

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
профессионального образования

Сибирский федеральный университет

На правах рукописи



Авдулов Антон Андреевич

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОДИФИКАТОР СЛИТКА
В РОТОРНОЙ ЛИТЕЙНОЙ МАШИНЕ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель доктор
технических наук, профессор
Тимофеев В. Н.

Красноярск – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ОБЗОР И АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ПРОВОЛОКИ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, СПОСОБЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СТРУКТУР СЛИТКОВ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	12
1.1 Применение МГД-устройств в технологических процессах литейных производств.....	12
1.2 Линии непрерывного литья и прокатки для производства катанки из алюминиевых сплавов	15
1.3 Способы и технологии улучшения структуры слитков	21
1.4 Обзор магнитогидродинамических технологий и устройств, используемых для повышения качества слитков	24
1.5 Современные методы математического моделирования тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов.....	28
1.6 Конструкция и особенности роторных литейных машин с точки зрения применения МГД-технологий. Постановка задач исследования	30
1.7 Выводы по главе 1	39
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ МОДИФИЦИРОВАНИИ СЛИТКА В РОТОРНОЙ ЛИТЕЙНОЙ МАШИНЕ.....	41
2.1 Математическое моделирование процесса кристаллизации	41
2.1.1 Описание модели и основные допущения.....	41
2.1.2 Расчетная модель. Геометрия, размеры и свойства материалов	49
2.1.3 Результаты моделирования и их анализ	52
2.2 Математическое моделирование электромагнитных процессов	60
2.2.1 Описание модели и основные допущения.....	60
2.2.2 Расчетная модель. Геометрия, размеры и свойства материалов	69
2.2.3 Результаты моделирования и их анализ	72

2.3 Математическое моделирование гидродинамических процессов в жидкой фазе слитка.....	91
2.3.1 Описание модели и основные допущения.....	91
2.3.2 Расчетная модель, геометрия, размеры и свойства материалов.....	96
2.3.3 Результаты моделирования и их анализ	97
2.4 Выводы по главе 2.....	104
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЖИДКУЮ СЕРДЦЕВИНУ СЛИТКА.....	106
3.1 Задачи и постановка эксперимента	106
3.2 Методика проведения экспериментов и параметры литья	115
3.3 Результаты экспериментов	121
3.4 Сопоставление результатов физического и математического моделирования.....	124
3.5 Верификация результатов математического моделирования.....	127
3.6 Выводы по главе 3.....	130
4 ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ УСТАНОВКА МАГНИТНОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДИФИКАТОРА	132
4.1 Общее описание комплекса	132
4.2 Сравнение экспериментальных и расчетных данных характеристик работы опытно-промышленного образца	138
4.3 Рекомендации по проектированию и промышленным испытаниям комплексов магнитного гидродинамического модификатора для роторных литейных машин	142
4.4 Выводы по главе 4.....	144
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	146
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	161
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	162

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность научной работы. К физико-механическим свойствам электротехнической продукции из алюминиевых сплавов предъявляются все более высокие требования. Большинство отечественных проводов и кабелей изготавливают из алюминиевых сплавов А5Е, А7Е и АВЕ. Особенностью данных сплавов является их отношение к группе деформируемых термически неупрочняемых сплавов, что определяет способ их производства. Проволоку изготавливают из алюминиевой катанки методом холодной пластической деформации на волочильных станах. Катанка (горячекатаная проволока Ø 9–25 мм) изготавливается на агрегатах непрерывного литья и прокатки (*CCR line: Continuous Casting&Rolling*).

Механические свойства катанки напрямую зависят от ее кристаллической структуры, которая в свою очередь зависит от структуры исходной деформируемой непрерывно литой заготовки, полученной на роторной литейной машине. Структуры заготовок получаются крупнозернистыми и неоднородными, что не всегда позволяет получать катанку с требуемыми свойствами. Один из способов улучшения структуры заготовки, ранее не применяемый в роторных литейных машинах, является магнитогидродинамическое (МГД) воздействие на расплав в процессе кристаллизации (электромагнитное модифицирование).

К настоящему времени не разработано метода исследования процесса электромагнитного модифицирования в роторной литейной машине, позволяющего связать факторы воздействия – параметры поля, с результатом воздействия – структурой слитка. В связи с этим разработана электромагнитного модификатора для роторной литейной машины и метода исследования процесса электромагнитного модифицирования, позволяющего установить системные свойства и связи, является актуальной темой.

Степень разработанности темы. Ввиду сложности процессов, протекающих при электромагнитном воздействии в процессе кристаллизации, в последнее время широкое распространение получили численные методы моделирования, позволяющие получить дифференциальные и интегральные параметры тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов.

Исследованиями в данной области в настоящее время занимаются в УрФУ под руководством Ф. Н. Сарапулова, в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» под руководством В. Б. Демидовича, в СФУ под руководством В. Н. Тимофеева и М. В. Первухина. Из зарубежных ученых следует отметить работы *A. Jakovics*, Ю. М. Гельфгата, *A. Bojarevics* (Латвия), *E. Baake*, *B. Nacke* (Германия), *T. Wrobel*, *J. Szajnar* (Польша), и *S. Lupi* (Италия).

Современный математический аппарат не позволяет с высокой достоверностью осуществлять моделирование процесса кристаллизации с получением картин кристаллических структур. В связи с этим для исследования данных процессов активно применяется физическое моделирование. Наиболее известны работы З. Н. Гецелева, Ю. А. Самойловича, И. Л. Повха, А. Ф. Колесниченко, А. Б. Капусты. В данных работах взаимосвязь изменения структур строилась в зависимости от параметров работы конкретных МГД-устройств. Это не позволяет использовать их результаты при проектировании подобных МГД-устройств, так как изменение геометрических размеров и параметров системы ведет к получению другой структуры слитка при аналогичных параметрах работы МГД-устройства.

Математическое моделирование при заданных параметрах работы МГД устройств позволяет получить электромагнитные и гидродинамические характеристики воздействующих факторов, которые в дальнейшем можно сопоставить с результатами воздействия – структурами слитков, полученными в результате физического моделирования. Такое совмещение методов позволит дать инструмент для исследования МГД-процессов и разработки электромагнитных модификаторов для роторных литейных машин.

Целью диссертационной работы является определение общих закономерностей преобразования электрической энергии при электромагнитном модифицировании, и научное обоснование создания электромагнитного модификатора структуры слитка для роторной литейной машины.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Провести анализ и обобщить опыт исследования и использования МГД-устройств для модифицирования структур слитков.
2. Выявить особенности получения непрерывно литых заготовок в агрегатах непрерывного литья и прокатки алюминиевой катанки.
3. Обосновать перспективность использования электромагнитного воздействия на кристаллизующийся слиток в роторной литейной машине для модифицирования структуры.
4. Разработать метод исследования процесса электромагнитного модифицирования структуры слитка, совмещающий математическое и физическое моделирование, позволяющий построить взаимосвязь структуры слитка и характеристик электромагнитного поля в жидкой фазе слитка.
5. Построить математические модели для анализа связанных тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов, протекающих в системе. Определить зависимости, характеризующие данные процессы.
6. Разработать лабораторную установку для физического моделирования процесса литья алюминиевых слитков с электромагнитным воздействием.
7. На лабораторной установке, определить параметры кристаллизации слитка, обеспечивающие получение структур слитков, аналогичных промышленным.
8. Осуществить литье слитков на физической модели с различными параметрами работы электромагнитного модификатора и произвести их сопоставление с результатами математического моделирования.

9. Выбрать и обосновать технические решения и рекомендации по созданию электромагнитных модификаторов структур слитков для роторных литейных машин.

10. Разработать электромагнитный модификатор для роторной литейной машины.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые предложен метод исследования процесса электромагнитного модифицирования структуры слитка, совмещающий математическое и физическое моделирование, и позволяющий построить взаимосвязь структуры слитка и характеристик воздействующего электромагнитного поля на жидкую фазу.

2. Построены сопряженные математические модели для анализа тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов в системе «индуктор – кристаллизатор – слиток», учитывающие фазовые состояния кристаллизующегося слитка и магнитогидродинамические процессы в нем.

3. Разработана физическая модель системы «индуктор – кристаллизатор – слиток», позволяющая получать зависимости структуры слитка от параметров и режимов работы индуктора электромагнитного модификатора.

4. В результате проведения численного и физического экспериментов впервые получены дифференциальные и интегральные характеристики кристаллизующегося слитка под воздействием электромагнитного поля, а именно:

– построена эмпирическая зависимость протяженности жидкой фазы слитка (в градусах) от условий охлаждения и скорости вращения литейного колеса;

– определено, что с момента контакта стальной ленты с расплавом до начала воздействия электромагнитным полем в кристаллизующемся слитке образуется твердая фаза толщиной 3–4 мм, препятствующая замешиванию окислов в слиток;

– в зависимости от толщины твердой фазы слитка под активной зоной индуктора максимальное значение тангенциальных электромагнитных сил F_t (Н),

приложенных к жидкой фазе, достигается при частоте тока в индукторе в диапазоне от 15 до 30 Гц;

– построена зависимость размера зерна структуры слитка от величины линейной электромагнитной силы f_t (Н/м), создаваемой индуктором, показано, что с увеличением f_t от 0 до 7 Н/м происходит уменьшение размера зерна, дальнейшее увеличение f_t не приводит к изменению структуры слитка.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы обоснована тем, что:

– доказана возможность электромагнитного модифицирования структуры алюминиевого слитка в роторной литейной машине в процессе кристаллизации;

– изложены факторы, влияющие на изменение кристаллической структуры слитка при электромагнитном модифицировании, установлены зависимости изменения структуры слитка от режимов работы индуктора;

– разработан метод исследования процесса электромагнитного модифицирования и раскрыты возможности его применения для исследования процесса электромагнитного модифицирования в машинах непрерывного литья;

– изучены закономерности протекания физических процессов при электромагнитном модифицировании слитка в роторной литейной машине;

– проведена модернизация существующих математических моделей и алгоритмов, позволившая построить сопряженные математические модели для анализа тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов в системе «индуктор – кристаллизатор – слиток».

Практическую значимость представляют:

– алгоритм расчета электромагнитных, тепловых и магнитогидродинамических процессов в системе «индуктор – кристаллизатор – слиток»;

– режимы работы электромагнитного модификатора, конструкция и схема соединения обмотки индуктора с разомкнутым магнитопроводом, обеспечивающие симметричную нагрузку фаз;

– рекомендации по проектированию и проведению промышленных испытаний электромагнитных модификаторов структур слитков в роторных литейных машинах.

Результаты работы использованы: при разработке технических условий №3442-014-35131371-2014 «Комплекс магнитного гидродинамического модификатора типа МГДМ» и изготовление опытно-промышленного модификатора в ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» (г. Красноярск) для Иркутского алюминиевого завода; в учебном процессе при подготовке магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника» Сибирского федерального университета.

Методология и методы исследования. Математическое моделирование осуществлялось с применением метода конечных элементов (МКЭ) для решения задачи электродинамики и метода конечных объемов (МКО) для решения тепловых и гидродинамических задач. Для реализации решения уравнений на основе указанных методов использовались современные САЕ системы *ANSYS* (МКЭ), *CFX* и *Fluent* (МКО). Физическое моделирование осуществлялось методом прямого геометрического подобия относительно кристаллизующегося слитка.

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод исследования физических процессов при кристаллизации слитка под воздействием электромагнитного поля, совмещающий математическое и физическое моделирование.

2. Математические и физическая модели системы «индуктор – кристаллизатор – слиток», позволяющие получить зависимости структуры слитка от параметров и режимов работы индуктора модификатора.

3. Дифференциальные и интегральные характеристики системы «индуктор – кристаллизатор – слиток».

4. Рекомендации по проектированию и испытаниям электромагнитных модификаторов структур слитков.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность подтверждена верификацией результатов математического моделирования электромагнитных процессов на физической модели и опытно-промышленной установке. Установлено качественное совпадение полученных результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике. Для экспериментальных работ достоверность результатов подтверждается воспроизводимостью структуры слитка при заданных режимах литья с электромагнитным воздействием. При проведении экспериментов использовались современные методики сбора и обработки информации на основе аналого-цифровых преобразователей и виртуальных измерительных приборов.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XV Международная научно-техническая конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 26 – 27 февраля 2009 г.); XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 4 – 8 мая 2009 г.); Всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи НТТМ-2009 (г. Москва, 24 – 27 июня 2009 г.); VI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Красноярск, 6-9 апреля 2010 г.); V Международном конгрессе и выставке «Цветные металлы – 2013» (г. Красноярск, 3 – 6 сентября 2013 г.); *9th International conference on Fundamental and applied MHD, Thermo acoustic and Space technologies PAMIR-14* (г. Рига, 16 – 20 июня 2014 г.); VI Международном конгрессе и выставке «Цветные металлы и минералы – 2014 (г. Красноярск, 15 – 18 сентября 2014 г.); I Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника энергетика машиностроение ЭЭМ-2014» (г. Новосибирск, 2 – 6 декабря 2014 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 работ, в том числе 5 статей в изданиях по перечню ВАК, 3 статьи в иностранных журналах, 6 публикаций в сборниках международных и всероссийских научно-

практических конференций, конгрессов, семинаров и межвузовских сборниках научных трудов.

Структура и объем. Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами, заключения, списка использованных источников и 2 приложений. Основная часть работы изложена на 162 страницах, содержит 11 таблиц и 85 рисунков. Список использованных источников включает 125 наименований.

1 ОБЗОР И АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ПРОВОЛОКИ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, СПОСОБЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СТРУКТУР СЛИТКОВ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Применение МГД-устройств в технологических процессах литейных производств

Магнитогидродинамические технологии и устройства получают все более широкое распространение в литейном производстве [2]. Принцип их действия основан на воздействии на металлический расплав электромагнитным полем. Для иллюстрации возможностей применения МГД-устройств в литейном производстве алюминиевых сплавов на рисунке 1.1 представлена схема плавильно-литейного агрегата.

В агрегате для плавки слитков используется стационарный газовый плавильный миксер 1, в котором с боковой стороны установлен МГД-перемешиватель 2 для интенсификации процесса теплообмена между твердой и жидкой фазами металла. Для транспортировки расплава из стационарной плавильной печи в лотковую систему используется МГД-лоток 3. Расплав по лотковой системе поступает в поворотный 4 или стационарный 5 электрический миксер, где производится приготовление сплава и его выдержка перед литьем. Для выравнивания температуры и химического состава в процессе приготовления сплава используются МГД-перемешиватели, которые могут быть установлены в боковой стенке 6 или под подиной 7 миксера.

Расплав может поступать в миксер из транспортного ковша 8 путем его заливки в карман миксера. С целью удаления щелочных и щелочноземельных металлов (лития, натрия, магния) в ковшах может проводиться рафинирование

расплава солями. Для интенсификации перемешивания расплава с солями может использоваться МГД-перемешиватель 9.

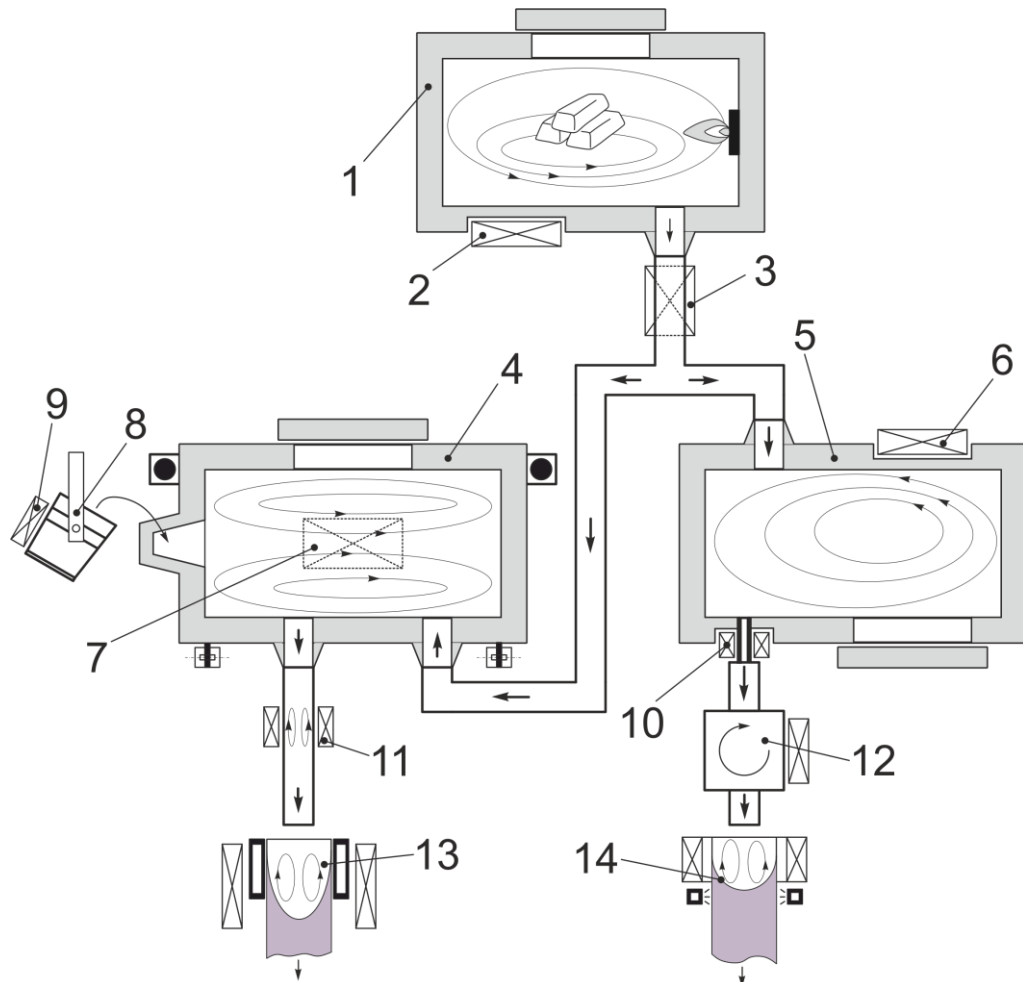


Рисунок 1.1 - Плавильно-литейный агрегат с МГД-устройствами

Расплав из миксера в зависимости от его типа подается на литейную машину путем поворота всего миксера либо путем дозирования расплава через МГД-летку 10, изменяющую скорость истечения расплава путем регулирования силы электромагнитного поля. В металлотрактах, между миксерами и литейными машинами, могут быть установлены МГД-замешиватель легирующего или модифицирующего прутка 11. С целью интенсификации взаимодействия газов (хлор, аргон) с расплавом установка рафинирования 12 может быть оборудована МГД-вращателем.

На стадии литья могут применяться литейные машины на базе кристаллизаторов скольжения с установленными МГД-перемешивателями жидкой сердцевины слитков 13, обеспечивающие повышение качества слитков [1]. Как вариант могут применяться литейные машины на базе технологии литья в электромагнитный кристаллизатор 14, где формообразование слитка осуществляется магнитным полем, а в жидкой фазе слитка образуются интенсивные МГД-течения.

Большой вклад в создание и совершенствование электротехнологического оборудования металлургического назначения сделан российскими учеными Сибирского федерального университета на кафедре электротехнологии и электротехники под руководством В. Н. Тимофеева, Новосибирского государственного технического университета на кафедре автоматизированных электротехнологических установок под руководством В. С. Черещниченко, А. И. Алиферова [70, 71, 9, 72], Уральского государственного технического университета под руководством Ф. Н. Сарапулова [61, 60], Куйбышевского металлургического завода под руководством З. Н. Гецелева, Чувашского государственного университета на кафедре автоматизированных электротехнологических установок и систем под руководством Ю. М. Миронова [42, 40, 41, 43], Московского энергетического института на кафедре физики электротехнических материалов и автоматизации электротехнологических комплексов под руководством А. Б. Кувалдина, В. П. Рубцова [34, 37, 62, 56, 57], Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета на кафедре электротехнологической и преобразовательной техники под руководством Ю. И. Блинова, В. Б. Демидовича, В. С. Немкова [25, 44, 15] и др. Большой вклад в создание электротехнологического оборудования металлургического назначения сделан зарубежными учеными, такими как А. Ф. Колесниченко (США), В. Nacke (Германия), S. Luri (Италия), Ю. М. Гельфат (Латвия) и др. [10, 33, 52, 94].

Магнитогидродинамические технологии и устройства в металлургии позволяют производить электромагнитное перемешивание расплава, его транспортировку и дозирование, способствуют протеканию химических реакций и физических процессов при рафинировании и легировании сплавов, обеспечивают улучшения физико-механических свойств слитков в процессе литья [79]. При этом обеспечивается автоматизация технологических процессов и повышается производительность плавильно-литейных производств.

Несмотря на приведённые преимущества, получаемые от применения МГД-устройств, в литейных процессах пока что существует большое количество металлургического оборудования, не оснащенного данными устройствами.

1.2 Линии непрерывного литья и прокатки для производства катанки из алюминиевых сплавов

Одним из представителей оборудования, не оснащенных МГД-устройствами, являются линии непрерывного литья и прокатки (*CCR line: Continuous Casting&Rolling*) с литейной машиной роторного типа, предназначенные для производства катанки из алюминиевых сплавов. Данную технологию предложил итальянский инженер и изобретатель Иларио Проперци в 1947 г. [89]. Агрегат аналогичного назначения был разработан в ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ» им. академика А. И. Целикова [45] и в 1961 г. после длительных наладочных работ был введен в эксплуатацию на Днепропетровском алюминиевом заводе (г. Запорожье) [35].

Все агрегаты данного типа имеют схожую структуру (рисунок 1.2) и состоят из раздаточного миксера 1, роторной литейной машины 2, летучих ножниц 3, многоклетьевого прокатного стана 4 и моталки 5 для сматывания катанки в бунты. Отличительной особенностью таких агрегатов является сочетание в одном

непрерывном технологическом процессе разливки жидкого алюминия, его кристаллизации, прокатки заготовки до готовой продукции и ее смотки в бунты.

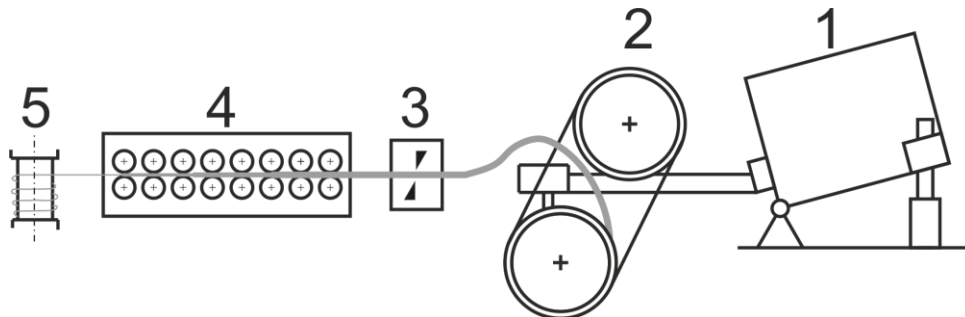


Рисунок 1.2 - Схема современного литейно-прокатного комплекса с роторной литейной машиной для производства проволоки

Суть технологии можно рассмотреть на примере работы современного агрегата фирмы ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ», предназначенного для получения проволоки диаметром 9,5 – 25 мм. Жидкий алюминий из миксера поступает по желобу в ванну, установленную неподвижно на раме кристаллизатора. Из ванны накопленный металл перетекает по желобу и через трубку откидного лотка попадает в приемную ванночку со специальным сменным носком. Конец носка имеет форму изложницы литейного колеса и плотно прилегает к нему. Из приемной ванночки по носку металл попадает в изложницу вращающегося колеса кристаллизатора, где происходит его кристаллизация. Обод колеса кристаллизатора снаружи охватывается стальной лентой. Натяжение стальной ленты создается натяжением механизма пружинно-винтового типа. Изложница колеса кристаллизатора и лента образуют канал трапециевидного сечения, форму которого принимает кристаллизирующийся алюминий. Подачу металла в кристаллизатор регулируют поплавковым дозатором таким образом, чтобы уровень его в кристаллизаторе не колебался и находился не выше уровня касания ленты и колеса кристаллизатора (во избежание перелива).

Охлаждающей средой является обратная вода, поступающая от насосной установки. Вода поступает во внутреннюю полость колеса

кристаллизатора, омывает обод банджа, и через специальный клапан идет на сброс. Кроме охлаждения изнутри обод банджа и натяжная лента охлаждаются водой с наружной стороны через специальные оросители. Натянутая лента охватывает обод колеса кристаллизатора на угле 180° .

Механизм вращения литейного колеса обеспечивает высокую плавность вращения, т. к. незначительные толчки оказывают отрицательное влияние на качество заготовки. Управление работой кристаллизатора осуществляется через пульт управления и ведется литейщиком, рабочее место которого находится прямо у колеса кристаллизатора.

В начале разливки, когда тепловой поток в кристаллизаторе еще не стабилизировался, процесс имеет неустойчивый характер. Заготовка идет с большим количеством наружных и внутренних дефектов, и она не может быть пущена в прокатку. Поэтому её режут на отдельные куски длиной 1–1,5 м на ножницах, установленных перед прокатным станом, и отправляют на переплавку. Летучие ножницы основаны на механизме кривошипного типа с возвратно-поступательным движением ножа, закрепленного на ползуне. Ножницы предназначены для порезки заготовки при первоначальном пуске агрегата, когда еще не стабилизировался тепловой режим в кристаллизаторе и заготовка идет с большим количеством дефектов. Кроме того, ножницами пользуются при кратковременных остановках прокатного стана.

Когда из кристаллизатора начинает выходить качественная заготовка, её отправляют в приемные ролики, из которых она подается в первую рабочую клетку стана. Также если по технологии требуется производить нагрев заготовки перед ее подачей в стан, перед станом устанавливается индукционный нагреватель проходного типа.

Прокатный стан предназначен для прокатки алюминиевой заготовки площадью сечением до 3430 мм^2 в круг диаметром 9,5; 12; 15 мм. Стан непрерывного действия состоит из 17 прокатных клеток. При прокатке круга диаметром 9,5 мм используются все клетки. Для прокатки круга больших

диаметров лишние клетки убираются из линии прокатки. Вращение рабочих клеток стана осуществляется от электродвигателя постоянного тока через групповые многоступенчатые редуктора.

Рабочие клетки состоят из 3 валков, расположенных под углом наклона 120° друг между другом. Калибровка клеток производится из условий постоянства объема металла, проходящего через каждую клетку в единицу времени. Так как площадь сечения прокатываемого металла уменьшается после каждой клетки, то скорости прокатки в каждой последующей клетке подобраны таким образом, что условие постоянства объема металла, проходящего через каждую клетку в единицу времени, сохраняется.

