рудаков, И.В. Сафронов ; под общ. ред. канд. техн. наук В.Г. Потемкина – М. : Диалог – МИФИ, 2000. – 416 с.
107. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений: пер. с англ. / У. Прэтт. – М. : Мир, 1982. – Кн. 1. – 312 с.
108. Hall, C.F A Nonlinear Model for the Spatial Characteristics of the Human Visak System / C.F. Hall, E.L. Hall// IEEE Trans. Sys: Man Cybern. – SMC. – 7,3. – P. 161 – 170.
109. Логунова, О.С. Применение методов цифровой обработки изображений для оценки серного отпечатка с темплета непрерывно-литого слитка / О.С. Логунова, А.А. Стороженко // Теория и технология металлур-

гического производства: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск, 2001. – Вып. II. – С. 87 – 92.

110. Логунова, О.С. Критерии оценки качества изображения серного отпечатка темплета непрерывно-литой заготовки для автоматизированной информационной системы управления качеством / О.С. Логунова // Новые программные средства для предприятий Урала : сб. трудов регион. науч.-техн. конференции. – Магнитогорск : МГТУ, 2003. – Вып. 2. – С. 119 – 125.