На прокатные валки рабочих клеток стана подается эмульсия, которая охлаждает их и одновременно является технологической смазкой. Смазка механизмов клеток подается от станции жидкой смазки прокатного стана, работающей постоянно и установленной в маслоподвале стана. Для точной ориентации и направления прокатываемого металла в рабочие валки в клетках устанавливаются вводные и выводные проводки. На раме перед первой рабочей клеткой установлен узел направляющих и ориентирующих заготовку роликов (правильная машина).

Летучие ножницы в процессе работы стана вращаются непрерывно, и всегда готовы к порезке катанки при аварии или какой-либо неполадке в работе моталки. При нормальной устойчивой работе прокатного стана и моталки катанка направляется проводкой у летучих ножниц мимо ножей летучих ножниц в зону направляющих проводок моталки.

Моталка с двумя шпулями предназначена для смотки алюминиевой катанки, поступающей с установки непрерывной разливки и прокатки в бухты весом до 2 т. Конструкция моталки и система управления обеспечивают рядовую укладку катанки в бухтах, намотку с постоянным натяжением, переход намотки с одной шпули на другую без остановки стана и моталки.

Преимуществом данных комплексов является непрерывность процесса, устранение специального нагрева перед прокаткой и использование первородного тепла слитка. Данные агрегаты в зависимости от модели обеспечивают производительность вплоть до 100 тыс. тонн в год. Данные агрегаты, несмотря на большие капитальные затраты, широко используются благодаря их высокой производительности и малой себестоимости выпускаемой продукции.

В мире разработкой литейно-прокатных агрегатов для производства алюминиевой катанки занимаются ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ» (Россия) [45], *Continuus-Properti S.p.A.* (Италия) [89], *Southwire Company LLC* (США) [106], *Deyang Dongjiagang Mechanical & Electrical Equipment Co., Ltd.* (Китай) [92] и *Deyang Hongguang Machine Equipments Co., Ltd* (Китай) [93].

Линии непрерывного литья и прокатки позволяют изготавливать катанку широкого ассортимента [88]. В основном этим способом производятся деформируемые алюминиевые сплавы [76] 1XXX, 3XXX и 5XXX серий [76, 13], особенностью которых является невозможность их термического упрочнения. В связи с этим важнейшим параметром становятся физико-механические свойства катанки, получаемой на агрегате, т. к. свойства конечных изделий напрямую зависят от исходных свойств катанки.

На данных литейно-прокатных агрегатах влиять на качество выпускаемой катанки можно путем настройки технологических параметров литья и прокатки заготовок. На прокатном стане выполняется подбор клетей и настройка температурных режимов охлаждения валков путем подачи эмульсии. На литейной машине настраиваются параметры кристаллизации расплава с целью получения на выходе из кристаллизатора заготовки необходимой температуры с хорошим качеством поверхности и структуры.

Структура заготовки напрямую влияет на физико-механические свойства. Особенностью процесса прокатки является то, что чем более высокие механические свойства имеет прокатываемая заготовка, тем более высокие свойства имеет готовая продукция. Так в [67] приведены зависимости

механических свойств алюминиевых сплавов при разных степенях механической деформации (рисунок 1.3). Пластическая деформация приводит к увеличению предела прочности σ_B и к уменьшению относительного удлинения δ . Холодная деформация алюминиевых сплавов ведет к увеличению удельного электрического сопротивления всего на 2 – 6 % [21]. При деформации происходит измельчение и вытягивание зерен по направлению деформации (Рисунок 1.3, б). Высокие степени деформации создают большую плотность дислокационной сетчатой структуры и приводят к дальнейшему уменьшению размера ячейки дислокационной сетчатой структуры. Искажения кристаллической решетки, связанные с дислокациями, и напряжения, вызываемые взаимодействием дислокаций, являются основными причинами деформационного упрочнения [67].

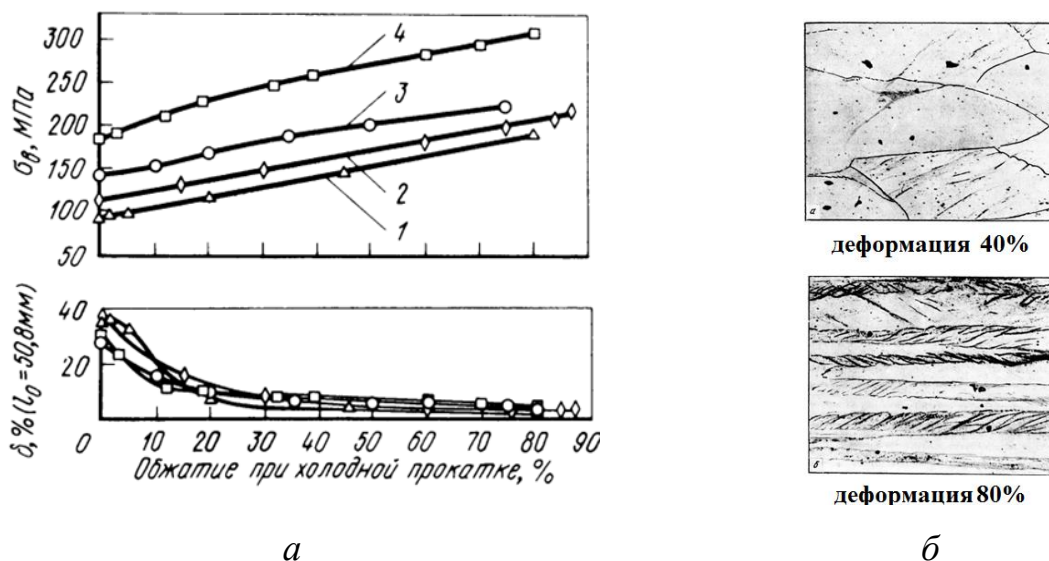


Рисунок 1.3 - Механические свойства алюминиевых сплавов при разной степени прокатки (а): 1 – 1100 (Al); 2 – 3003 (1,2 % Mn); 3 – 5050 (1,4 % Mg); 4 – 5052 (2,5 % Mg) и структуры слитков при разной степени деформации (б)

Таким образом, в линиях непрерывного литья и прокатки основным параметром, влияющим на физико-механические свойства выпускаемой продукции, является характер кристаллической структуры заготовки, отливаемой на литейной машине.

1.3 Способы и технологии улучшения структуры слитков

Структура слитка зависит от ряда факторов: химического состава сплава, наличия примесей и процесса его кристаллизации. Если скорость охлаждения велика, а количество сплава сравнительно мало, то последний затвердевает в виде множества равноосных кристаллов, т.е. кристаллов, не имеющих вытянутой формы. В другом крайнем случае, когда остывает большая масса металла, происходит, частичное образование столбчатой структуры, характеризующейся тем, что длина кристаллов по направлению, перпендикулярному стенке изложницы, получается во много раз больше их размерам по другим направлениям [68].

Основные работы по исследованию способов влияния на структуру слитков при кристаллизации связаны с добавлением в расплав модификаторов Al-Ti-B и Al-Ti-C, ультразвуковым и электромагнитным воздействием на расплав.



Рисунок 1.4 - Макроструктура слитка без и с добавлением Al-Ti-B

Измельчить структуру слитка можно путем добавления в расплав специальных лигатур (модификаторов), например: Al-Ti-B и Al-Ti-C (рисунок 1.4). Механизм работы данных модификаторов заключается в том, что титан не вступает в химическую реакцию с алюминием, а присутствует в сплаве в виде примеси. Данные частицы титана в процессе кристаллизации образуют

дополнительные центры кристаллизации, тем самым интенсифицируется рост дополнительных зерен в слитке.

Недостатком модификаторов является их высокая стоимость и увеличение электросопротивления готовой продукции, поэтому их, как правило, применяют при литье высоколегированных сплавов и не применяют при литье электротехнических сплавов. Исследования влияния модификаторов Al-Ti-C и Al-Ti-B на структуру и свойства сплавов представлены в работах [91, 122, 113]. В работе [91] проведены исследования по влиянию дегазации расплава перед кристаллизацией на улучшение структуры слитков, полученных из сплавов A1100 и A6207 модифицированные Al-3 % Ti-0,15 % C или Al- 3% Ti-1 % B. Результаты исследований показали, что модифицирование модификаторами Al-Ti-C и Al-Ti-B позволяет существенно измельчить структуру слитка. Рекомендуется выполнять дегазацию слитка после проведения процедуры модифицирования сплава. При этом дегазация расплава вместе с модифицированием позволяет дополнительно измельчить структуру слитка.

Вопросы улучшения структуры слитков за счет ультразвукового воздействия на расплав в процессе кристаллизации рассматриваются в работах [84, 77, 124, 123]. В процессе литья в области кристаллизации помещается излучатель ультразвуковых волн (рисунок 1.5), генерирующий механические колебания с частотой более 16кГц.

Колебания распространяются по жидкой фазе слитка и воздействуют на фронт кристаллизации, разрушая на нем дендритные образования. Обширные теоретические и экспериментальные исследования по ультразвуковой обработке расплавленного алюминия были проведены Г. И. Эксиным [77].

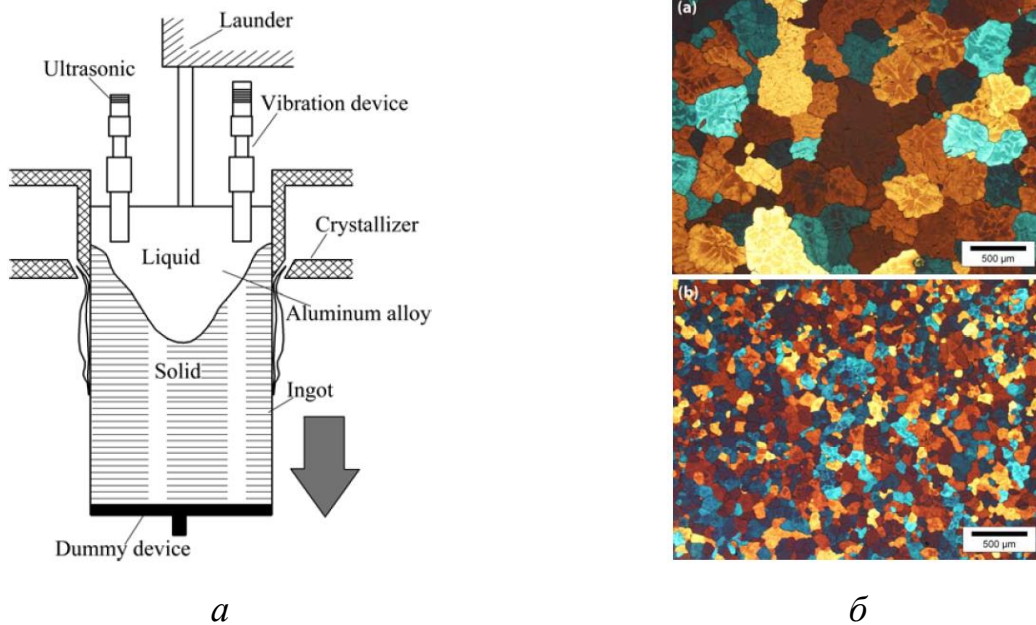


Рисунок 1.5 - Схема кристаллизатора с ультразвуковой установкой (а) и примеры образцов слитков без и с обработкой (б)

Электромагнитное перемешивание расплава в процессе кристаллизации значительно меняет структуру слитков [22]. Теоретические основы электромагнитного воздействия на кристаллизующийся расплав изложены в работах [73, 31]. Образующиеся в расплаве магнитогидродинамические течения интенсифицируют процесс кристаллизации за счет роста теплопередачи через фронт кристаллизации. Высокая турбулентность течений способствует выравниванию температур и химического состава во всем объеме жидкой фазы. Посредством изменения интенсивности электромагнитного воздействия возможно управлять процессом кристаллизации [19]. Таким образом, электромагнитное перемешивание позволяет управлять конвективными потоками в расплаве и тем самым воздействовать на процесс кристаллизации и формирования структуры [64]. При перемешивании жидкой сердцевины слитков необходимо создать такое движение жидкого металла в жидкой фазе слитка, которое позволяет эффективно воздействовать на дендритную структуру кристаллизующегося слитка или заготовки и значительно увеличить теплоотдачу от жидкой фазы, что способствует ускорению процесса затвердевания. Интенсивное охлаждение при

кристаллизации путем перемешивания достигается за счет сужения ширины переходной зоны между расплавом и фронтом кристаллизации. При этом необходимо обеспечить наибольшую разницу скоростей наружных и внутренних слоев металла, при которой происходит более интенсивное разрушение растущих кристаллов и унос их во внутренние слои расплава. Вследствие этого температура расплава равномерно понижается и ускоряется процесс кристаллизации. При этом фронт кристаллизации по мере затвердевания наружных слоев смещается внутрь заготовки. Известно, что при наличии однонаправленного движения жидкого металла образуются жидкостные потоки, вымывающие легирующие компоненты из пониженных слоев кристаллизующего слитка. Эти потоки устремляются к оси заготовки, что вызывает ее неоднородность по химическому составу и физическим свойствам. Поэтому для заготовок и слитков больших поперечных сечений рекомендуется движение чередовать с паузами или создавать движение расплава периодически в первоначальном направлении или периодически в прямом и обратном направлениях с паузами между реверсами.

В настоящее время работы по исследованию влияния электромагнитного поля на кристаллическую структуру сводятся к совокупности частичных теоретических предпосылок и отдельных экспериментальных работ в черной металлургии и в некоторых областях цветной металлургии [55].

1.4 Обзор магнитогидродинамических технологий и устройств, используемых для повышения качества слитков

Устройства для электромагнитного перемешивания в процессе кристаллизации широко используются в сталеплавильном производстве в машинах непрерывного литья стальных заготовок [19]. Для обеспечения перемешивания жидкой фазы слитка используются статоры или системы

статоров, создающих вращающееся магнитное поле [21, 22, 35]. Известны результаты работы, проводимой на протяжении 15 лет АХК ВНИИМЕТМАШ, совместно с ЗАО «Электромагнитные системы и технологии», направленные на модернизацию конструкции МНЛЗ [21]. На основании исследований создан кристаллизатор со встроенным устройством электромагнитного перемешивания. Устройство перемешивателя представляет собой магнитную систему двухфазного статора, содержащую магнитопровод и две пары полюсов с обмотками. Оси пар полюсов взаимно перпендикулярны, а синусоидальные токи катушек равны и сдвинуты по фазе на 90° . Наложение магнитных полей, возбуждаемых токами катушек, создает в объеме между полюсами вращающееся магнитное поле, которое приводит во вращение жидкий металл. В процессе дуговой плазменной плавки титановых сплавов применяют совместно электромагнитное перемешивание и ультразвуковое воздействие для управления процессом кристаллизации [101].

В алюминиевой промышленности электромагнитное перемешивание применяется в литейном производстве для приготовления сплавов, а также для перемешивания жидкой сердцевины крупногабаритных слитков (с сечениями свыше 100000 мм^2) в машинах вертикального литья, но не применяется в машинах непрерывного литья. В работе [66] было проведено исследование МГД-воздействия на структуру и свойства слитков из алюминиевого сплава. Был установлен факт измельчения зерна и формирования недендритной структуры. Протяженность структурных зон, число зерен в них и твердость зависят от структуры течения и силы тока в индукторе.

В работе [125] рассматривается вопрос применения электромагнитного модифицирования в машине горизонтального литья цилиндрических слитков диаметром 100 мм из сплава 7075 (рисунок 1.6). Принцип процесса заключается в том, что расплав из емкости поступает в литейное отверстие, в котором установлен медный кристаллизатор с графитовым кольцом. Графитовое кольцо является формообразователем слитка. Путем теплоотвода энергии через графит и

медный кристаллизатор происходит кристаллизация расплава. Закристаллизовавшийся слиток механически выводится из зоны кристаллизации приводным механизмом.

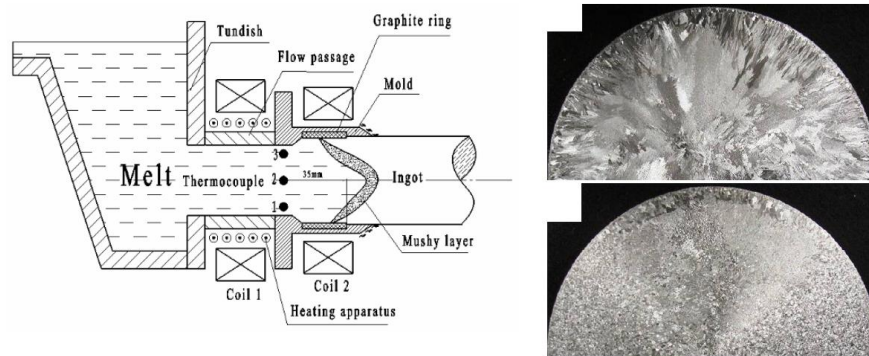


Рисунок 1.6 - Схема машины горизонтального литья цилиндрических слитков и образцы полученных макроструктур

Поверх кристаллизатора установлены две цилиндрические катушки, состоящие из 60 витков каждая, на которые подается ток 200 А частотой 50 Гц. Фазы токов катушек были сдвинуты на 90 эл. град., что создает в системе бегущее электромагнитное поле вдоль оси литья. Использование электромагнитного воздействия в зоне кристаллизации позволило снизить перепад температуры в жидкой фазе слитка с 35 до 5 °С, а также существенно измельчить зерно (рисунок 1.6). Необходимо отметить, что сплав 7075 (аналог по ГОСТ В95) является высоколегированным и, несмотря на это макроструктура отливов имеет крупнозернистую и неоднородную структуру.

Обширные исследования по воздействию электромагнитного поля на алюминиевые сплавы в процессе кристаллизации были проведены *T. Wróbel u Jan Szajnar* [108, 111, 110, 112, 109, 119, 121, 120]. В работе [112] представлены результаты испытаний установки горизонтального литья с электромагнитным перемешивателем, установленным в зоне кристаллизации. Установка разработана на факультете литья Силезского технологического университета. На рисунке 1.7 представлен кристаллизатор данной установки и образцы

макроструктур отлитых слитков. Установка позволяет отливать цилиндрические слитки диаметром от 20 до 40 мм. В отличие от индуктора, представленного в работе [125], здесь используется индуктор, создающий вращающееся магнитное поле вокруг оси литья. Индуктор позволяет развивать в расплаве интегральные значения электромагнитных сил до 1,6 Н при частоте тока 100 Гц. Результаты экспериментов показали существенное измельчение макроструктуры слитков при электромагнитном воздействии в процессе литья, как для чистого алюминия, так и для сплава $AlSi_2$.

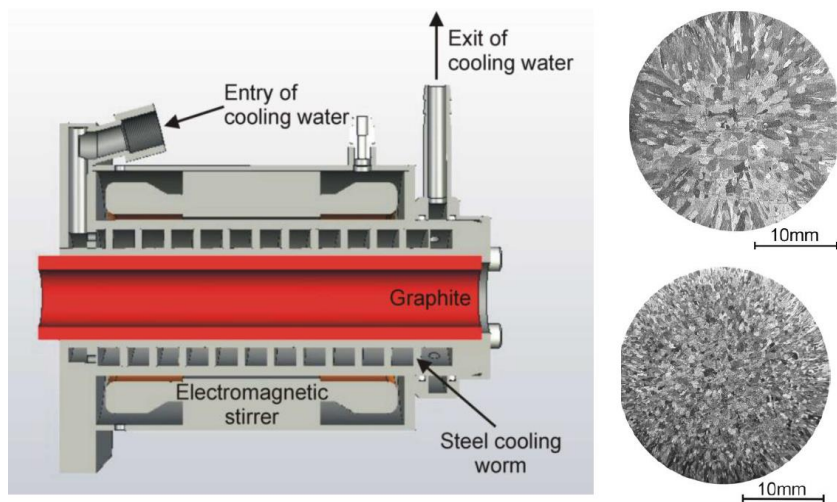


Рисунок 1.7 - Кристаллизатор скольжения с установленным электромагнитным перемешивателем

Отдельным направлением использования электромагнитных технологий в литейном деле являются технологии бесконтактного литья слитков в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК). В данных способах электромагнитное поле используется для формообразования кристаллизующегося слитка и для перемешивания расплава в процессе кристаллизации. Вопросами исследования процессов, протекающих в литейных машинах с электромагнитным кристаллизатором, занимались З. Н. Гецелев, В. И. Добаткин, В. Н. Тимофеев, М. В. Первухин [28, 49].

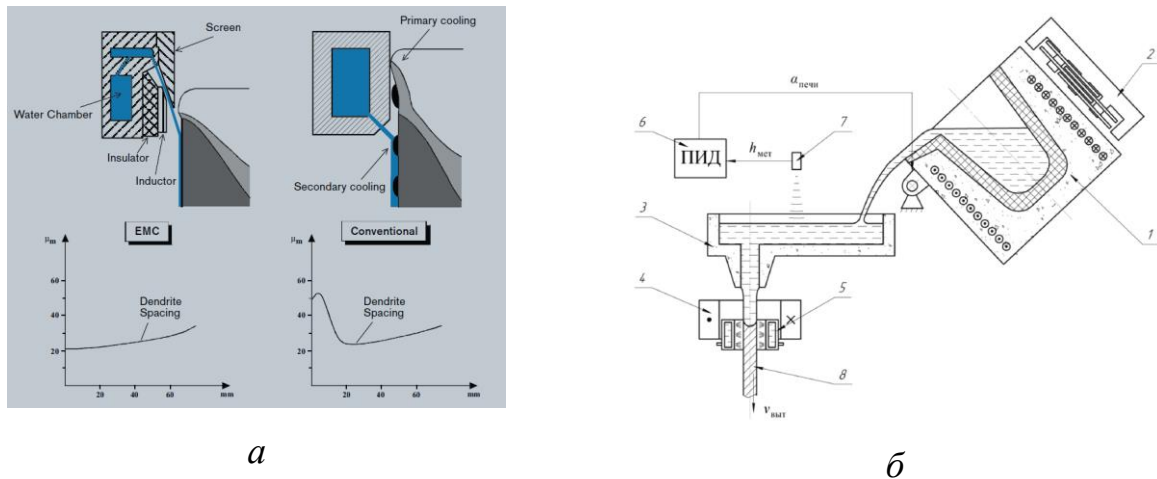


Рисунок 1.8 - Способы литья в электромагнитный кристаллизатор слитков крупного (а) и малого (б) сечений

Литейная машина, установленная на заводе *AMAG casting GmbH* [82], оснащённая электромагнитными кристаллизаторами, позволяет получать в слитках с сечением вплоть до 2320 x 600 мм более мелкозернистую структуру по сравнению с кристаллизаторами скольжения (рисунок 1.8, а).

Исследования процессов, протекающих при литье слитков диаметром 5 – 20 мм в электромагнитный кристаллизатор, рассмотрены в работах [49, 65]. За счет малого диаметра слитков и непосредственной подачи охлаждающей жидкости на поверхность слитка (рисунок 1.8, б) достигаются высокие скорости кристаллизации, что способствует получению мелкозернистой структуры, сопоставимой со структурой полученной гранульной технологией.

1.5 Современные методы математического моделирования тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов

Моделирование процесса кристаллизации также производится с помощью программы *ProCAST* [98]. В работе [100] для исследования процесса

трещинообразования при литье плоских слитков в кристаллизаторы скольжения использовалась программа *ABAQUS* для математического моделирования тепловых полей и расчета механических напряжений в слитке. При этом в качестве начальных условий задавались коэффициенты теплоотдачи, полученные в результате экспериментальных измерений. Также для моделирования данных процессов в работе [86] используется программа *MSC.Marc*, основанная на методе конечных элементов.

В работе [99] для моделирования процесса непрерывного литья магниевых сплавов используется программный продукт *Fluent* в связке с программой *MSC.Marc* для выполнения термомеханического анализа.

В последнее время для моделирования электромагнитных процессов, протекающих в металлургическом оборудовании, используется коммерческий пакет *ANSYS Emag*. В работах [96, 85, 107] данный пакет используется при моделировании процессов, протекающих в индукционной печи с холодным тиглем. Для моделирования гидродинамических течений в расплаве, вызванных электромагнитным воздействием, в работах [96, 85, 107] использовались пакеты *ANSYS CFX* и *ANSYS Fluent*. Также в работе [114] в индукционной печи с холодным тиглем производилось моделирование процесса образования гарнисажа при плавке сплава TiAl, используя пакет *ANSYS Fluent* с моделями турбулентности $k-\omega$ и *LES*.

В работах [50, 51] для моделирования электромагнитных и гидродинамических процессов при литье прутковой заготовки в электромагнитный кристаллизатор, также использовались программные продукты *ANSYS Emag* и *ANSYS Fluent*. При этом оценка изменения структуры производилась путем проведения металлографических исследований образцов, полученных на лабораторной установке.

Результат обзора современных методов математического численного моделирования тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов показывает преобладание использования методов конечных элементов (МКЭ) [23]

и метода конечных объемов (МКО) [95]. При этом современный уровень развития техники и теории не позволяет с высокой достоверностью производить математическое моделирование процесса кристаллизации под электромагнитным воздействием с расчетом кристаллического строения слитка, поэтому результаты математического моделирования необходимо использовать в совокупности с результатами физического моделирования, в котором можно получить структуры слитков.

1.6 Конструкция и особенности роторных литейных машин с точки зрения применения МГД-технологий. Постановка задач исследования

В качестве объекта исследования была выбрана литейная машина агрегата ЛПА-АК-5 производства ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ им. акад. А. И. Целикова», эксплуатируемая на Иркутском алюминиевом заводе (г. Шелехов) для производства алюминиевой катанки диаметрами 9, 11, 14 мм с производительностью от 4,5 до 6 т/ч. Литейная машина с ее схематичным изображением представлены на рисунке .9.

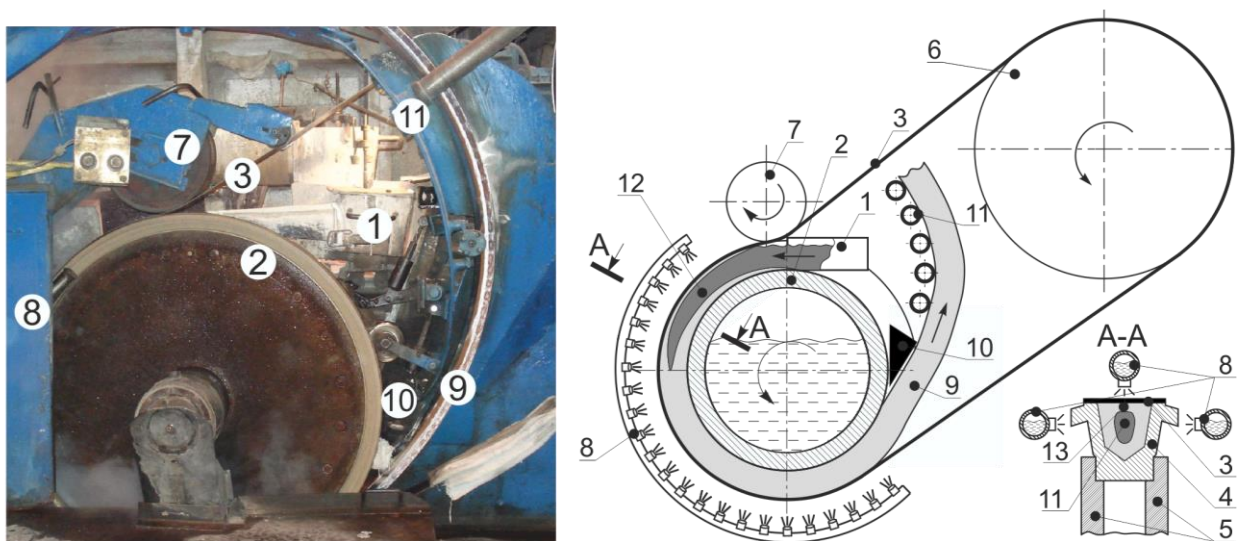


Рисунок 1.9 - Роторная литейная машина

Литейная машина работает следующим образом: расплав из миксера по литейным желобам через лоток горизонтальной подачи *1* поступает в торцевую полость вращающегося литейного колеса *2*. Горизонтальная подача позволяет более точно осуществлять регулировку расхода металла, поступающего в кристаллизатор. Кристаллизатор состоит из литейного колеса *2* и бесконечной стальной ленты *3*. Литейное колесо имеет наружный диаметр около 1500 мм и состоит из медного бандажа *4* и двух стальных дисков *5*, обжимающих бандаж по внешнему контуру. В полое пространство колеса в процессе литья поступает вода, что позволяет производить отвод тепла от днища бандажа. Вращение колеса осуществляется управляемым электроприводом с регулированием скорости вращения от 0 до 2 об./мин. Бесконечная стальная лента *5*, толщиной 2 мм, предназначена для предотвращения пролива металла из полости медного бандажа *3* и для изоляции расплава от воды. Для плотного прилегания ленты *5* к торцу литейного колеса *2* и ее синхронного движения с литейным колесом используется специальный механизм, состоящий из большого ролика *6* с диаметром, равным диаметру литейного колеса и малого прижимного ролика *7* в районе места заливки металла. Стальная лента *5* охватывает по окружности литейное колесо *2* и большой ролик *6*. Регулировкой положения малого ролика *7* обеспечивается плотное прилегание ленты к медному бандажу *3*. По направлению вращения, после малого прижимного ролика *7* с внешней стороны литейного колеса установлен ороситель *8*, подающий воду на боковую поверхность медного бандажа и на стальную ленту для отвода тепла от кристаллизатора. Таким образом, поступающий в колесо расплав кристаллизуется и образуется непрерывно-литой слиток *9*. При этом форма поперечного сечения слитка *9* повторяет форму полости медного бандажа *3*. Слиток *9* извлекается из полости кристаллизатора съемником *10* и подается через ролики *11* на прокатный стан.

Из-за особенностей конструкции литейной машины и технологического процесса жидкая фаза *12* слитка *9* вытянута вдоль полости литейного колеса *2*, и таким образом образуется обширный фронт кристаллизации. Как было указано

ранее, именно в процессе кристаллизации закладывается структура слитка и как следствие – физико-механические свойства конечной продукции. В настоящее время в литейных машинах с роторным кристаллизатором возможно влиять на структуру слитка путем регулирования скорости вращения колеса (т. е. скорости литья), изменения температуры расплава и скорости охлаждения. Каждый из способов имеет свои ограничения: снижение скорости литья уменьшает производительность агрегата, снижение температуры отливаемого расплава ограничено температурой кристаллизации, скорость охлаждения расплава сильно изменяется по мере прогрева кристаллизатора и уменьшения сердцевины слитка. На измельчение структуры и образование глобулярных кристаллов также оказывает влияние наличие турбулентного течения расплава в жидкой фазе кристаллизующегося слитка [28]. Циркуляция расплава в жидкой фазе слитка в процессе литья на роторной литейной машине имеет конвективную природу, вызванную градиентом температур в металле, и по причине ее малого значения не оказывают существенного влияния на структуру слитка.

С целью улучшения структуры непрерывно литого слитка в роторной литейной машине предлагается разработать МГД-установку – электромагнитный модификатор. Работа установки обеспечит создание турбулентного течения расплава в жидкой фазе слитка, что позволит у фронта кристаллизации увеличить эффективный коэффициент тепловой проводимости и диффузии [58]. Это обеспечит выравнивание температур и химического состава во всем объеме жидкой фазы, увеличение ее общего переохлаждения [16], уменьшение толщины теплового и гидродинамического пограничных слоев [26], что будет способствовать измельчению кристаллической структуры.

Принцип работы электромагнитного модификатора основан на создании в расплаве объемных электромагнитных сил, вызванных взаимодействием в расплаве тока и магнитного поля, которые в свою очередь приводят расплав в движение. Таким образом, первой задачей является выбор источника создания поля и тока в жидкой фазе слитка.

МГД-устройства по типу создания тока в рабочем теле подразделяются на кондукционные [53], где ток подается с помощью контактов, и индукционные [39], где ток индуцируется переменным магнитным полем. Роторные литейные машины эксплуатируются с 30-х годов двадцатого века. За это время конструкция машин была достаточно хорошо отработана и оптимизирована, что привело к ее компактным размерам и высокому насыщению элементами на единицу объема. При этом элементы машины расположены и подобраны таким образом, чтобы наиболее эффективно осуществлять отвод тепла от кристаллизатора. При использовании кондиционной машины потребуется подвод контактов к слитку для пропуска по нему электрического тока, что возможно сделать только через элементы кристаллизатора. По причине вращения литейного колеса потребуются скользящие контакты. При этом будут открытые токоведущие части, что недопустимо из-за условий эксплуатации. Охлаждение кристаллизатора приводит к обильному парообразованию, что может привести к короткому замыканию. Также большая часть тока, подаваемая через контакты, будет проходить через медный бандаж кристаллизатора, так как он обладает существенно меньшим сопротивлением, чем слиток, что приведет к значительному снижению эффективности работы кондукционного МГД-устройства. Таким образом, наиболее целесообразно в роторной литейной машине использовать электромагнитный модификатор на базе индукционной машины, создающей переменное магнитное поле [8].

Наилучшую циркуляцию расплава в жидкой фазе слитка обеспечивает индуктор, создающий бегущее магнитное поле, так как это позволяет создать транзитное течение расплава вдоль направления движения поля. При этом индуктор модификатора необходимо расположить как можно ближе к жидкой фазе слитка, а его магнитное поле, по возможности, должно воздействовать на всю длину жидкой фазы. Исходя из этого основополагающей задачей является определение места установки индуктора на литейной машине.

Положение индуктора относительно кристаллизатора и слитка оценивается путем рассмотрения поперечного сечения кристаллизатора А-А (Рисунок 1.10), на котором показан медный бандаж 4, конструкционные кольца 5, стальная лента 3, жидкая 11 и твёрдая 13 фазы слитка. Такая конструкция и геометрические пропорции стандартны для всех роторных литейных машин. Бандаж имеет массивную стенку толщиной от 10 до 30 мм, что связано с требованиями жёсткости конструкции и необходимости соблюдения определенной динамики процесса кристаллизации. При расположении индуктора с боковой стороны литейного колеса в медном бандаже, обладающем высокой электропроводностью, наведутся вихревые токи и как следствие произойдет экранирование магнитного поля. По этой причине исключается возможность установки индуктора с боковых сторон кристаллизатора. В связи с этим индуктор электромагнитного модификатора предлагается установить с торцевой стороны литейного колеса за прижимным роликом (поз. 14 на рисунке 1.10).

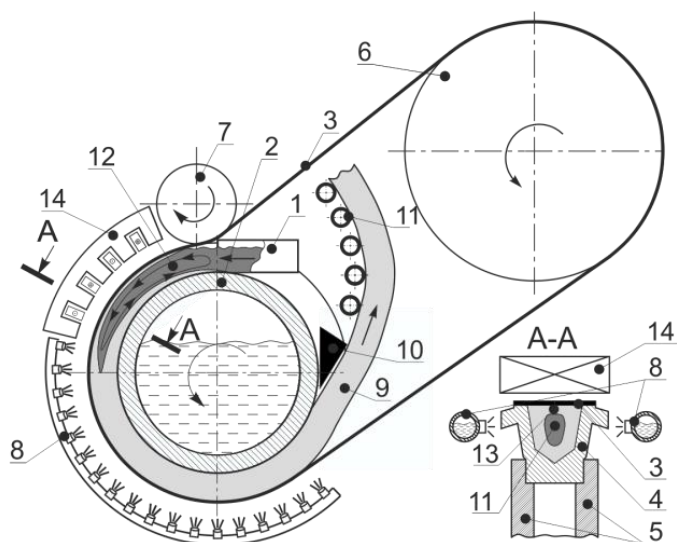
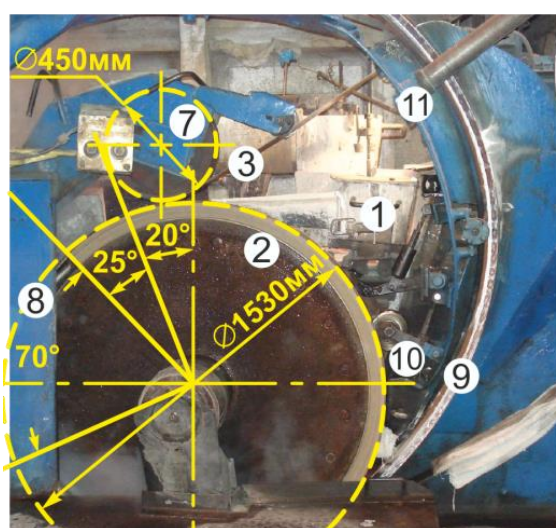


Рисунок 1.10 - Роторная литейная машина с установленным индуктором электромагнитного модификатора

Особенностью конструкции кристаллизатора, с точки зрения привязки к нему индуктора, является наличие большого числа экранирующих магнитное

поле элементов: медного бандажа, твердой фазы алюминиевого слитка и стальной ленты, обладающей ферромагнитными свойствами, что требует высоких энергетических параметров магнитного поля для эффективного воздействия на жидкую фазу. Также малый объем доступного свободного пространства и высокие температуры прилежащих элементов (до 700 °С) требуют хорошей проработки конструкции индуктора и системы его охлаждения.

Длина жидкой фазы в роторных литейных машинах в зависимости от производительности, технологии и марки отливаемого сплава может варьироваться от 0,5 до 1,5 м измеренной по длине дуги медного бандажа, что составляет для колеса диаметром 1530 мм сектор размером от 35° до 115° (Рисунок 1.10). Как видно из рисунка для литейной машины агрегата ЛПА-АК-5 сектор от 0° до 20° занят малым прижимным роликом, а начиная с 45°, бандаж начинает охлаждаться через охладители. Таким образом, зона от 0° до 20° недоступна для установки индуктора, в зоне от 20° до 45° возможна установка индуктора, а свыше 45° возможна установка индуктора с условием модернизации системы охлаждения. Кривизна литейного колеса определяет использование индукторов с дугообразной формой магнитопровода, обеспечивающих минимальный немагнитный зазор между поверхностью индуктора и жидкой фазой слитка.

Таким образом, для разработки электромагнитного модификатора структуры слитка в роторной литейной машине необходимо:

1. Установить зависимость изменения длины и геометрии жидкой сердцевины слитка в роторной литейной машине от технологических параметров литья с целью определения протяжённости дугообразного индуктора вдоль литейного колеса;

2. Провести выбор конструкции, определить геометрические размеры и задаться основными параметрами работы индуктора электромагнитного модификатора для проведения исследований;

3. Оценить влияние геометрических размеров, схем соединения обмотки и параметров работы индуктора электромагнитного модификатора на интенсивность силового воздействия на жидкую фазу слитка и энергетические параметры системы;

4. Провести оценку влияния элементов кристаллизатора, ферромагнитных свойств бесконечной ленты и толщины твердой фазы слитка на процесс электромагнитного воздействия на жидкую фазу слитка;

5. Определить технологические режимы работы электромагнитного модификатора, обеспечивающие модифицирование структуры;

6. Разработать технические решения и выработать рекомендации по проектированию электромагнитных модификаторов для роторных литейных машин;

7. Разработать опытно-промышленный электромагнитный модификатор структуры слитка для роторной литейной машины.

Из анализа последних работ по исследованию процессов кристаллизации слитков с электромагнитным воздействием следует вывод об активном использовании численных методов для моделирования тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов. При этом современные методы математического моделирования процесса кристаллизации не позволяют получить структуры с высокой достоверностью, поэтому в данной области активно применяется физическое моделирование и анализ статистических данных результатов опытно-промышленных отливок.

Исходя из поставленных задач и современных методов исследования, протекающих в системе процессов, предлагается использовать метод исследования, совмещающий математическое и физическое моделирование. Блок-схема метода приведена на рисунке 1.11.

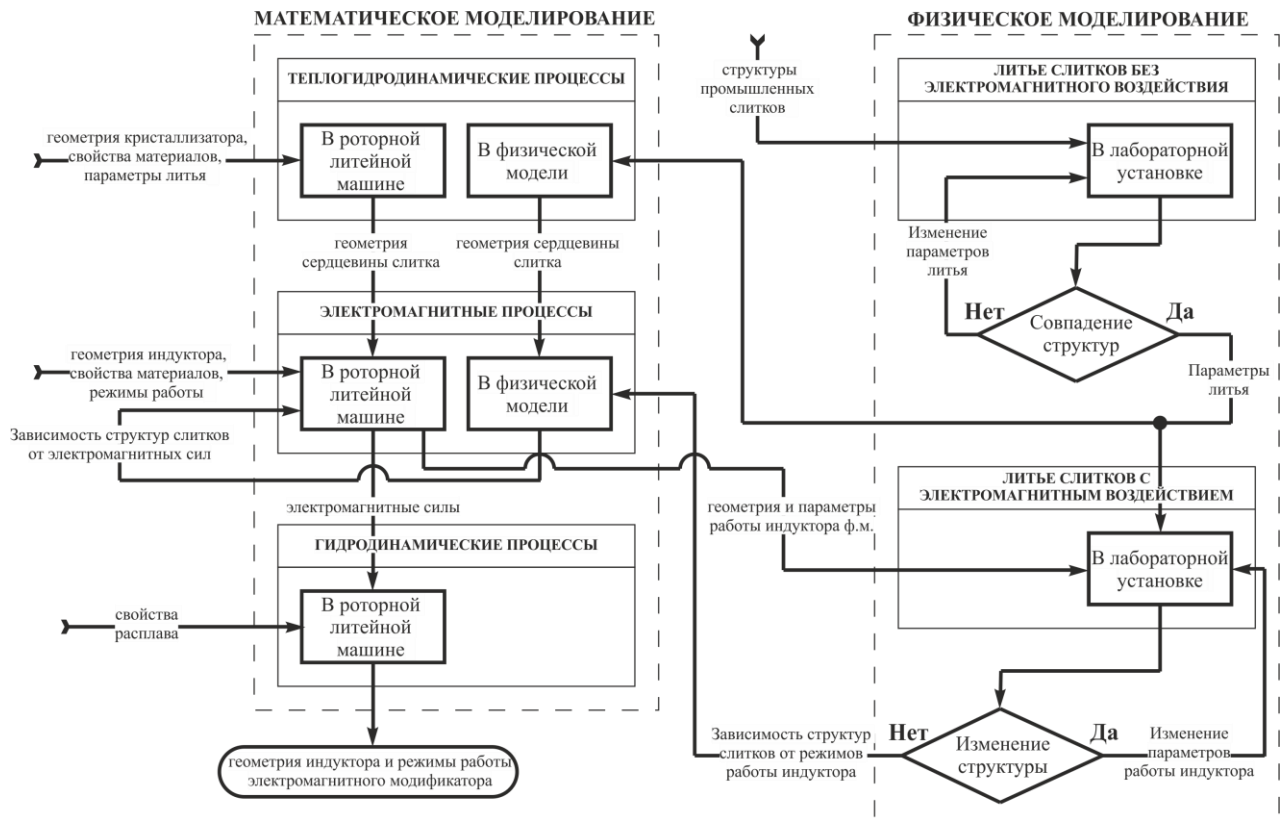


Рисунок 1.11 - Блок-схема методики проведения работ

Оценку электромагнитного воздействия на структуру слитка за счет электромагнитного воздействия будем производить на основании анализа интенсивностей и характеров течений расплава в жидкой фазе слитка. Для получения гидродинамических картин движения расплава в жидкой фазе слитка, кристаллизующегося в роторной литейной машине при электромагнитном воздействии, необходимо произвести расчет сопряженных тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов, для которых необходимо построить математические модели.

На первом этапе, на основании исходных параметров литейной машины и режимов литья, осуществляется моделирование процесса кристаллизации слитка. На основании полученных результатов определяется геометрия жидкой сердцевинки слитка, которая используется при выборе индуктора и построении расчетной области для моделирования электромагнитных процессов на втором этапе расчета. Целью расчета второго этапа является получение значений

электромагнитных сил и их распределение в жидкой фазе слитка. Полученные электромагнитные силы и геометрия жидкой сердцевины слитка используются для решения гидродинамической задачи с целью получения картин течений расплава в жидкой фазе слитка и оценки турбулентности течения по всему ее пространству.

Для построения взаимосвязи структуры слитка от режимов работы индуктора проводится физическое моделирование. Для этого на лабораторной установке, путем подбора, определяются параметры литья, обеспечивающие структуру слитка, аналогичную структурам промышленных слитков. Далее производится литье слитков с электромагнитным воздействием при разных параметрах работы индуктора лабораторной установки. На основании полученных результатов строится зависимость структур слитков от параметров работы индуктора. Определенные параметры работы индуктора используются как исходные данные при математическом моделировании электромагнитных процессов, протекающих в физической модели лабораторной установки с целью получения зависимости структур слитков от величины электромагнитных сил в жидкой фазе слитка. Полученная зависимость используется для анализа полученных результатов в электромагнитном расчете индуктора для роторной литейной машины, с целью определения его режимов работы, обеспечивающих модифицирование структуры.

Для достижения поставленных задач необходимо:

1. Разработать математические модели для расчета тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов в исследуемой системе;
2. Разработать лабораторную установку для физического моделирования процесса литья алюминиевых слитков с электромагнитным воздействием, обеспечивающую получение слитков со структурой аналогичной промышленной;
3. Установить зависимость изменения структуры слитков от параметров электромагнитного воздействия, позволяющую определить режимы работы электромагнитного модификатора на роторной литейной машине;

4. Провести верификацию результатов математического моделирования.

Исходя из обзора и анализа современных программных пакетов для математического моделирования тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов выбор был сделан в пользу программного пакета разработчика *ANSYS Inc*, в состав которого входят программные продукты *Fluent*, *ANSYS Emag* и *CFX*. Программа *Fluent* позволяет произвести расчет тепловых процессов, протекающих в жидкой сердцевине слитка с учетом процесса кристаллизации. *ANSYS Emag* позволяет произвести расчет электромагнитных процессов, протекающих в исследуемой системе.

1.7 Выводы по главе 1

1. На основании проведенного обзора установлена возможность измельчения кристаллической структуры заготовки путем МГД-воздействия, что позволит повысить физико-механические свойства катанки, производимой на литейно-прокатных агрегатах с роторной литейной машиной.

2. Выбран тип МГД-устройства для электромагнитного модификатора – дугообразная линейная индукционная машина, создающая бегущее электромагнитное поле. Определено место установки индуктора на литейной машине: с торцевой стороны колеса кристаллизатора в зоне за прижимным роликом.

3. Для определения размеров и конструкции индуктора, его положения относительно литейной машины, режимов его работы, обеспечивающих модифицирование структуры слитка и получение заготовки высокого качества, необходимо: определить длину жидкой фазы слитка; установить основные зависимости преобразования электрической энергии в системе; установить

зависимости изменения структуры слитков от параметров электромагнитного поля.

4. Предложен метод исследования процесса электромагнитного модифицирования структуры слитка, совмещающий математическое и физическое моделирования, позволяющий: построить взаимосвязь структуры слитка от характеристик воздействующего электромагнитного поля в жидкой фазе слитка; получить дифференциальные и интегральные параметры системы; осуществить разработку электромагнитного модификатора для промышленной литейной машины.

5. При построении расчётной модели исследуемой системы необходимо учитывать экранирующие электромагнитное поле элементов литейной машины и ферромагнитные свойства стальной ленты.

6. Исходя из проведенного обзора методов математического и физического моделирования исследуемых процессов, в работе предлагается: использовать продукты *ANSYS Emag*, *ANSYS CFX* и *ANSYS FLUENT* для проведения математического моделирования; разработать лабораторную установку для физического моделирования методом прямого геометрического подобия с целью получения зависимости структур слитков от параметров электромагнитного поля.

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ МОДИФИЦИРОВАНИИ СЛИТКА В РОТОРНОЙ ЛИТЕЙНОЙ МАШИНЕ

2.1 Математическое моделирование процесса кристаллизации

2.1.1 Описание модели и основные допущения

На первом этапе математического моделирования выполняется расчет процесса кристаллизации расплава в роторной литейной машине с целью определения геометрии жидкой сердцевины непрерывно литого слитка. Принципиальная схема роторной литейной машины с непрерывно литым слитком представлена на рисунке 2.1. Как видно из разреза А-А теплота от жидкой сердцевины слитка 11 передается в радиальном направлении медному бандажу 3 и стальной ленте 4 через закристаллизовавшуюся часть 12 слитка 9 и далее происходит теплообмен элементов кристаллизатора с окружающей средой.

В процессе кристаллизации элементарный объем металла проходит вместе с литейным колесом две зоны охлаждения со своими параметрами (рисунок 2.1). В первой зоне (Z_1) на кристаллизатор не подается охлаждающая вода и отвод тепла из системы предельно мал. Во второй же зоне (Z_2) на кристаллизатор со всех сторон подается вода, что способствует интенсивному отводу тепла из системы.

Расплав, поступив в кристаллизатор, находится в состоянии покоя относительно вращающегося литейного колеса кристаллизатора, что позволяет сделать вывод о преобладании тепловых потоков радиальной направленности относительно колеса кристаллизатора. Известно, что в непрерывном слитке, находящемся в литейной машине, теплота передается трансляцией

(перемещением) и теплопроводностью. В работе [69] была рассмотрена литейная машина для литья алюминиевой ленты сечением 15 x 210 мм, для которой было получено, что в зависимости от скорости литья теплота, передаваемая трансляцией, от 56 до 566 раз больше теплоты, передаваемой теплопроводностью. Исходя из этого можно сделать допущение и пренебречь теплотой, передаваемой теплопроводностью вдоль слитка и кристаллизатора, и в дальнейшем рассматривать задачу в двумерной постановке.

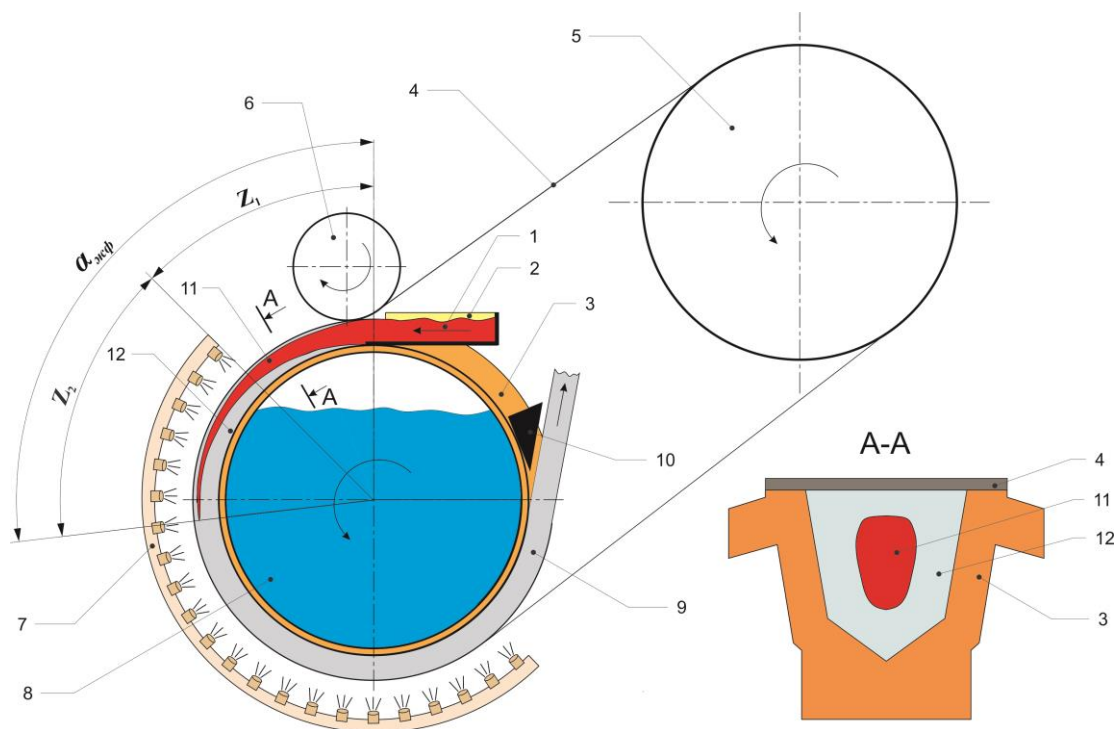


Рисунок 2.1 - Эскиз роторной литейной машины с непрерывно литым слитком

На рисунке 2.2 представлена геометрия расчетной модели с указанием областей и границ расчётной модели. Модель состоит из следующих областей: T1 – область жидкого металла; T2 – область медного бандажа литейного колеса; T2.1 – тонкая область части медного бандажа литейного колеса, граничащего с кристаллизующимся металлом; T3 – область бесконечной стальной ленты кристаллизатора; T3.1 – тонкая область части бесконечной стальной ленты

кристаллизатора, граничащего с кристаллизующимся металлом; Г4 – область части стальных торцевых элементов литейного колеса.

Области Т2.1 и Т3.1 предназначены для учета не идеальности механического контакта между кристаллизующимся слитком, бесконечной лентой и медным бандажом, вызванной механическими перемещениями, наличием смазки и температурной усадкой слитка. Толщина газового зазора неодинакова по поверхности слитка и изменяется со временем. Она зависит от множества факторов: жесткости и упругости материалов, конфигурации и размеров, теплофизических условий и т. п.

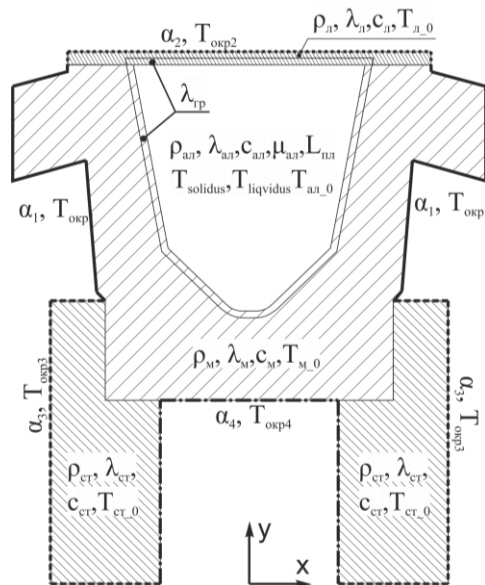


Рисунок 2.2 - Геометрия, области и границы модели процесса кристаллизации слитка в роторной литейной машине

На основании параметров литья действующей литейной машины в математической модели были определены четыре границы отвода теплоты от моделируемой системы: Г1 – граница отвода теплоты от медного бандажа в окружающую среду; Г2 – граница отвода теплоты от бесконечной стальной ленты в окружающую среду; Г3 – граница отвода теплоты от торцевых стальных дисков

литейного колеса; Γ_4 – граница отвода теплоты от дна медного бандажа и внутренних поверхностей торцевых дисков литейного колеса.

Для определения необходимости учета ряда физических процессов протекающих в моделируемой системе, были проведены предварительные расчеты характерных чисел критериев подобия.

Необходимость расчета гидродинамических течений в жидкой фазе слитка, вызванных разностью плотностей расплава от температуры, оценивалось по числу Рэлея, характеризующему отношение подъемных сил к вязким [24]:

$$Ra = \frac{gl^3\beta\Delta T}{\mu a}, \quad (2.1)$$

где g – ускорение свободного падения, $\text{м}^2/\text{с}$;

l – характерный размер, м ;

β – коэффициент линейного теплового расширения, $1/\text{К}$;

ΔT – разность температур в жидкой фазе слитка, К ;

μ – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$;

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

В начале кристаллизации число Рэлея имеет значение порядка 1200, в конце кристаллизации – порядка 120. На начальном этапе кристаллизации полученные величины попадают в диапазон переходных значений (1100 – 1700), поэтому при решении задачи кристаллизации слитка необходимо было учитывать свободно конвективные течения, образованные разностью плотностей расплава.

Необходимость учета турбулентности при моделировании течений в жидкой фазе слитка можно оценить по числу Рейнольдса [30]:

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta}, \quad (2.2)$$

где ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;

v – скорость потока расплава, $\text{м}/\text{с}$;

η – динамическая вязкость, $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$.

В начале кристаллизации число Рейнольдса имеет значение около 50, в конце кристаллизации число равно приблизительно 100. Полученные величины более чем на два порядка меньше диапазона значений числа Рейнольдса 2300 – 10000, относящихся к переходному режиму течения, т. е. к неустойчивой турбулентности. Поэтому в математической модели процесса кристаллизации нет необходимости использовать модель турбулентности.

Основными уравнениями, описывающими термогидродинамические процессы при кристаллизации слитка, являются уравнения сохранения массы (2.3), движения (2.4) и энергии (2.5) [47, 83]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = s_\rho; \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + (\rho \mathbf{v} \cdot \nabla) \times \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{s}_v; \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + s_h; \quad (2.5)$$

где p – давление, Па;

\mathbf{v} – вектор скорости, м/с;

\mathbf{g} – вектор ускорения свободного падения, м/с²;

$\bar{\tau}$ – тензор вязких напряжений, кг/(м·с²);

h – энтальпия, Дж/кг;

T – температура, К;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

s_ρ – источниковый член уравнения сохранения массы, кг/(м³·с);

\mathbf{s}_v – векторный источниковый член уравнения сохранения движения, Н/м³;

s_h – источниковый член уравнения сохранения энергии, Вт/м³.

Тензор вязких напряжений $\bar{\tau}$ определяются как:

$$\bar{\tau} = \mu_m \left[(\nabla \times \mathbf{v} + (\nabla \times \mathbf{v})^T) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \nabla \cdot \mathbf{v} \right], \quad (2.6)$$

где μ_m – молекулярная вязкость, м²/с;

δ_{ij} – символ Кронекера.

Для учета свободноконвективных движений и соблюдения закона сохранения массы в системе используется приближение Буссинеска – Обербека [46]. В данном приближении зависимость плотности от температуры линеаризуется и учитывается лишь при массовых силах:

$$\rho(T) = \rho_0(1 - k_\beta(T - T_0)), \quad (2.7)$$

где T_0 – реперная температура, К;

ρ_0 – плотность жидкости при температуре T_0 , кг/м³;

k_β – коэффициент линейного расширения, 1/К;

T – температура, К.

Для моделирования процессов кристаллизации и плавления был использован метод «энтальпия – пористость» [117, 118, 115]. В этом случае энтальпия определяется следующим образом:

$$H = h + \beta L, \quad (2.8)$$

где β – доля жидкой фазы;

L – скрытая теплота материала, Дж/кг.

Доля жидкой фазы определяется следующим образом:

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_{\text{солидус}} \\ 1, & T > T_{\text{ликвидус}} \\ \frac{T - T_{\text{солидус}}}{T_{\text{солидус}} - T_{\text{ликвидус}}}, & T_{\text{солидус}} \leq T \leq T_{\text{ликвидус}} \end{cases}, \quad (2.9)$$

где $T_{\text{солидус}}$ – температура солидус, К;

$T_{\text{ликвидус}}$ – температура ликвидус, К.

Влияние кристаллизации на течение расплава в жидкой фазе осуществляется введением дополнительного источникового члена в уравнение движения:

$$\mathbf{s} = \frac{(1-\beta)}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{\text{mush}} \mathbf{v}, \quad (2.10)$$

где A_{mush} – постоянная скорости фазного перехода, кг/(м³·с);

ε – маленькое число (0,001), предотвращающее деление на ноль.

Расчетная область представляет собой изолированный объем и взаимодействует с окружающей средой по закону Ньютона – Рихмана, поэтому в модели источник членов массы, движения и энергии равны нулю ($s_p=0$, $s_v=0$, $s_h=0$).

С учетом вышесказанного система уравнений (2.3–2.5) с учетом процесса кристаллизации примет вид:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0; \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial(\rho_0 \mathbf{v})}{\partial t} + (\rho_0 \mathbf{v} \cdot \nabla) \times \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + \rho(T) \mathbf{g} + \frac{(1-\beta)}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} \mathbf{v}; \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial(\rho_0 H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 \mathbf{v} H) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T). \quad (2.13)$$

Система уравнений (2.11–2.13) дополняется граничными условиями.

Для давления выполняется условие Дирихле:

$$p = 0. \quad (2.14)$$

Для границ, соответствующих стенкам жидкого объема, выполняется условие прилипания:

$$\mathbf{v} = 0. \quad (2.15)$$

Граничные условия теплообмена стенок модели с окружающей средой происходят по закону Ньютона – Рихмана:

$$-\lambda |\nabla T| = \alpha (T - T_{окр}), \quad (2.16)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

$T_{окр}$ – температура окружающей среды, К.

Для расчета кристаллизации слитка в роторной литейной машине исходными данными служат плотность, теплоемкость, теплопроводность для всех элементов системы, вязкость, коэффициент объемного расширения, скрытая теплота плавления, температуры фазового перехода, коэффициенты теплоотдачи и значения температуры окружающей среды.

В качестве начальных условий задаются значения температур T_{i0} в соответствующих областях. Также во всем объеме задаются начальные компоненты скорости v_{x0} , v_{y0} , равные нулю.

Таким образом, для решения термогидродинамической задачи процесса кристаллизации, были приняты следующие допущения:

- теплота слитка и кристаллизатора отводится только в радиальном направлении относительно литейного колеса (не учитывается теплота, отводимая от слитка теплопроводностью);
- не учитываются течения расплава, вызываемые вращением литейного колеса;
- не учитываются изменения геометрии системы, вызванные температурными расширениями системы;
- отвод тепла от системы задается через коэффициент теплоотдачи и температуру внешней среды;
- не учитываются несущественные элементы кристаллизатора, такие как болтовые соединения, а также различные фаски;
- учет газового зазора между кристаллизатором и слитком задается путем изменения физических свойств тонкого граничного слоя между слитком и кристаллизатором. Толщина тонкого слоя была принята равной 0,1 мм;
- при начальных условиях принята однородная температура для каждой из областей.

Построение геометрической и сеточной моделей производится в *ANSYS Workbench*, решение системы дифференциальных уравнений в частных производных в расчётной области производится в *ANSYS Fluent*, используя метод конечных объемов [48], анализ термогидродинамических процессов проводится в *ANSYS CFD-Post*.

Элементы расчетной сетки во всех областях структурированы и имеют форму четырехугольников (рисунок 2.3).

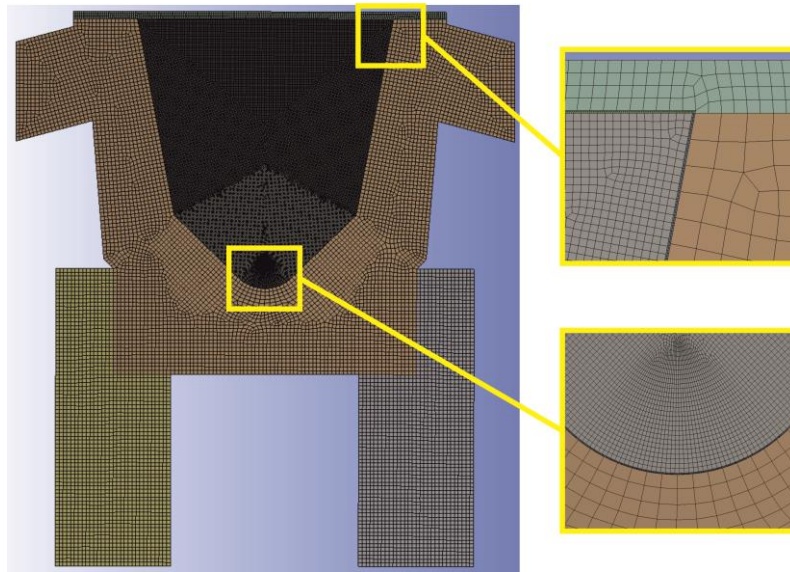


Рисунок 2.3 - Расчетная сетка модели кристаллизации слитка в роторной литейной машине

Решается переходная задача, шаг по времени выбирался из заданного диапазона на каждой итерации расчета исходя из графика сходимости. Диапазон шага по времени имел значения от 0,0001 с. до 0,01 с.

Математическая модель позволяет определять геометрические размеры жидкой сердцевины слитка и распределение температуры в элементах кристаллизатора и слитке. Модель позволяет исследовать геометрию жидкой сердцевины слитка следующих исходных параметров литья: скорости литья, первоначальных температур кристаллизатора и поступающего расплава, интенсивности и графика охлаждения.

2.1.2 Расчетная модель. Геометрия, размеры и свойства материалов

Геометрия исследуемой системы, представляющая собой поперечное сечение кристаллизатора роторной литейной машины, приведена в таблице 2.1.

Исходные данные для построения геометрии и задания технологических режимов литья были взяты для роторной литейной машины агрегата ЛПА-АК-5 производства ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ», установленного на Иркутском алюминиевом заводе [45]. Теплофизические свойства материалов взяты из [29, 87, 67, 74, 12] и приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.1 - Геометрия и параметры расчетной модели

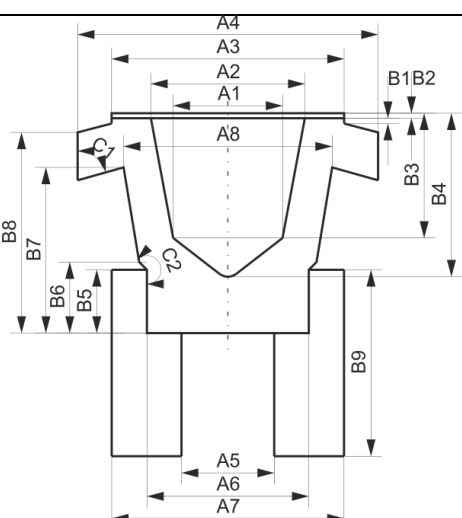
Геометрия	Параметр	Значение	Параметр	Значение
	A1	47,5 мм	B3	51 мм
	A2	66,5 мм	B4	70 мм
	A3	100 мм	B5	27,5 мм
	A4	130 мм	B6	30,5 мм
	A5	40 мм	B7	71,5 мм
	A6	70 мм	B8	92,5 мм
	A7	100 мм	B9	80 мм
	A8	90 мм	C1	75 град.
	B1	2 мм	C2	225 град.
	B2	2 мм		

Таблица 2.2 - Физические свойства материалов

Наименование	Значение
Площадь поперечного сечения слитка ($S_{\text{слитка}}$)	3200 мм ²
Площадь поперечного сечения бандажа ($S_{\text{бандаж}}$)	1500 мм ²
Коэффициент теплоотдачи с области Г2 «стальная лента – окружающий воздух» (α_{1_0})	20 Вт/(м·К)
Коэффициент теплоотдачи с области Г1 «медный бандаж – окружающий воздух» и Г3 «торцевые диски – окружающий воздух» (α_{2_0})	20 Вт/(м·К)
Коэффициент теплоотдачи с области Г4 «медный бандаж – охлаждающая жидкость» и «торцевые диски – охлаждающая жидкость» (α_3)	500 Вт/(м·К)
Коэффициент теплоотдачи с области Г2 «стальная лента – охлаждающая жидкость» (α_{1_1})	500 Вт/(м·К)
Коэффициент теплоотдачи с области Г1 «медный бандаж – охлаждающая жидкость» и Г3 «торцевые диски – охлаждающая жидкость»	500 Вт/(м·К)

жидкость» (α_{2-1})	
Температура окружающей среды ($T_{ср}$)	293 К
Температура охлаждающей жидкости ($T_{охл}$)	288 К
Первоначальная температура слитка ($T_{слитка\ 0}$)	973 К
Первоначальная температура бандажа ($T_{бандаж\ 0}$)	423 К
Первоначальная температура бесконечной ленты ($T_{лента\ 0}$)	423 К
Температура солидус материала слитка ($T_{solidus}$)	931К
Температура ликвидус материала слитка ($T_{liquidus}$)	933 К
Удельная теплота плавления материала слитка ($L_{слитка}$)	390 000 Дж/кг
Плотность материала слитка ($\rho_{слитка}$)	2500 кг/м ³
Плотность материала бандажа ($\rho_{бандаж}$)	8 978 кг/м ³
Коэффициент теплопроводности материала бандажа ($\lambda_{бандаж}$)	387 Вт/(м·К)
Удельная теплоемкость материала бандажа ($c_{бандаж}$)	381 Дж/(кг·К)
Плотность материала бесконечной ленты ($\rho_{лента}$)	7900 кг/м ³
Коэффициент теплопроводности материала бесконечной ленты ($\lambda_{лента}$)	80 Вт/(м·К)
Удельная теплоемкость материала бесконечной ленты ($c_{лента}$)	460 Дж/(кг·К)
Плотность материала торцевых дисков колеса ($\rho_{диск}$)	7900 кг/м ³
Коэффициент теплопроводности материала торцевых дисков колеса ($\lambda_{диск}$)	80 Вт/(м·К)
Удельная теплоемкость материала торцевых дисков колеса ($c_{диск}$)	460 Дж/(кг·К)

Коэффициенты теплоотдачи приняты исходя из значений, представленных в работах [104, 105, 103] и рассчитанных по формулам, приведенным в [32]. В качестве кристаллизующегося расплава используются свойства сплава А5Е [11]. В процессе расчета сплав находится в двух фазовых состояниях и его физические свойства сильно зависят от температуры. В связи с этим свойства сплава были заданы в зависимости от температуры (таблица 2.3).

Таблица 2.3 - Физические свойства сплава в зависимости от температуры

Температура, К	300	500	700	931	933	1200
Коэффициент теплопроводности материала слитка, Вт/(м·К)	207	222	251	282	61	62
Теплоемкость материала слитка, Дж/(кг·К)	871	999	1079	1145	1086	1086

2.1.3 Результаты моделирования и их анализ

В результате решения нестационарной термогидродинамической задачи были получены картины распределения теплового поля и фазового состояния металла при базовых параметрах литья для разных моментов времени. Примеры состояния системы представлены на рисунках 2.4 – 2.5.

Результаты расчета показали, что полная кристаллизация расплава, поступившего в кристаллизатор при базовых параметрах литья, происходит достаточно быстро: менее чем за 10 с. В начале процесса, за счет высокого градиента температур между расплавом и кристаллизатором, скорость кристаллизации существенно выше, чем в конце. Как видно из рисунков, даже к концу процесса в медном бандаже наблюдается существенный градиент температур (порядка 200 – 250 К), из чего можно сделать вывод о преобладании процесса аккумуляции теплоты расплава медным бандажом кристаллизатора над процессом теплопередачи теплоты в окружающую среду.

В отличие от медного бандажа стальная лента хотя и обладает существенно меньшей теплопроводностью, но за счет малой толщины быстро аккумулирует тепло и прогревается до температуры слитка. Из-за этого в зоне слитка, прилегающего к стальной ленте, в начале литья образуется твердая фаза толщиной 3 – 4 мм и существует на всем протяжении процесса. По технологии начиная с угла 45 град. относительно вертикальной оси кристаллизатора начинается подача воды на стальную ленту (в модели это соответствует времени расчета, равному 5,83 с). За счет охлаждения ленты происходит рост толщины корки со стороны стальной ленты до 10 мм. Очевидно, что изменение времени начала охлаждения стальной ленты не окажет существенного влияния на общую динамику процесса кристаллизации.

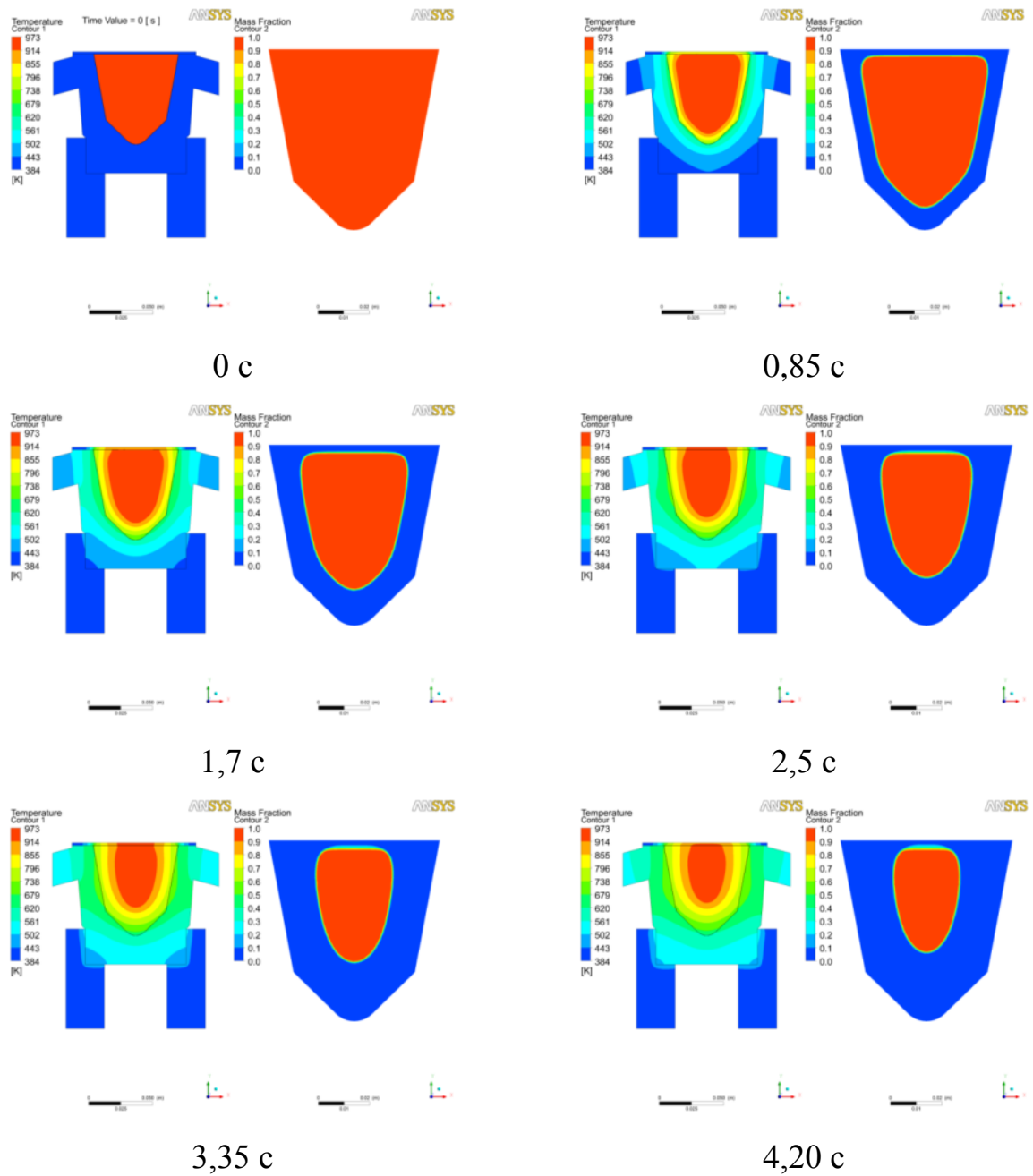


Рисунок 2.4 - Распределение температурного поля и фазового состояния металла для времени расчета от 0 до 4,2 с

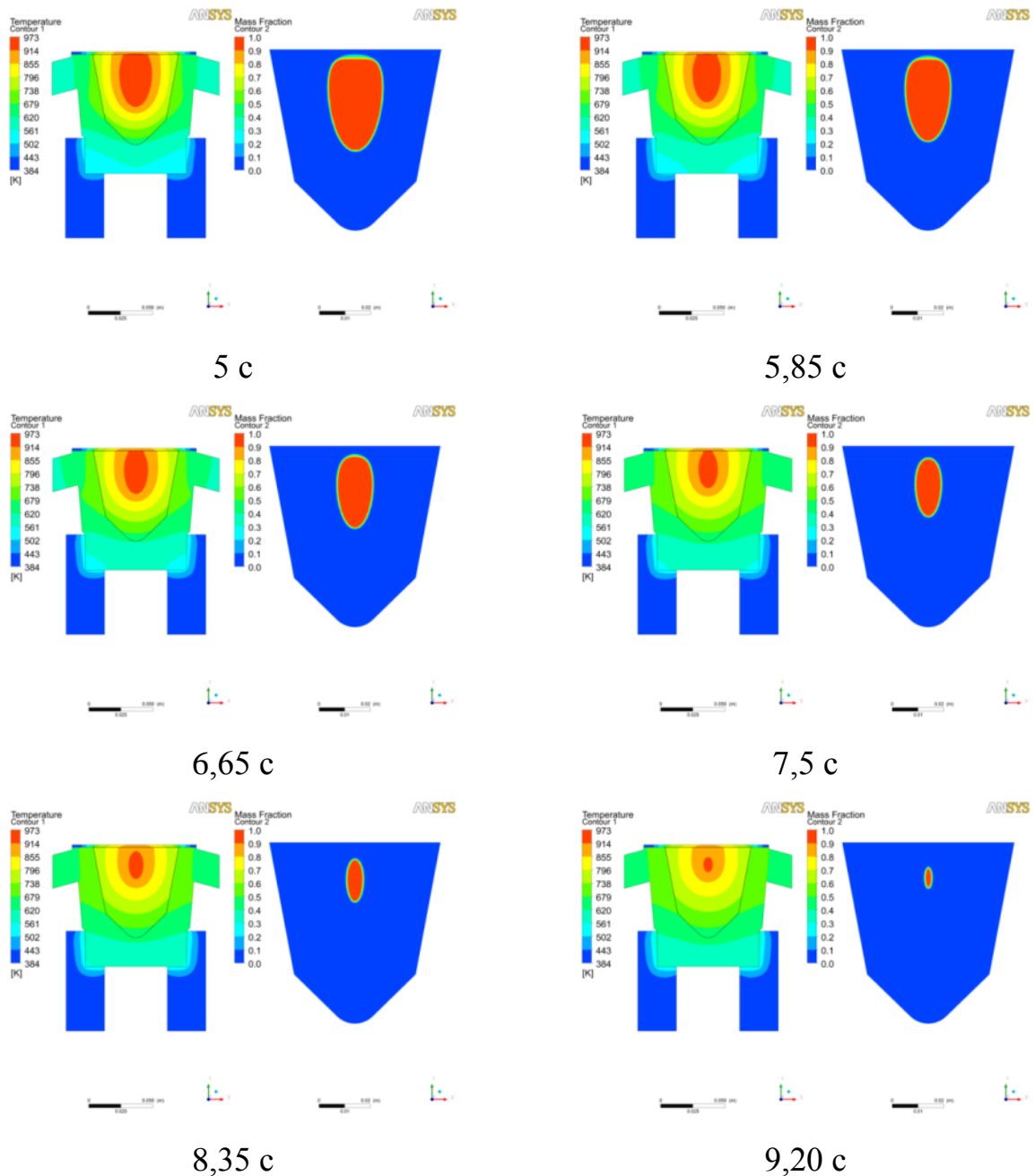


Рисунок 2.5 - Распределение температурного поля и фазового состояния металла для времени расчета от 5 с до 9,2 с

Для количественной оценки влияния параметров литья на длину жидкой фазы слитка были построены зависимости доли жидкой фазы и средней температуры слитка. Зависимости были построены для состояния системы для времени расчета 3,75 с.

На рисунке 2.6 приведены зависимости доли жидкой фазы в слитке (а) и средней температуры слитка (б) от начальной температуры кристаллизатора и

расплава. Данные технологические параметры литья прямо пропорционально влияют на объем закристаллизовавшегося расплава. При увеличении начальной температуры кристаллизатора на 100 °С объем закристаллизовавшегося расплава снижается на 8,5 %.

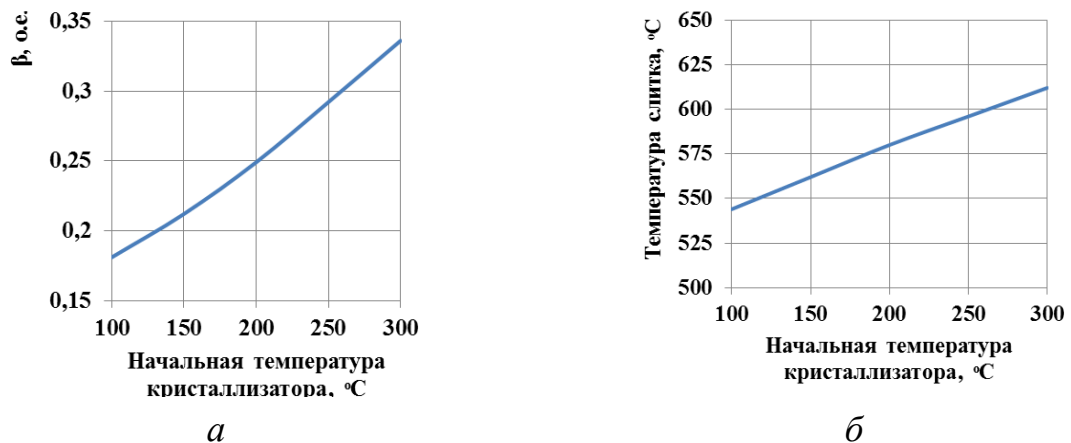


Рисунок 2.6 - Зависимости доли жидкой фазы в слитке (а) и средней температуры слитка (б) от начальной температуры кристаллизатора

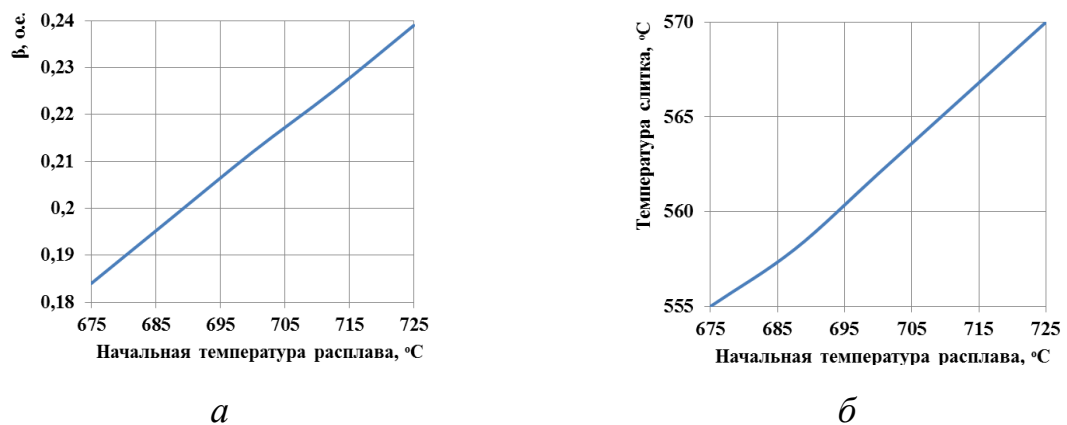


Рисунок 2.7 - Зависимости доли жидкой фазы в слитке (а) и средней температуры слитка (б) от начальной температуры расплава

Перегрев расплава (рисунок 2.7) существенно не влияет на длину жидкой фазы: увеличение температуры на каждые 10 °С приводит к снижению объема закристаллизовавшегося расплава менее чем на 1,5 %.

За счет использования в модели тонкого слоя осуществлялось моделирование газового зазора между слитком и кристаллизатором. На рисунке 2.8 приведены зависимости доли жидкой фазы в слитке (*a*) и средней температуры слитка (*б*) от коэффициента теплопроводности тонкого слоя.

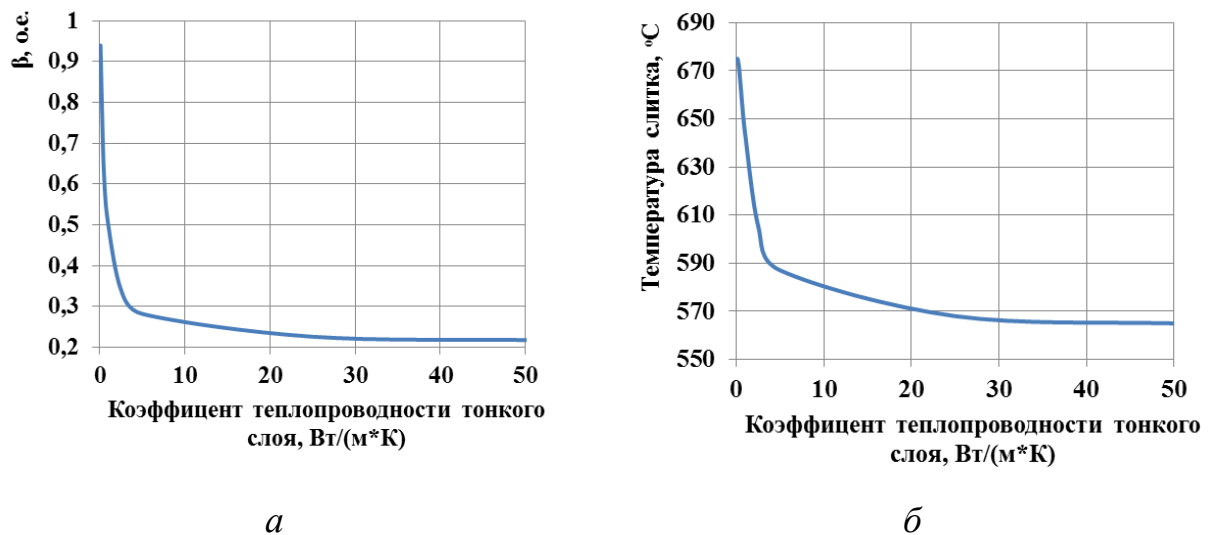


Рисунок 2.8 - Зависимости доли жидкой фазы в слитке (*a*) и средней температуры слитка (*б*) от коэффициента теплопроводности тонкого слоя

Толщина газового зазора неодинакова по поверхности слитка и изменяется со временем. Она зависит от множества факторов: жесткости и упругости материалов, конфигурации и размеров, теплофизических условий и т. п. Из-за этого определение значений газового зазора трудно поддается расчету. Как правило, толщина газового зазора составляет не более 10 мкм [75]. Принимая допущение, что газовый зазор состоит из воздуха с температурой 600 °С (коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{возд}_600} = 0,469$ Вт/(м·К) [20], было определено термическое сопротивление зазора по формуле:

$$R_t = \frac{\delta}{\lambda}. \quad (2.17)$$

Для данного зазора термическое сопротивление равно $0,021 \cdot 10^{-3}$ м·К/Вт. В математической модели заданный тонкий слой будет иметь аналогичное

термическое сопротивление при коэффициенте теплопроводности равном 4,7 Вт/(м·К). Как видно из графиков, представленных на рисунке 2.8, полученное значение коэффициента теплопроводности лежит в области, незначительно влияющей на динамику процесса кристаллизации.

На рисунке 2.9 приведены зависимости доли жидкой фазы в слитке (*а*) и средней температуры слитка (*б*) от коэффициента теплоотдачи с окружающей средой для времени расчёта 3,75 с. До указанного времени расчета кристаллизатор находится в условиях естественного конвективного теплообмена с окружающей средой. Как видно из зависимостей, изменение коэффициента конвективного теплообмена, в диапазоне рекомендуемых значений для естественной конвекции [20], практически не влияет на процесс кристаллизации. На данном участке процесс кристаллизации происходит за счет аккумуляции тепла кристаллизатором.

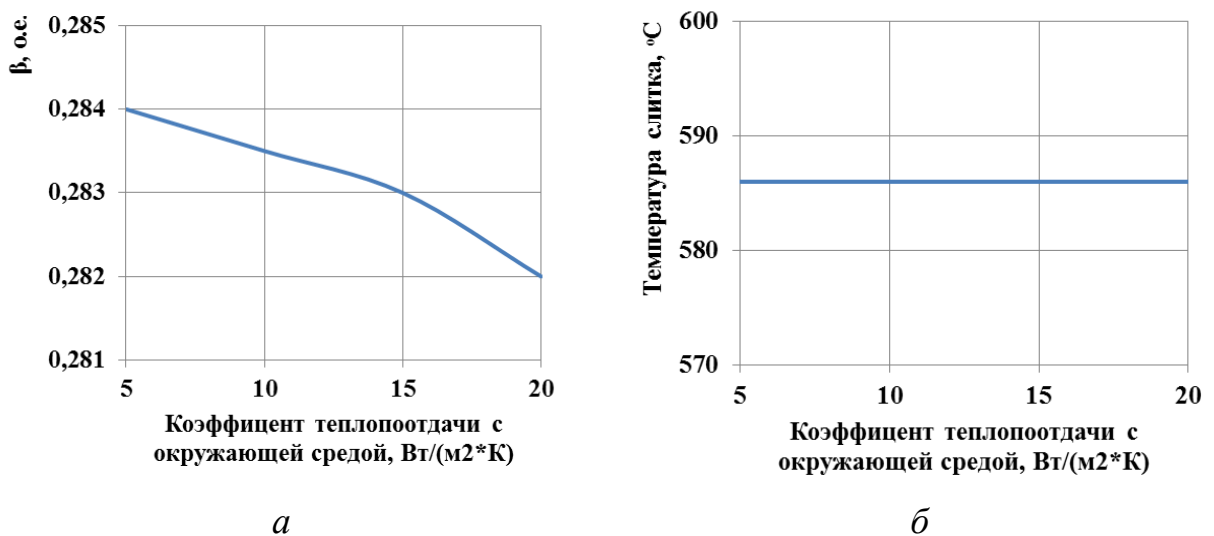


Рисунок 2.9 - Зависимости доли жидкой фазы в слитке (*а*) и средней температуры слитка (*б*) от коэффициента теплопроводности тонкого слоя.

По технологии с 3,75 с начинается внешнее охлаждение кристаллизатора водой через оросители. В модели это учитывается путем увеличения

коэффициента теплоотдачи с окружающей средой до $2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Полученные зависимости для времени расчета 9 с представлены на рисунке 2.10.

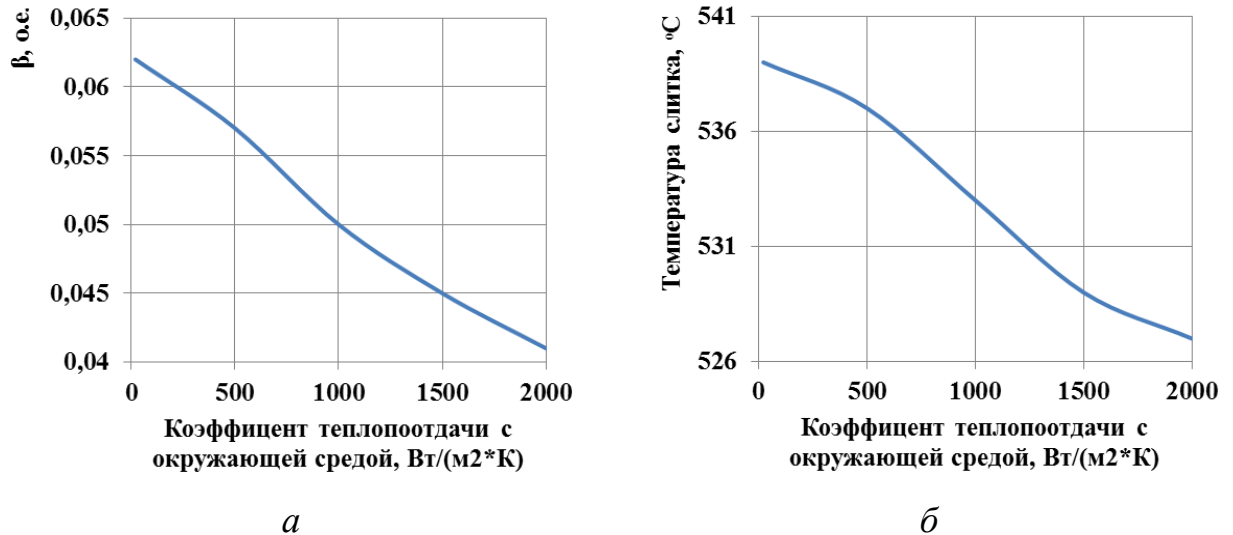


Рисунок 2.10 - Зависимости доли жидкой фазы в слитке (*а*) и средней температуры слитка (*б*) от коэффициента теплоотдачи с окружающей средой для времени расчета 9 с

К данному моменту времени происходит прогрев кристаллизатора и снижение градиента температуры внутри системы, что уже приводит к влиянию на среднюю температуру слитка. При этом объем жидкой фазы изменяется незначительно. Из этого можно сделать вывод о слабом влиянии теплообмена системы с окружающей средой на длину жидкой фазы. Таким образом, интенсивность внешнего охлаждения кристаллизатора в основном влияет на температуру слитка, выходящего из кристаллизатора.

Для базовых параметров литья была получена зависимость доли жидкой фазы в поперечном сечении слитка для разных моментов времени после поступления расплава в кристаллизатор (рисунок 2.11, *а*). На основании полученных координат границы раздела фаз и пройденного расстояния были построены трехмерные модели геометрии жидкой сердцевины слитка, примеры которых представлены на рисунке 2.11, *б*.

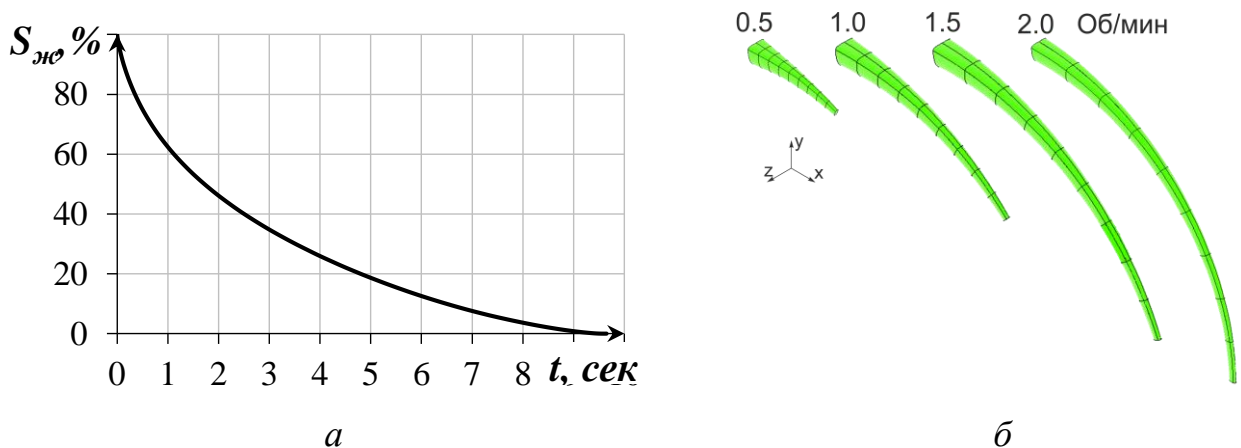


Рисунок 2.11 - Доля жидкой фазы в поперечном сечении слитка для разных моментов времени после поступления расплава в кристаллизатор (а) и геометрия жидкой сердцевинки слитка при разных скоростях литья (б)

На протяжённость жидкой фазы оказывают существенное влияние температуры кристаллизатора и расплава. Теплообмен с окружающей средой в начале кристаллизации не оказывает влияния на процесс и проявляется только после прогрева медного банджа. Путем обработки полученных характеристик была построена эмпирическая зависимость протяженности жидкой фазы слитка (в градусах) по литейному колесу:

$$\Phi_{\text{жф}} = \frac{(k_1 T_{\text{кр}} T_p - k_2 T_{\text{кр}} + k_3 T_p - k_4) n_{\text{кр}}}{\pi D_{\text{сл}}}, \quad (2.18)$$

где $T_{\text{кр}}$ – температура кристаллизатора, °С;

T_p – температура расплава, °С;

$n_{\text{кр}}$ – скорость вращения литейного колеса, об/мин;

$D_{\text{сл}}$ – средний диаметр намотки слитка, м;

$k_1=0,0049$ – первый коэффициент уравнения, градус·мин·м/°С²;

$k_2=2,475$ – второй коэффициент уравнения, градус·мин·м/°С;

$k_3=0,601$ – третий коэффициент уравнения, градус·мин·м/°С;

$k_4=303,426$ – четвертый коэффициенты уравнения, градус·мин·м.

Для стандартной скорости литья равной 2 об/мин, длина жидкой сердцевины слитка составила около 1500 мм (сектор равный 110 градусам).

2.2 Математическое моделирование электромагнитных процессов

2.2.1 Описание модели и основные допущения

На втором этапе математического моделирования выполняется расчет электромагнитных процессов, протекающих в слитке, кристаллизаторе и в индукторе электромагнитного модификатора. Целью расчета является определение распределения векторов электромагнитных сил в жидкой фазе слитка и исследование влияния электромагнитного поля на непрерывно литой слиток и элементы роторной литейной машины.

Принципиальная схема роторной литейной машины с непрерывно литым слитком и установленным индуктором электромагнитного модификатора представлена на рисунке 2.12. Индуктор 13 расположен с торцевой стороны литейного колеса 3 в зоне после прижимного ролика 6, обращенный активной частью к стальной ленте 4. Длина индуктора определяется углом развертки $\alpha_{\text{инд}}$ относительно оси вращения литейного колеса. Положение индуктора относительно литейной машины определяется углом отступа $\alpha_{\text{отс}}$, определяемым как угол между плоскостями подачи расплава в кристаллизатор и началом индуктора.

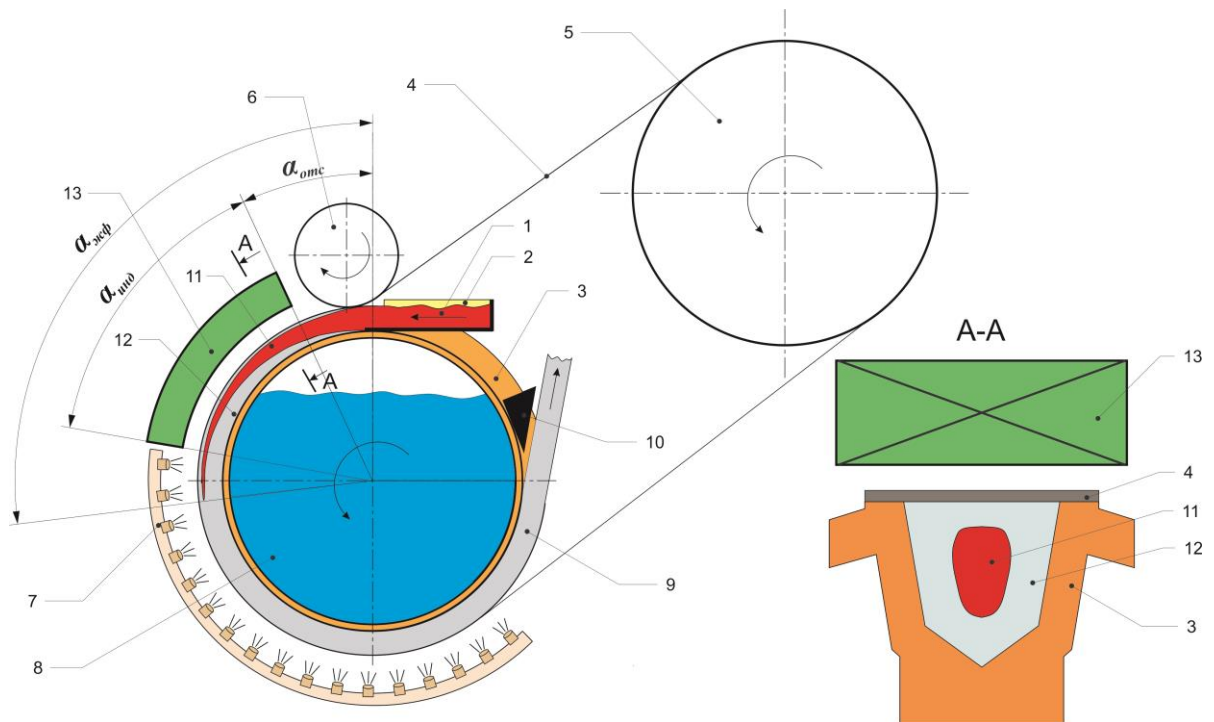


Рисунок 2.12 - Схема роторной литейной машины с индуктором электромагнитного модификатора

В электромагнитном расчете используется геометрия жидкой сердцевины непрерывно литого слитка, полученная в результате расчета процесса кристаллизации. Так как расчет процесса кристаллизации выполнен в двухмерной постановке, то для построения трехмерной геометрии жидкой сердцевины слитка разработан алгоритм обработки результатов расчета, передачи данных и построения трехмерной модели жидкой сердцевины слитка (рисунок 2.13).

Алгоритм состоит из двух этапов. На первом этапе производится обработка расчетных данных в программе *CFD POST*, используя внутренние языки программирования *CCL* и *CEL*. Для этого исходя из параметров литья и необходимого числа элементов секций трехмерной модели сердцевины слитка производится определение временного шага по которому выбираются результаты расчета. Далее производится цикл записи четырех размеров (M1-M4) в массив данных внешнего файла «*export.csv*» для каждого времени расчета, характеризующих геометрию поперечного сечения слитка. На втором этапе массив данных передается *ANSYS Emag* и с помощью подпрограммы, написанной

на языке *APDL*, производится построение трехмерной геометрии жидкой сердцевинки слитка. Производится построение контуров поперечного сечения слитка с последующим их соединением дугообразными линиями. Далее расчётная модель строится путем выполнения стандартных операций языка *APDL*.

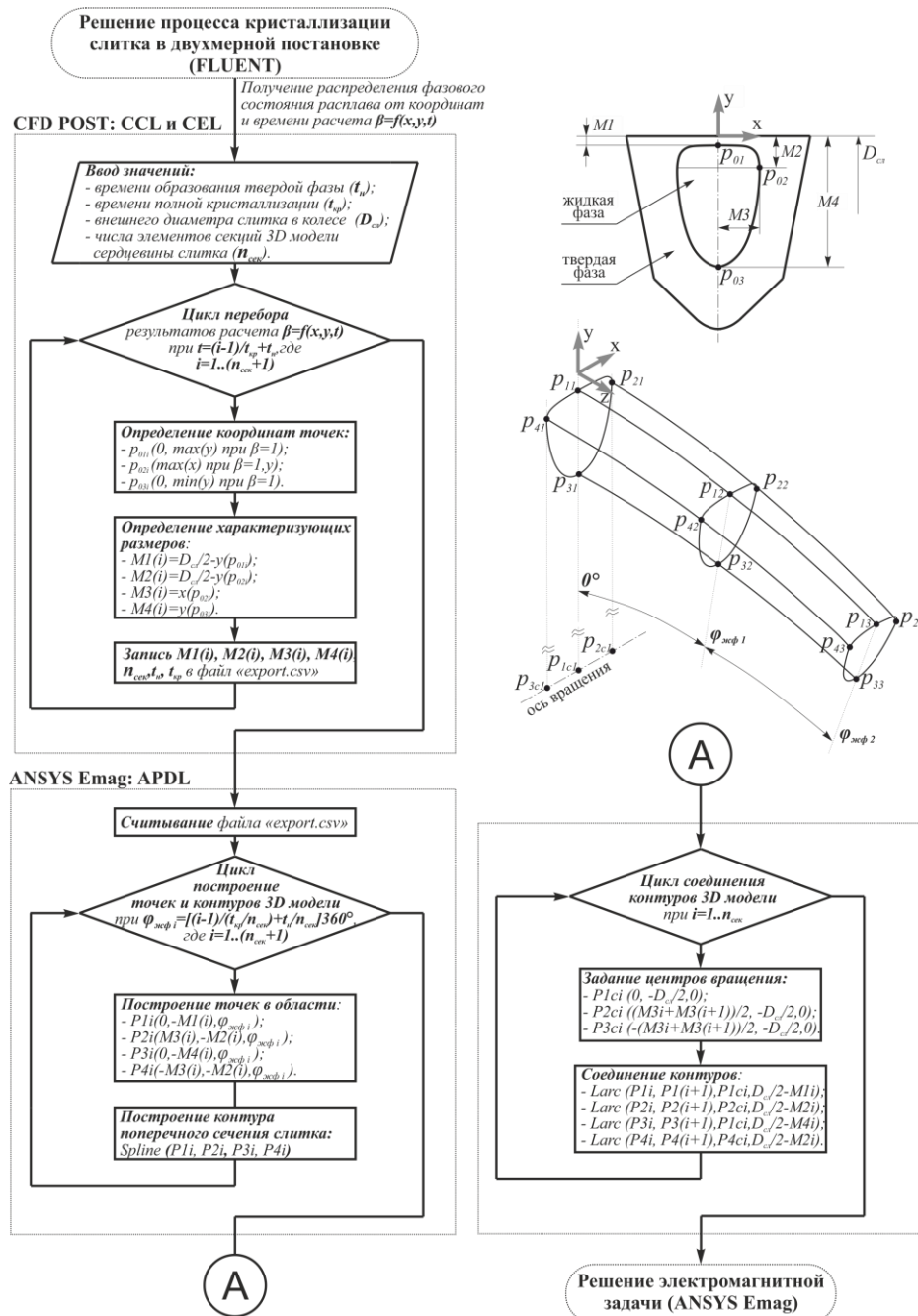


Рисунок 2.13 - Алгоритм передачи данных и построения трехмерной модели жидкой сердцевинки слитка

Для индуктора электромагнитного модификатора была выбрана конструкция, состоящая из разомкнутого дугообразного магнитопровода с укладкой обмотки в пазы магнитопровода и намоткой катушек обмотки через ярмо. Выбор данной конструкции индуктора исходил из задачи обеспечения максимальной токовой нагрузки в ограниченном объеме. Дугообразная форма магнитопровода обеспечивает равный немагнитный зазор на всем протяжении индуктора.

По причине того, что рассматриваемая система имеет сложную геометрию и с целью получения достоверных результатов, моделирование электромагнитных процессов осуществлялось в трехмерной постановке. На рисунке 2.14 представлена геометрия расчетной модели.

Модель состоит из жидкой фазы (рисунок 2.14, *а*) расположенной внутри твердой фазы (рисунок 2.14, *б*), которая в свою очередь расположена в торцевой полости медного бандажа кристаллизатора (рисунок 2.14, *в*) и накрытая стальная лента (рисунок 2.14, *г*). Поверх кристаллизатора расположен сердечник магнитопровода (рисунок 2.14, *д*) с прижимными и торцевыми пластинами (рисунок 2.14, *е*). На сердечнике установлены катушки обмотки индуктора (рисунок 2.14, *ж*). В связи с большими размерами кристаллизатора в электромагнитной задаче моделировалась только четверть кристаллизатора. Для проведения ряда исследований использовались математические модели с упрощенной геометрией, не учитывающей кривизну индуктора и литейной машины, что допустимо, так как радиус кривизны достаточно велик. Также не учитываются стягивающие магнитопровод листы и торцевые пластины.

Индуктор электромагнитного модификатора создает бегущее электромагнитное поле, воздействующее на движущуюся электропроводную среду: литейную машину и слиток. В связи с этим необходимо было произвести оценку необходимости учета в математической модели влияния поля скоростей на работу электромагнитного модификатора.

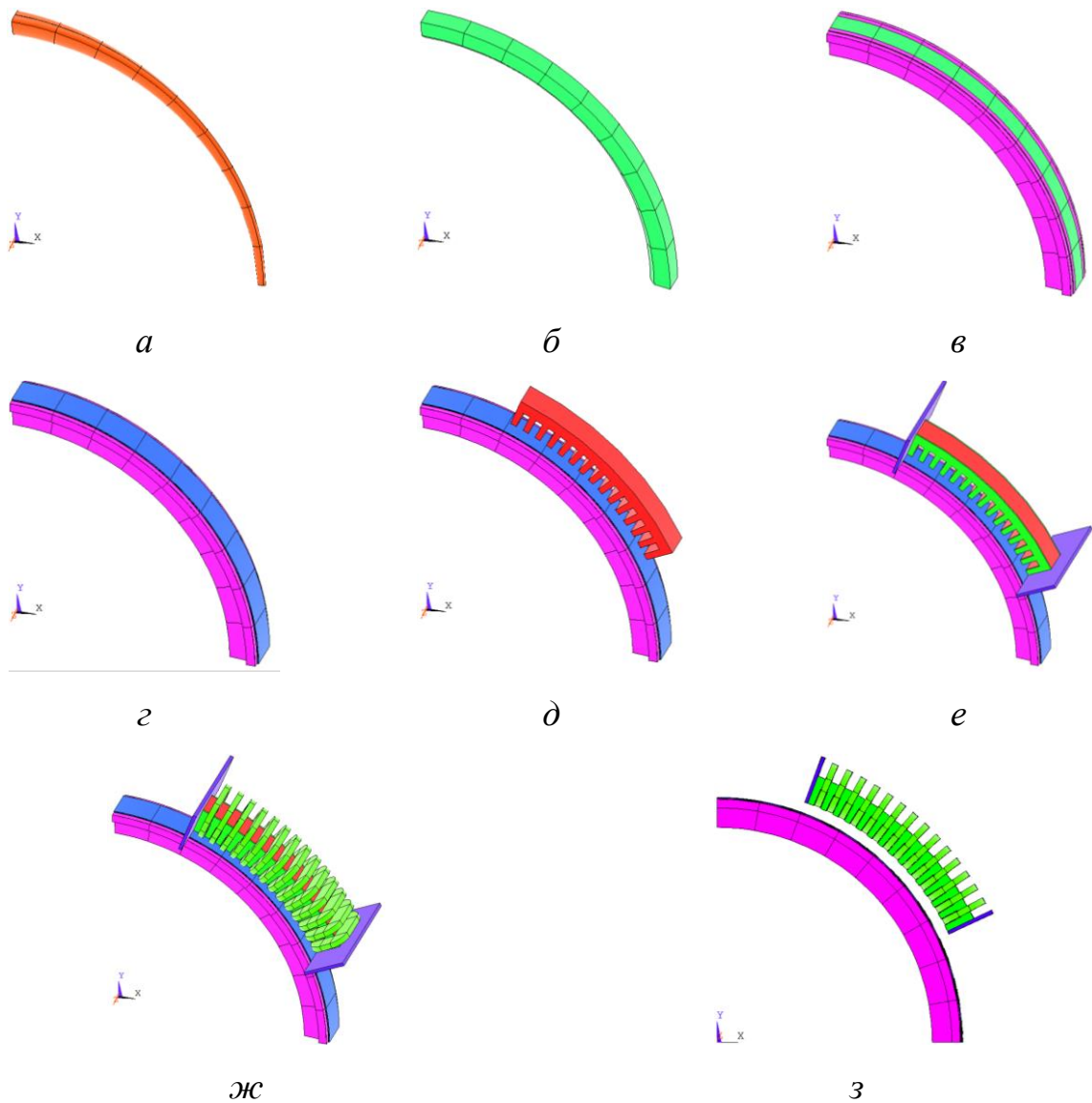


Рисунок 2.14 - Геометрия расчетной модели (без отображения границ расчётной области)

Выполнить предварительную оценку влияния движения металла на электромагнитное поле позволяет магнитное число Рейнольдса [54]:

$$Re_m = \mu_a \gamma v_0 l_0, \quad (2.19)$$

где $\mu_a = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м;

$\gamma = 3,4 \cdot 10^6$ – удельная электрическая проводимость, 1/(Ом·м);

$v_0 = 1$ – характерная скорость, м/с;

$l_0 = 0,03$ – характерный размер, м.

Полученное магнитное число Рейнольдса имеет значение менее 0,13, что существенно меньше 1. Это позволяет не учитывать в математической модели влияния поля скоростей расплава на электромагнитное поле.

Для оценки необходимости учета скольжения между бегущим полем индуктора и вращением кристаллизатора был предварительно рассчитан рабочий диапазон скорости движения электромагнитного поля:

$$v_{\Pi} = 2\tau f_{\Pi}, \quad (2.20)$$

где $2\tau = 0,6$ – двойное полюсное деление индуктора, м;

$f_{\Pi} = 20 \dots 100$ – частота тока, питающего индуктор, Гц.

Полученное значение v_{Π} имеет значение от 16 до 80 м/с, что существенно больше линейной скорости вращения литейного колеса равного 0,157 м/с для скорости литья 2 об/мин. В связи с этим в математической модели не учитывалось вращение колеса литейной машины.

Система уравнений в общем виде, описывающих электромагнитное поле, записанная относительно векторного и скалярного потенциалов (2.21 и 2.22), и уравнение непрерывности вектора плотности тока (2.23) имеют вид [14, 38, 81]:

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \nabla \times \left(\nabla \cdot \mathbf{A} + \epsilon_a \mu_a \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) - \epsilon_a \mu_a \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu_a \boldsymbol{\delta}; \quad (2.21)$$

$$\nabla^2 \varphi + \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \mathbf{A} = -\frac{\rho_q}{\epsilon_a}; \quad (2.22)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\delta} = -\frac{\partial \rho_q}{\partial t}, \quad (2.23)$$

где \mathbf{A} – векторный потенциал, Вб/м;

φ – скалярный потенциал неподвижных зарядов, В;

ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф/м;

$\boldsymbol{\delta}$ – вектор плотности тока, А/м²;

ρ_q – плотность свободный зарядов, Кл/м³.

Входящий в уравнения (2.21 и 2.23) вектор плотности тока имеет вид:

$$\delta = \gamma \left[-\nabla\varphi - \frac{\partial A}{\partial t} + \mathbf{v} \times (\nabla \cdot \mathbf{A}) \right]. \quad (2.24)$$

Пренебрегая токами смещения, а также накладывая кулоновскую калибровку ($\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$) для однозначного вычисления векторного потенциала электромагнитного поля и учитывая отсутствие в расчетной области движения ($\mathbf{v} = 0$) и свободных электрических зарядов ($\rho_q = 0$ и $\varphi = 0$), уравнения (2.21–2.24), упразднив уравнение (2.22), можно записать в следующем виде:

$$\nabla^2 A = -\mu_a \delta, \quad (2.25)$$

$$\nabla \cdot \delta = 0, \quad (2.26)$$

$$\delta = -\gamma \frac{\partial A}{\partial t}. \quad (2.27)$$

Таким образом, для анализа электромагнитного поля в расчетной области достаточно решить дифференциальную систему уравнений (2.25 – 2.27) относительно пространственных компонент векторного потенциала электромагнитного поля.

Векторы магнитной индукции, напряженности электрического и магнитного полей выражаются через векторный магнитный потенциал следующим образом:

$$\mathbf{B} = \nabla A; \quad (2.28)$$

$$\mathbf{E} = \frac{\partial A}{\partial t}; \quad (2.29)$$

$$\mathbf{H} = \frac{\nabla A}{\mu_a}. \quad (2.30)$$

Для решения системы уравнений (2.25–2.27) в моделируемой системе на границе расчетной области накладываются дополнительные условия. Считается, что расчетную область окружает среда с идеальными магнитными свойствами ($\mu = \infty$), на границах расчетной области будут выполняться условия [36]:

– для касательной составляющей векторного потенциала:

$$\frac{\partial A_\tau}{\partial n} = 0; \quad (2.31)$$

– для нормальной составляющей векторного потенциала:

$$A_n=0, \quad (2.32)$$

где \mathbf{n} – вектор нормали поверхности границы расчетной области.

Исходными данными для выполнения электромагнитного расчета служат геометрические параметры, удельное электрическое сопротивление и магнитная проницаемость всех элементов системы, а также амплитуды, фазы и частота питающих индуктор токов.

Таким образом, для решения электромагнитной задачи были приняты следующие допущения:

- протяженность кристаллизатора и слитка принята равной 90 градусам по колесу литейной машины. Брать полную длину жидкой фазы не целесообразно, т. к. в удаленных участках магнитное поле индуктора имеет малое значение;
- электромагнитное поле в расчетной области изменяется во времени по гармоническому закону;
- влиянием движения кристаллизатора и расплава в жидкой сердцевине слитка на магнитное поле пренебрегаем;
- на границе расчетной области можно принять допущение, что существует только касательная составляющая вектора напряжённости магнитного поля ($H_n = 0$) и все магнитное поле существует только в расчетной области.

Решалась гармоническая задача для комплексных величин векторов электромагнитных полей, в результате которой для каждого вектора существовала мнимая и вещественная части, которые в дальнейшем преобразовывались в действительные величины.

Построение параметрической модели, расчет и дальнейший анализ электромагнитного поля проводился в *ANSYS Emag* [3]. Элементы расчетной сетки во всех областях структурированы и имеют в зависимости от области форму гексаэдров (рисунок 2.15).

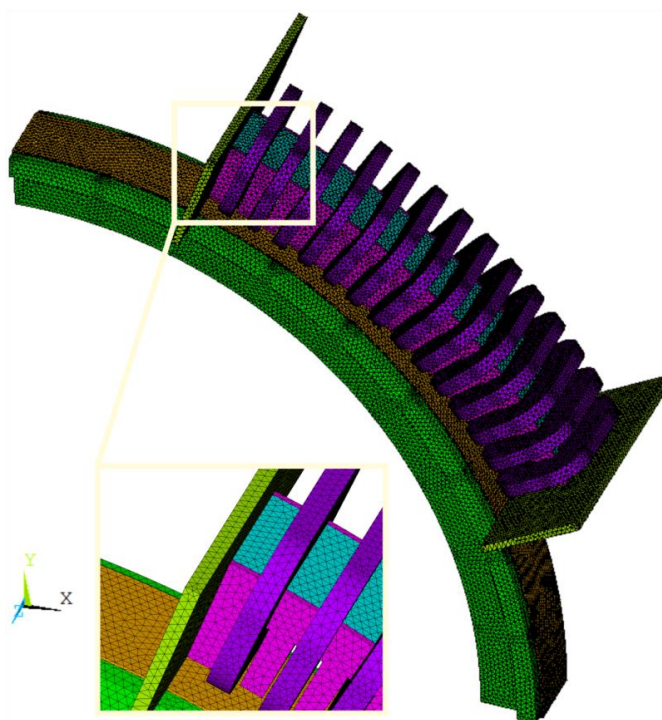


Рисунок 2.15 - Расчетная сетка модели кристаллизации слитка в роторной литейной машине

Модель позволяет получить картины распределения электромагнитных полей и токов в системе, рассчитать величины электромагнитных сил, выделяемой тепловой мощности и энергетических параметров системы в зависимости от геометрии и параметров электрического питания индуктора модификатора.

Результатом решения задачи является распределение векторного потенциала. Для проведения анализа необходимо получить значения следующих дифференциальных величин: плотность тока, индукция, напряженность электрического и магнитного полей, объемная электромагнитная сила и выделяемая тепловая мощность.

Магнитную индукцию, напряженность электрического и магнитного полей можно получить по формулам (2.28), (2.29) и (2.30) соответственно. Усредненное векторное значение удельных электромагнитных сил определяются из выражения [63]:

$$\mathbf{f}_{\text{эм}} = \boldsymbol{\delta} \times \mathbf{B}, \quad (2.33)$$

Удельное значение выделяемой тепловой мощности вызванное протеканием электрического тока по проводящему материалу определяется из выражения [63]:

$$q_{\text{эм}} = \gamma E^2, \quad (2.34)$$

Величины активной, реактивной и полной мощностей определяются соответственно по выражениям [63]:

$$P = \int q_{\text{эм}} dV; \quad (2.35)$$

$$Q = \omega \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} dV; \quad (2.36)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (2.37)$$

где dV – элементарный объем системы, м^3 ;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота, рад/с.

2.2.2 Расчетная модель. Геометрия, размеры и свойства материалов

На рисунке 2.16 и в таблице 2.3 представлена геометрия и размеры части кристаллизатора и слитка с индуктором электромагнитного модификатора для моделирования электромагнитных процессов.

Индуктор расположен с торцевой стороны кристаллизатора и смещен относительно вертикальной оси литейной машины на 20° , что соответствует его расположению сразу за прижимным роликом. Геометрия жидкой сердцевинки слитка построена по результатам расчета процесса кристаллизации для базовых параметрах литья и скорости вращения колеса 2 об/мин. Размеры и геометрия кристаллизатора взяты из расчётной модели процесса кристаллизации.

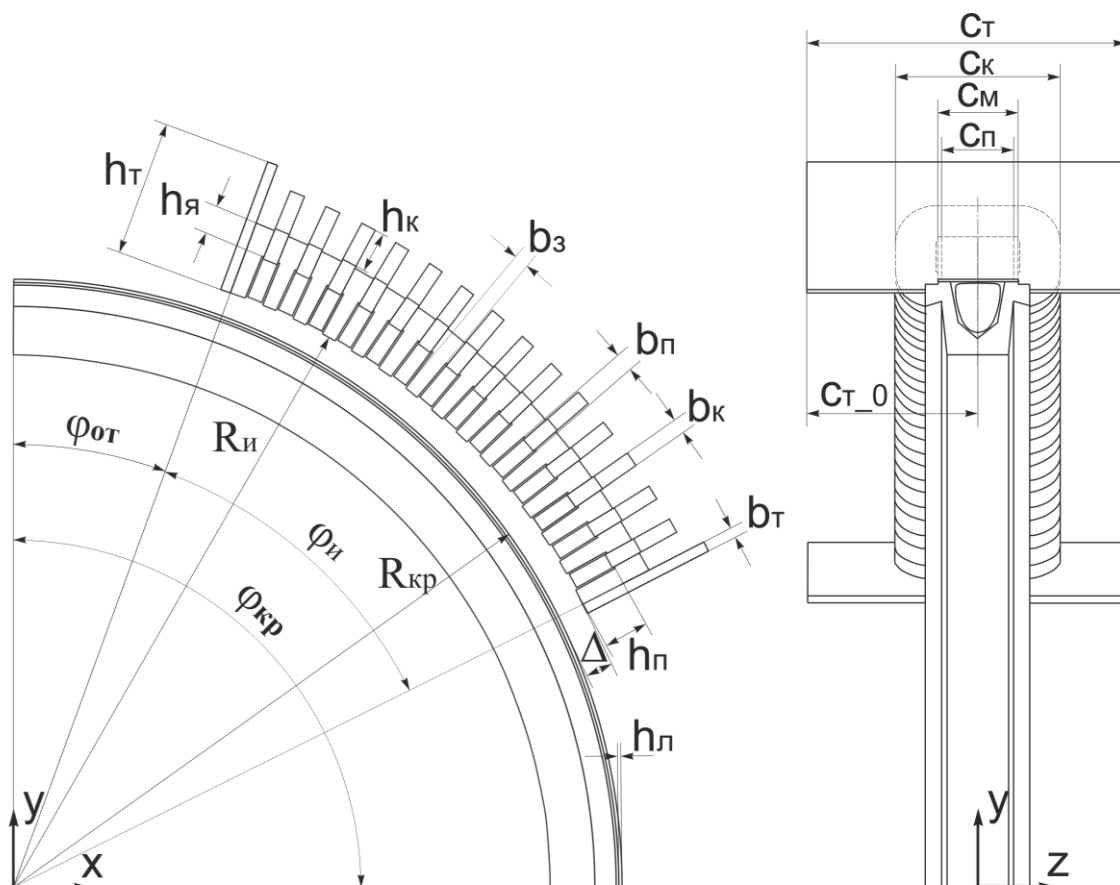


Рисунок 2.16 - Геометрия и параметры расчетной области

Таблица 2.3 - Параметры геометрии расчетной модели

Параметр	Значение
Ширина зубца (b_3)	18,5 мм
Ширина паза ($b_{п}$)	23,1 мм
Глубина паза ($h_{п}$)	55 мм
Толщина катушки (b_k)	25,5 мм
Высота катушки ($h_{п}$)	50 мм
Высота ярма ($h_{я}$)	35 мм
Внутренний радиус индуктора ($R_{и}$)	785 мм
Угол развертки индуктора ($\varphi_{и}$)	45 °
Внешний радиус кристаллизатора ($R_{кр}$)	770 мм
Толщина стальной ленты ($h_{л}$)	2 мм
Угол протяженности кристаллизатора ($\varphi_{кр}$)	90 °
Угол отступа начала индуктора от места заливки расплава ($\varphi_{от}$)	25 °
Немагнитный зазор (Δ)	30 мм
Ширина торцевого листа (c_T)	390 мм
Высота торцевого листа (h_T)	150 мм
Толщина торцевого листа (b_T)	10 мм

Положение торцевого листа ($c_{т0}$)	180 мм
Ширина катушки (c_k)	205 мм
Толщина магнитопровода (c_m)	100 мм
Толщина пакета (c_n)	90 мм

Физические свойства материалов взяты из [29, 87, 67, 74, 12] и приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Физические свойства материалов

Наименование	Значение
Удельное электрическое сопротивление катушек (ρ_k)	$1.75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Магнитная проницаемость катушек (μ_k)	1 о.е.
Удельное электрическое сопротивление магнитопровода (ρ_m)	$1 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Магнитная проницаемость магнитопровода (μ_m)	100 о. е. /1000 о. е. / кривая ВН
Удельное электрическое сопротивление окружающего пространства (ρ_b)	$1 \cdot 10^{32} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Магнитная проницаемость окружающего пространства (μ_b)	1 о.е.
Удельное электрическое сопротивление жидкой фазы слитка ($\rho_{жф}$)	$22 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Магнитная проницаемость жидкой фазы слитка ($\mu_{жф}$)	1 о.е.
Удельное электрическое сопротивление твердой фазы слитка ($\rho_{тф}$)	$9.5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Магнитная проницаемость твердой фазы слитка ($\mu_{тф}$)	1 о.е.
Удельное электрическое сопротивление бандаж кристаллизатора (ρ_b)	$4 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Магнитная проницаемость бандаж кристаллизатора (μ_b)	1 о.е.
Удельное электрическое сопротивление ленты кристаллизатора (ρ_l)	$65 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Магнитная проницаемость бандаж ленты кристаллизатора (μ_l)	1 о.е. / кривая ВН
Удельное электрическое сопротивление стягивающих щек и торцевых листов (ρ_l)	$75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Магнитная проницаемость стягивающих щек и торцевых листов (μ_l)	1 о.е.

Для ленты кристаллизатора принята кривая намагничивания материала Ст3, для магнитопровода индуктора принята кривая намагничивания материала Э330. Кривые намагничивания приведены на рисунке 2.17.

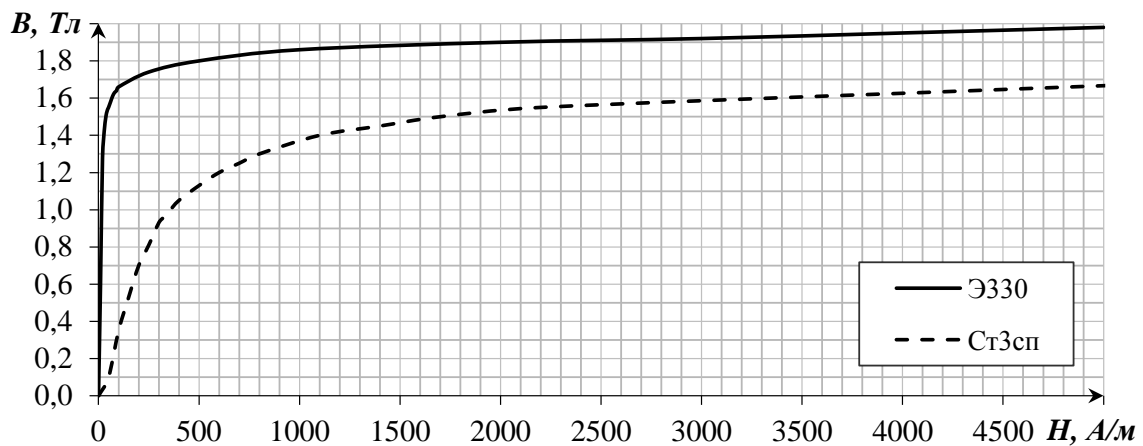


Рисунок 2.17 - Кривые намагничивания Ст3 (а) и Э330 (б)

2.2.3 Результаты моделирования и их анализ

В результате решения электромагнитной задачи получены дифференциальные и интегральные характеристики системы.

На рисунке 2.18 представлены картины распределения магнитной индукции, напряженности магнитного поля, объемных электромагнитных сил и удельных тепловых мощностей в системе. Бегущее электромагнитное поле экранируется ферромагнитной стальной лентой и твердой фазой слитка, в связи с этим проведены исследования их влияния на процесс электромагнитного воздействия и корректность расчета.

На рисунке 2.19 приведены картины распределения магнитной индукции и выделяемой мощности в медном бандаже кристаллизатора, твердой и жидкой фазах слитка.

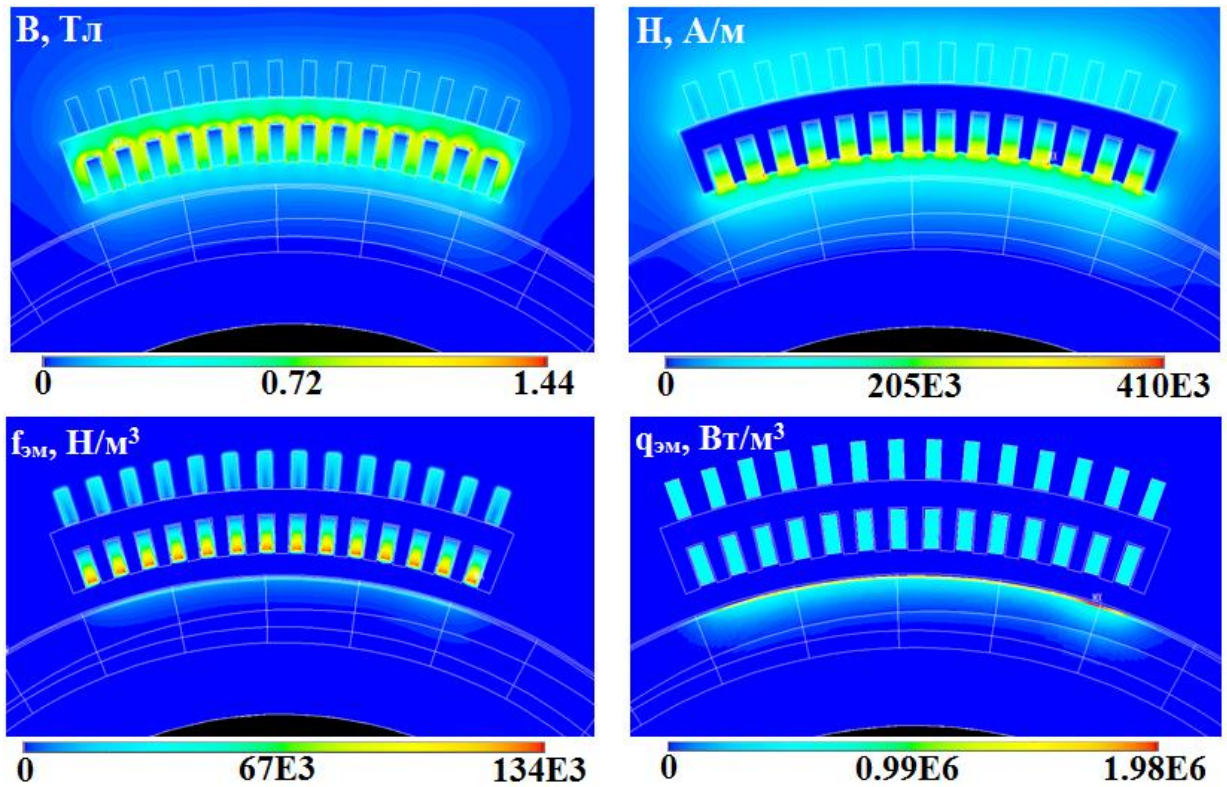


Рисунок 2.18 - Распределение дифференциальных параметров электромагнитного поля в расчетной области

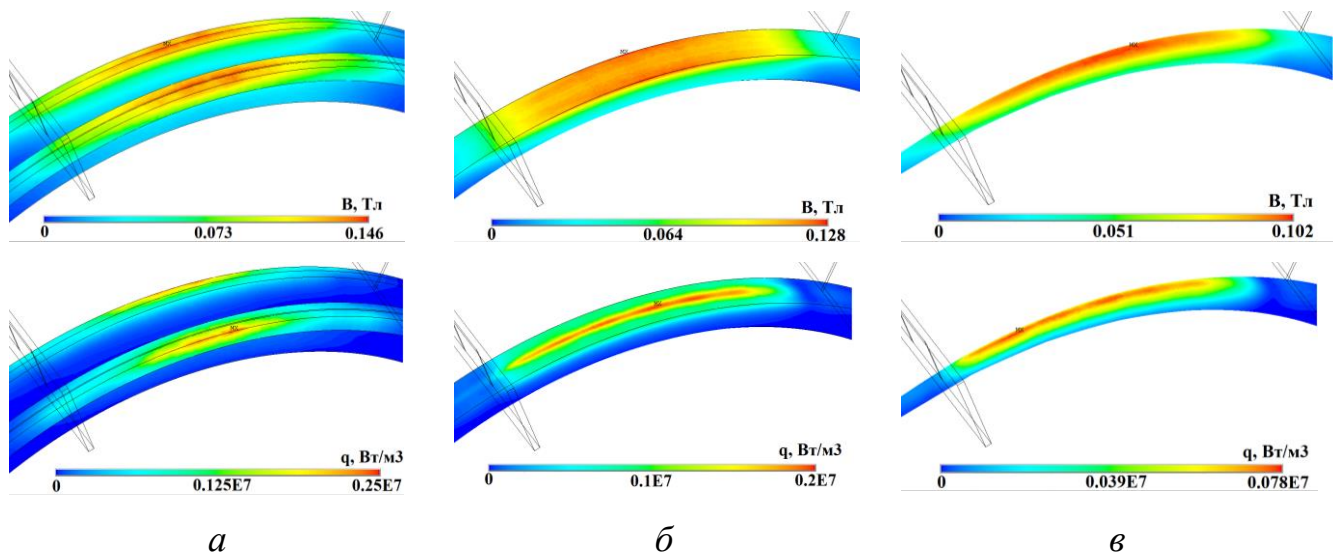


Рисунок 2.19 - Распределения магнитной индукции и выделяемой мощности в медном бандаже (*a*), твердой (*б*) и жидкой (*в*) фазах

На рисунке 2.20 приведены картины распределения векторов плотности тока в жидкой и твердой фазах слитка, медном бандаже и стальной ленте. В

жидкой и твердой фазах преобладает поперечная компонента вектора плотности тока, а замыкание контуров токов происходит по медному бандажу кристаллизатора.

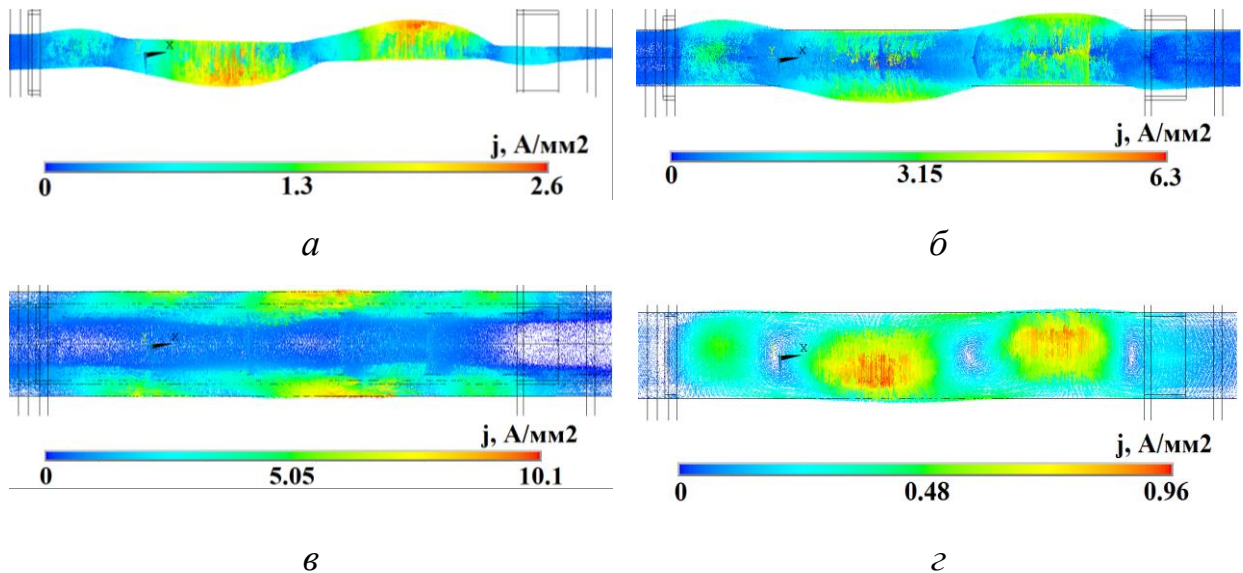


Рисунок 2.20 - Распределения векторов плотности тока в жидкой (*а*) и твердой (*б*) фазах, медном бандаже (*в*) и стальной ленте (*г*)

На рисунке 2.21 приведены картины распределения векторов плотности тока и выделяемой мощности в щеках и торцах индуктора, магнитной индукции в магнитопроводе и катушках и векторов удельных электромагнитных сил в жидкой фазе слитка.

Первоначально необходимо определить влияния магнитных свойств магнитопровода на корректность получаемых результатов математического моделирования. Магнитные свойства магнитопровода задавались через относительную магнитную проницаемость μ равную 100, 1000 о. е. и через кривую ВН. Характеристики строились в зависимости от линейной токовой нагрузки индуктора (величины тока, подаваемого на индуктор). Частота тока была принята равной 30 Гц.

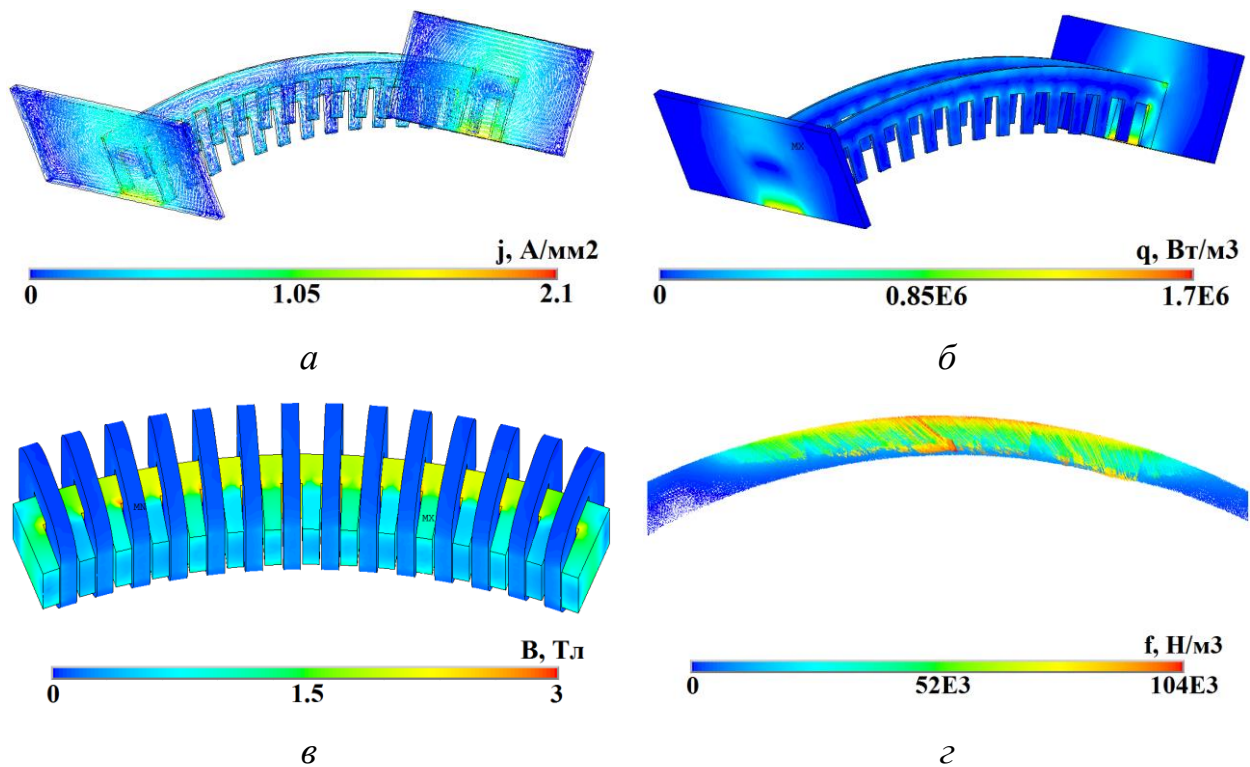


Рисунок 2.21 - Распределения векторов плотности тока (*а*), выделяемой мощности (*б*) в щеках и торцах индуктора, индукции в магнитопроводе и катушках (*в*) и электромагнитных сил в жидкой фазе слитка (*з*)

На рисунке 2.22 представлены распределения индукции в магнитопроводе для разных свойств материалов при линейной токовой нагрузке равной $8.2E4$ А/м. Как видно из рисунка 2.22, учет кривой намагничивания дает более равномерное распределение магнитного потока по магнитопроводу, отсутствуют области перемагничивания в местах стыковки зубцов и ярма при задании относительной магнитной проницаемости, равной 100 и 1000. Это можно объяснить тем, что при задании свойств магнитопровода через относительную магнитную проницаемость магнитное сопротивление участков не изменяется от величины проходящего магнитного потока. Поэтому магнитный поток проходит по пути наименьшего сопротивления. В отличие от этого при учете кривой намагничивания магнитная проницаемость зависит от плотности магнитного потока и это приводит к изменению ее сопротивления, что является причиной равномерного распределения магнитного потока в магнитопроводе.

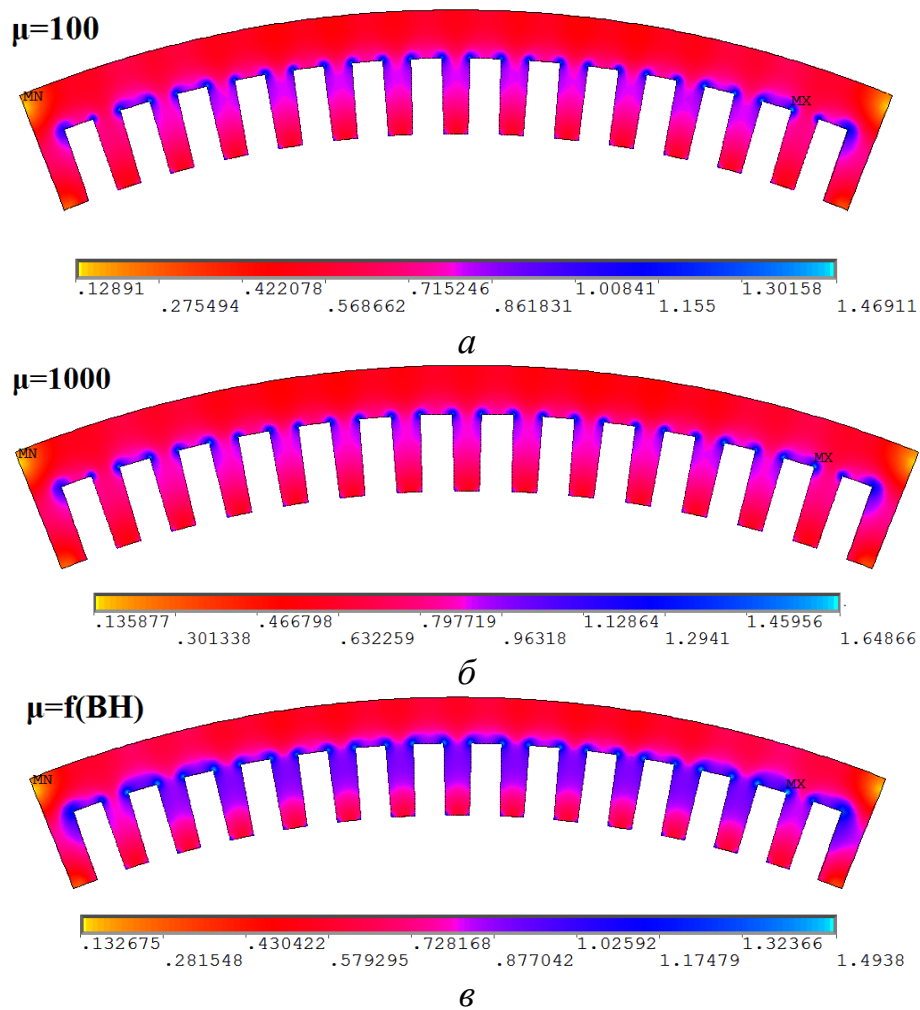


Рисунок 2.22 - Распределение индукции (Тл) в магнитопроводе индуктора при задании магнитных свойств магнитопровода через относительную магнитную проницаемость равную 100 о. е. (*a*), 1000 о. е. (*б*) и кривую ВН (*в*)

На рисунке 2.23 представлены полученные зависимости параметров исследуемой системы от линейной токовой нагрузки для разных свойств материала магнитопровода. Как видно из зависимостей, полученные характеристики при относительной магнитной проницаемости магнитопровода индуктора, равной 1000, практически совпадают со значениями, полученными при учете кривой намагничивания. Полученные характеристики при магнитной проницаемости магнитопровода индуктора, равной 100, имеют заниженные значения, вызванные значительным ростом напряженности магнитного поля в

магнитопроводе и как следствие снижением напряжённости в рабочем пространстве.

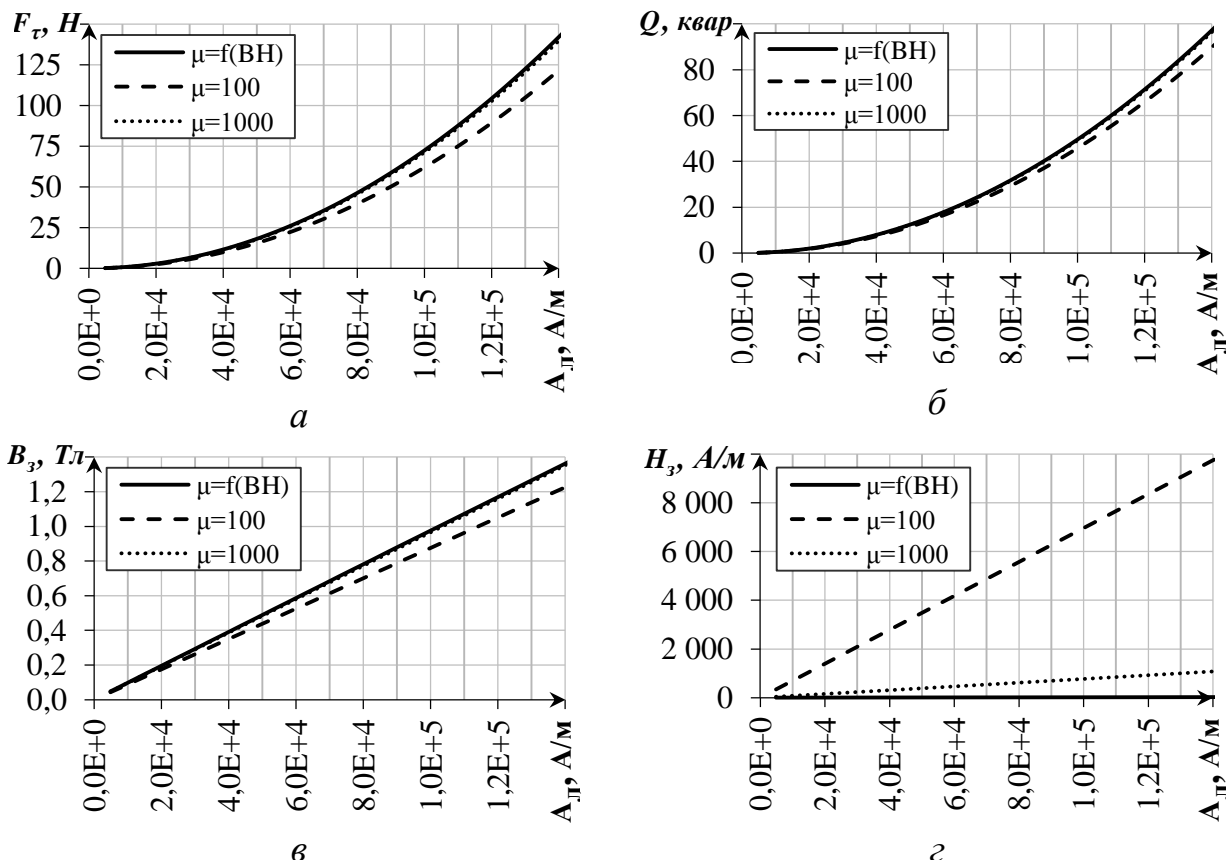


Рисунок 2.23 - Зависимости тангенциальных компонент электромагнитных сил в жидкой фазе слитка (а), реактивной мощности в системе (б), средней индукции (в) и напряжённости поля (г) в зубцах магнитопровода от линейной токовой нагрузки для разных свойств материала магнитопровода

Таким образом, при выполнении математического моделирования для получения близких к истинным результатам достаточно задавать свойства магнитопровода через $\mu = 1000$. Важно отметить, что данный вывод справедлив только, если магнитная система находится в ненасыщенном состоянии, где $\mu \gg 1$.

Бегущее электромагнитное поле экранируется ферромагнитной стальной лентой и твердой фазой слитка, в связи с этим проведены исследования их влияния на процесс электромагнитного воздействия и корректность расчета. При

исследовании магнитные свойства ленты кристаллизатора задавались через кривую намагничивания $\mu=f(BH)$ (ферромагнитная лента) и через относительную магнитную проницаемость $\mu = 1$ (не ферромагнитная лента). Рассмотрены две схемы соединения обмотки индуктора, обеспечивающие число пар полюсов $p = 1$ и $p = 2$ с фазной зоной $\beta = 60$ эл. град.

На рисунке 2.24 представлены зависимости параметров исследуемой системы от линейной токовой нагрузки для разных свойств материала ленты литейной машины при числе пар полюсов $p = 1$ и $p = 2$. Как видно из полученных характеристик ферромагнитные свойства стальной ленты сильно влияют на интегральные значения сил в жидкой фазе слитка. При этом до значений литейной токовой нагрузки менее $6E4$ А/м происходит полное экранирование магнитного потока. При больших значениях линейной токовой нагрузки происходит насыщение ленты и в жидкой фазе создаются электромагнитные силы. При числе пар полюсов $p = 1$ для насыщения ленты литейной машины необходима существенно меньшая линейная токовая нагрузка, чем при $p = 2$. Сравнивая схемы с числом пар полюсов $p = 1$ и $p = 2$ можно сделать вывод о предпочтительности использования схемы с $p = 1$. Это вызвано тем, что изменение схем соединения обмоток индуктора приводит к существенному изменению распределения векторов магнитной индукции в магнитопроводе.

Задание свойств стальной ленты через относительную магнитную проницаемость, равной 1 о. е. дает в результате моделирования существенно завышенные значения, что требует выполнения их корректировки. Задание свойств стальной ленты через относительную магнитную проницаемость равной 100 о. е., дает недостоверные результаты математического моделирования. Изменение магнитных свойств стальной ленты существенно не влияет на общую реактивную мощность в системе.

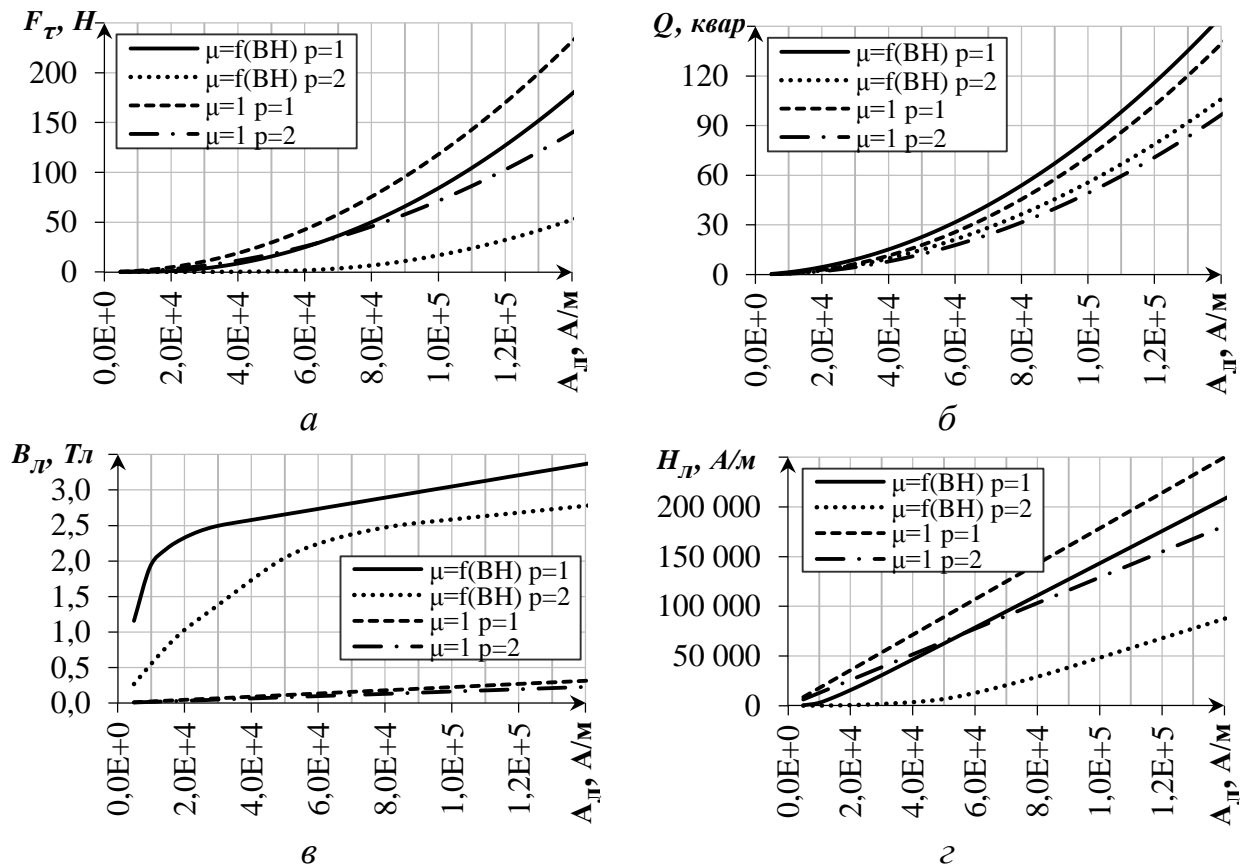


Рисунок 2.24 - Зависимости тангенциальных компонент электромагнитных сил в жидкой фазе слитка (а), реактивных мощностей в системе (б), средней индукции (в) и напряжённости поля (г) в ленте литейной машины от линейной токовой нагрузки для разных свойств ленты и числа пар полюсов индуктора

Так на рисунке 2.25 показаны распределения магнитного поля в магнитопроводе при $A_{л} = 8.3E4$ А/м для $p = 2$ (а) и $p = 1$ (б). Как видно из-за особенностей конструкции исследуемого индуктора при числе пар полюсов $p = 1$ на фазу приходится $q = 2$, что приводит к снижению магнитного потока, выходящего из зубца, расположенного между катушками одной фазы.

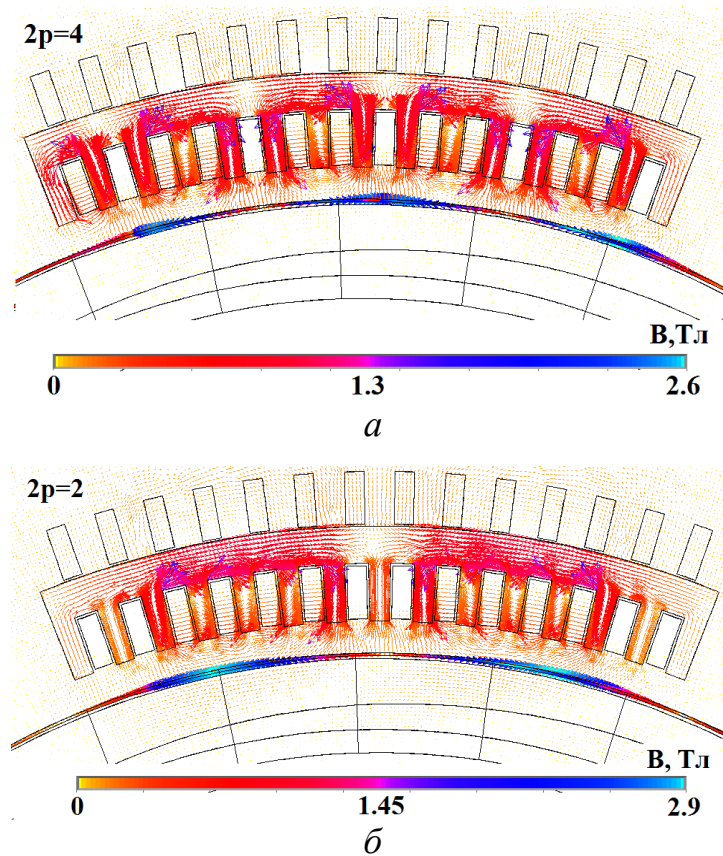


Рисунок 2.25 - Векторное распределение магнитного поля в расчетной области при $Aл=8.3E4$ А/м для $p = 2$ (а) и $p = 1$ (б)

Увеличение полюсного деления приводит к росту величины радиальной компоненты магнитного потока, выходящего из полюса, что позволяет насытить ленту и проникнуть в жидкую фазу слитка.

Для анализа степени влияния ферромагнитной ленты введен коэффициент экранирования K_3 , показывающий процент электромагнитных сил потерянных в результате замыкания части потока по ленте:

$$K_3 = \frac{\frac{F_{l_i}}{F_{max}} - \frac{F_{BH_i}}{F_{max}}}{\frac{F_{l_i}}{F_{max}}} \cdot 100\%, \quad (2.38)$$

где F_{l_i} – i -ое значение интегральных сил при не ферромагнитной ленте, Н;

F_{BH_i} – i -ое значение интегральных сил при ферромагнитной ленте, Н;

F_{max} – максимальное значение интегральных сил, Н.

На рисунке 2.26 представлены зависимости коэффициента экранирования за счет влияния ферромагнитных свойств ленты для двух схем включения при разной линейной токовой нагрузке.

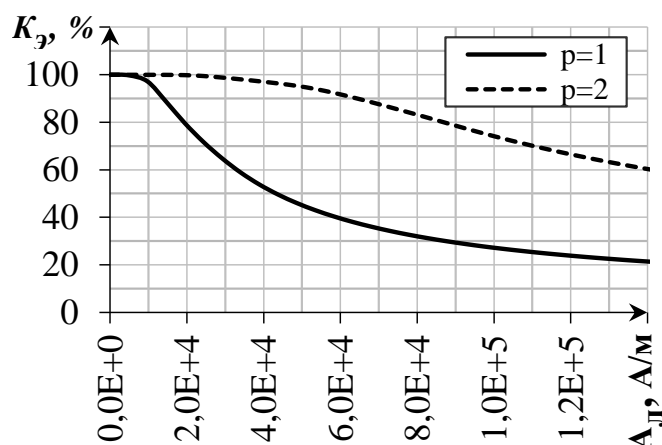


Рисунок 2.26 - Зависимости коэффициента экранирования от линейной токовой нагрузки для разных схем соединения обмоток

Как видно из зависимостей, для экранирования не более 30 % магнитного потока необходимо, чтобы линейная токовая нагрузка была не менее $8.5E4$ А/м.

Математическая модель позволяет учитывать ферромагнитные свойства элементов расчетной системы только в двухмерной постановке. При решении задачи в трехмерной постановке магнитные свойства принимались постоянными и задавались через относительную магнитную проницаемость, определенную по кривой намагничивания для значения напряженности магнитного поля, полученного в результате решения задачи в двухмерной постановке.

Проведены исследования влияния ферромагнитных свойств магнитопровода на параметры системы для индукторов с разным отношением ширины зубца к ширине паза b_z/b_n . Свойства магнитопровода задавались через постоянную магнитную проницаемость $\mu = 1000$ и кривую намагничивания. Примеры распределения амплитудных значений магнитной индукции в

магнитопроводе для разных отношений длин зубцов к длинам пазов представлены на рисунке 2.27.

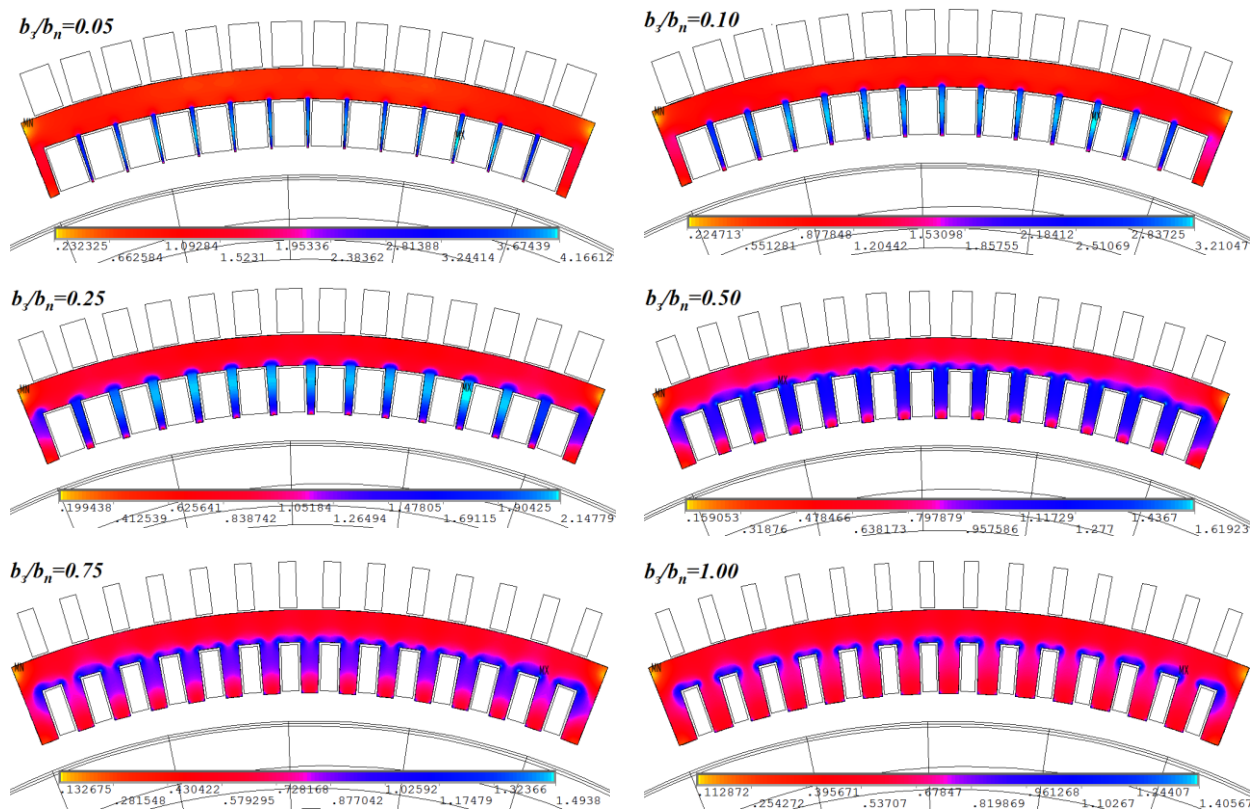


Рисунок 2.27 - Распределение амплитудных значений магнитной (Тл) индукции в магнитопроводе для разных отношений длин зубцов к длинам пазов

На рисунке 2.28, *а* представлены зависимости тангенциальной компоненты электромагнитных сил в жидкой фазе слитка (F_T) от отношения b_z/b_n для трех плотностей токов в катушках индуктора и магнитных свойств магнитопровода. Характеристики строились для малой ($3,5 \text{ А/мм}^2$), средней (5 А/мм^2) и большой (12 А/мм^2) плотностей тока в катушках. На рисунке 2.28, *б* приведено распределение индукции по высоте зубца для разных отношений b_z/b_n при плотности тока 5 А/мм^2 и учете кривой намагничивания.

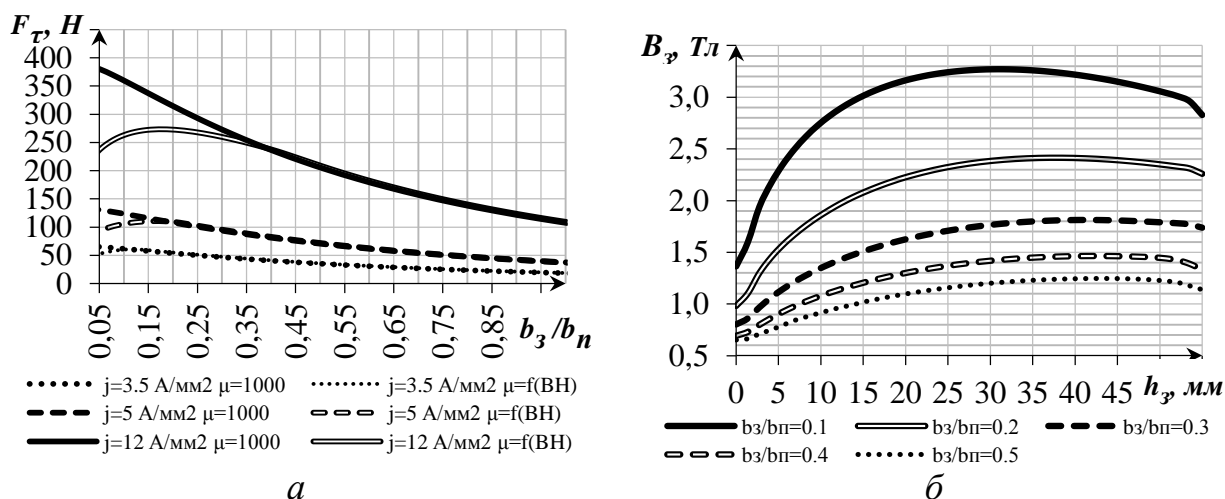


Рисунок 2.28 - Зависимости тангенциальной компоненты электромагнитных сил в жидкой фазе слитка от отношения длин зубцов к длинам пазов для разных плотностей тока в индукторе (а) и распределение индукции по высоте зубца для разных отношений b_z/b_n (б)

При определенном соотношении b_z/b_n происходит расхождение результатов расчетов, что связано с резким ростом магнитного сопротивления, вызванного насыщением. При этом есть ярко выраженный максимум развиваемых в жидкой фазе электромагнитных сил от отношения b_z/b_n . В зависимости от плотности тока в обмотке максимум сил приходится при значении b_z/b_n от 0,15 до 0,25. Это связано с большой величиной пазового рассеивания, требующего существенных значений линейной токовой нагрузки для насыщения зубцовой зоны.

На рисунках 2.29 – 2.30 представлены зависимости интегральных значений нормальной и тангенциальной компонент электромагнитных сил и выделяемой тепловой мощности в элементах системы от величины тока питающего индуктор и от частоты тока, питающего индуктор соответственно. От 50 до 60 % суммарной силы приходится на медный бандаж. На жидкую фазу приходится только от 5 до 10 % от суммарной силы [7]. При росте частоты тока нормальная компонента сил увеличивается, а тангенциальная достигает максимума при определенной частоте и далее снижается. При этом максимумы для элементов системы достигаются при

разных частотах, что можно связать с взаимным электромагнитным экранированием.

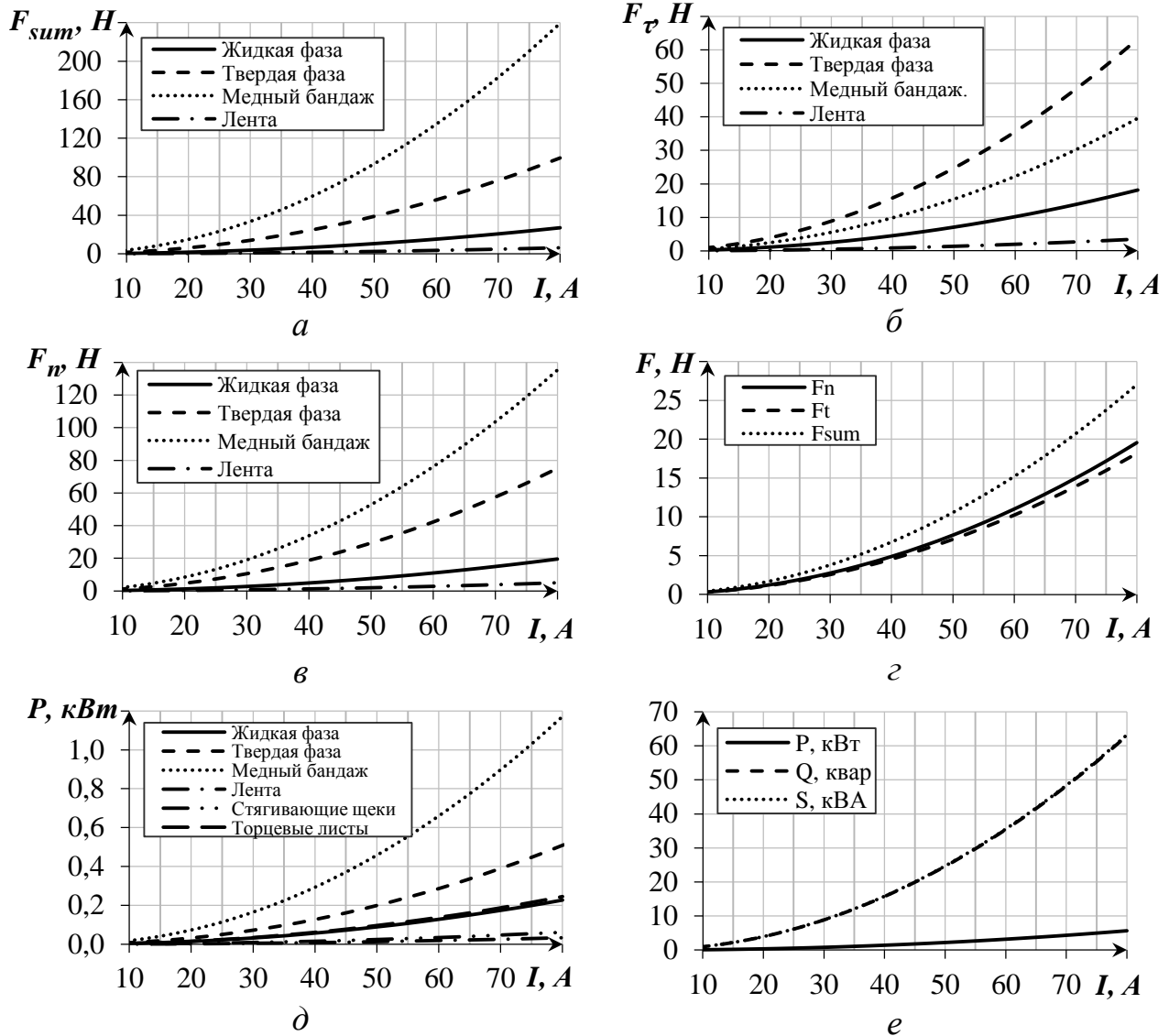


Рисунок 2.29 - Зависимости интегральных значений (а), нормальных (б) и тангенциальных (в) составляющих электромагнитных сил в элементах системы и в жидкой фазе в отдельности (г), выделяемой тепловой мощности в элементах системы (д) и энергетических показателей системы (е) от величины тока, питающего индуктор

Суммарная тепловая мощность, выделяемая в системе при работе электромагнитного модификатора, в зависимости от частоты тока лежит в

диапазоне от 0,2 до 9 кВт, из чего можно сделать вывод об отсутствии значительного теплового влияния на процесс кристаллизации.

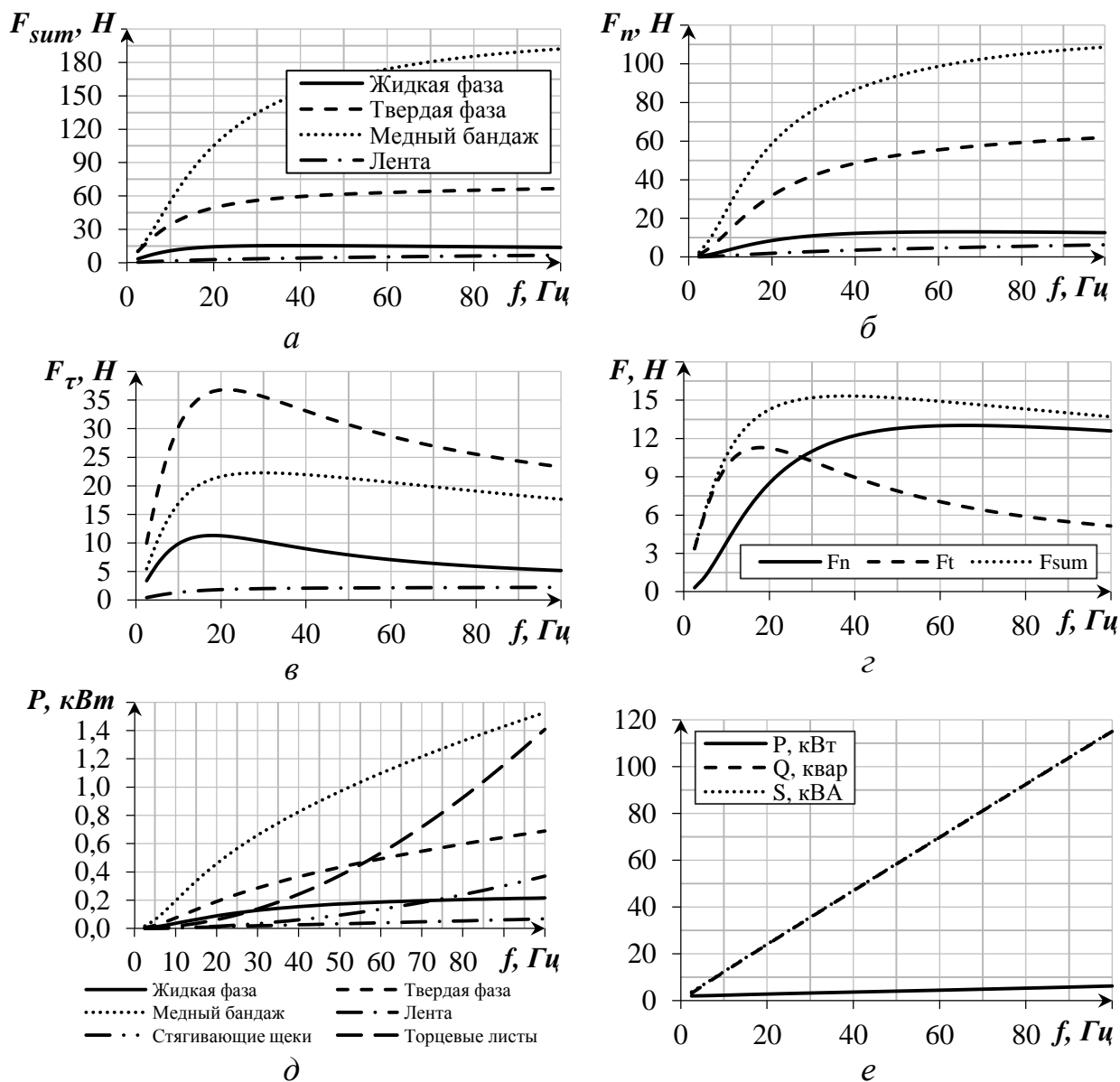


Рисунок 2.30 - Зависимости интегральных значений (а), нормальных (б) и тангенциальных (в) составляющих электромагнитных сил в элементах системы и в жидкой фазе в отдельности (г), выделяемой тепловой мощности в элементах системы (д) и энергетических показателей системы (е) от частоты тока, питающей индуктор

На рисунке 2.31 представлены тангенциальные силы в жидкой фазе слитка в зависимости от частоты тока при разных толщинах твердой фазы между индуктором и жидкой сердцевиной слитка. Значения сил приведены в о. е. Базовой силой является сила, развиваемая при толщине твердой фазы 1 мм. В зависимости от толщины твердой фазы оптимальная частота находится в диапазоне от 15 до 30 Гц. Полученный диапазон частот близок к промышленной частоте, что позволяет использовать стандартные источники питания.

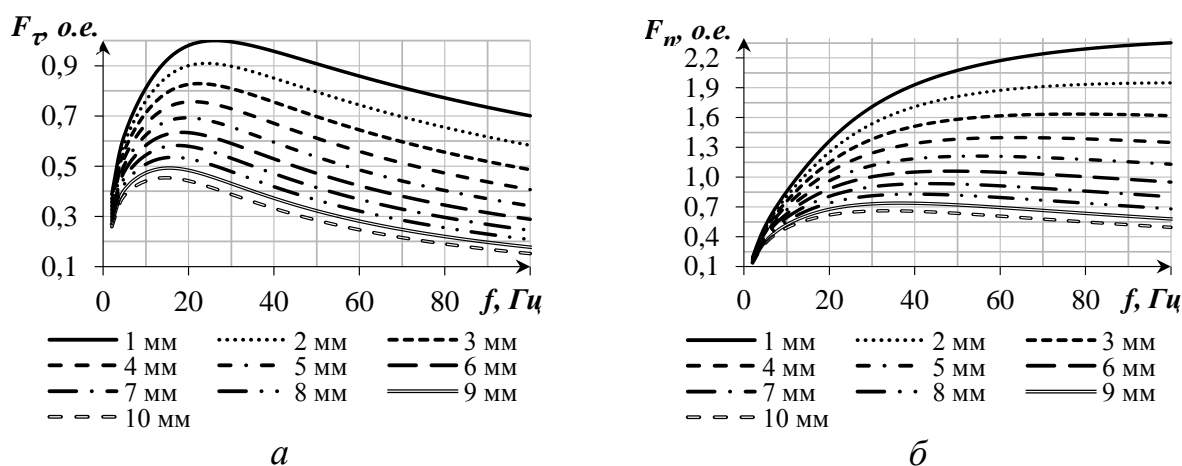


Рисунок 2.31 - Зависимости относительных значений нормальных (а) и тангенциальных (б) составляющих электромагнитных сил в жидкой фазе слитка от частоты тока питающего индуктор для разных толщин корок твердой фазы

Индуктор имеет ограничения по длине из-за конструкции литейной машины, в тоже время ограничений по ширине машины нет, поэтому были проведены расчеты с разной шириной индуктора. На рисунке 2.32 приведены зависимости компонент электромагнитных сил, выделяемой тепловой мощности в элементах системы и интегральных энергетических показателей системы от ширины пакета магнитопровода индуктора. Характеристики получены при токе 60 А с частотой 50 Гц. Из зависимостей видно, что интегральные значения суммарных сил в жидкой фазе при ширине индуктора более 0,08 м. меняются слабо, что говорит о малом влиянии краевого эффекта на значения сил в жидкой фазе слитка. Для твердой фазы слитка аналогичная зависимость уже наблюдается

при ширине более 0,13 м. Таким образом, оптимальная ширина индуктора должна быть на 0,02-0,03 м больше ширины слитка.

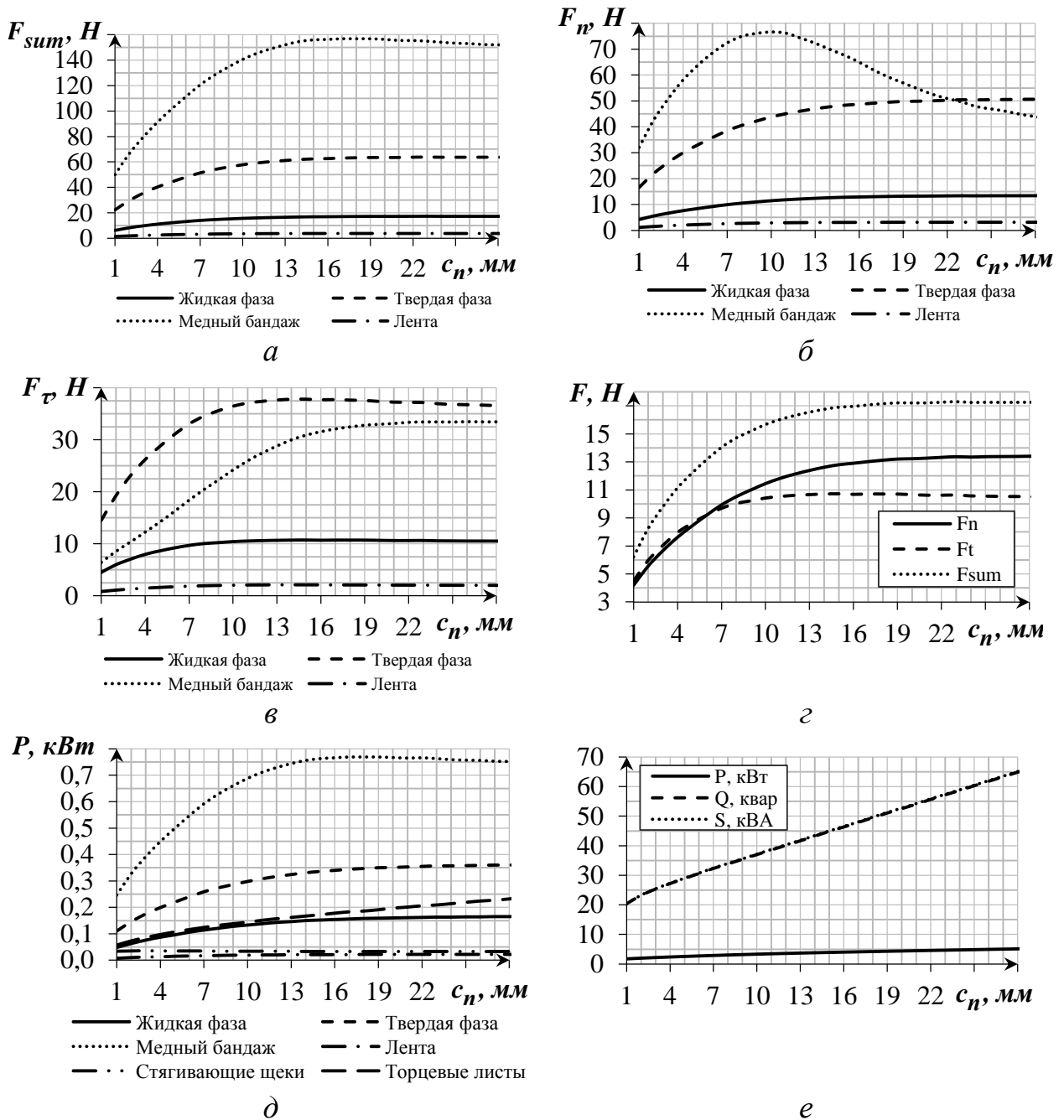


Рисунок 2.32 - Зависимости интегральных значений (а), нормальных (б) и тангенциальных (в) составляющих электромагнитных сил в элементах системы и в жидкой фазе в отдельности (з), выделяемой тепловой мощности в элементах системы (д), интегральных энергетических показателей системы (е) от ширины пакета магнитопровода индуктора

Практический интерес вызывает возможность создания винтового течения в жидкой фазе слитка. При таком движении возможно более равномерно осуществлять воздействие на границу раздела фаз. Для создания такого типа течения необходимо выполнить индуктор со скосом зубцов и катушек относительно рабочего тела (рисунок 2.33). За счет этого в жидкой фазе слитка появляется поперечная компонента электромагнитной силы, приводящая металл во вращательное движение.

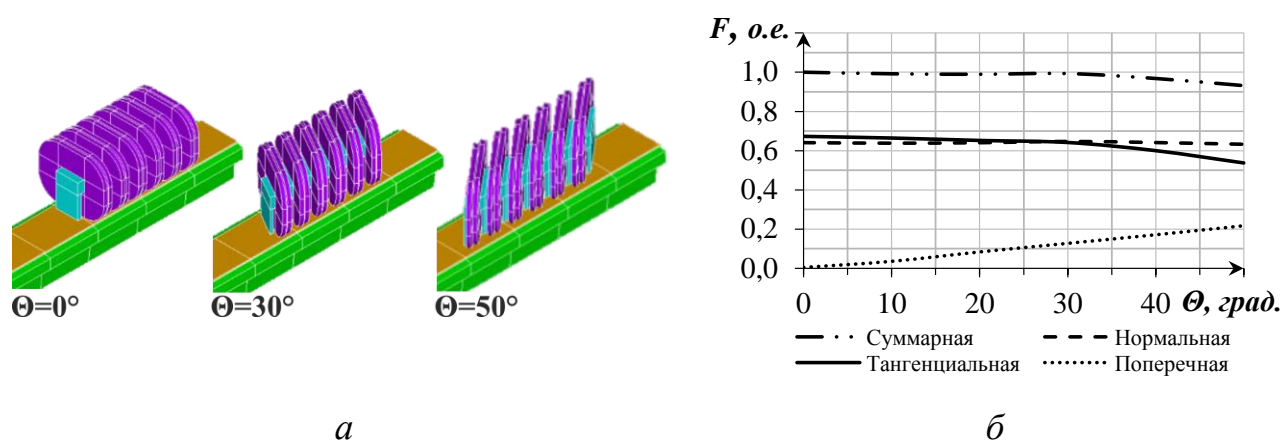


Рисунок 2.33 - Геометрия расчетной модели с разными углами скоса обмоток индуктора (а) и зависимость относительных значений электромагнитных сил в жидкой фазе слитка при разных углах скоса обмоток индуктора (б)

На рисунок 2.33, а приведены результаты математического моделирования, отображающие значения компонент электромагнитных сил в жидкой фазе слитка в зависимости от угла скоса обмоток и зубцов индуктора. Как видно из рисунка 2.33, б скос обмоток и зубцов мало влияет на суммарное усилие, развиваемое в расплаве. Нормальная составляющая действия силы практически не изменяется. Создаваемая за счет скоса поперечная сила достигает значения 5 Н при угле скоса в 50 град., что составляет порядка 30 % от тангенциальной силы, что позволяет сделать вывод о возможности создания спиралевидного течения в жидкой фазе слитка.

В таблице 2.5 приведены схемы включения обмотки индуктора. Схемы № 1 и № 2 представляют собой схемы числом пар полюсов $p = 1$ и $p = 2$ соответственно. В схемах № 3, № 4, № 5, № 6 разными способами подключены компенсирующие катушки. Схемы № 7 и № 8 создают два сходящихся или расходящихся бегущих магнитных поля.

Таблица 2.5 - Схемы соединения обмотки индуктора

№ сх.	№ Катушки														β	q	p	Векторная диаграмма
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14				
1	–	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	–	60	2	1	
2	–	A	Z	B	X	C	Y	A	Z	B	X	C	Y	–		1	2	
3	A	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	Y		2	1	
4	C	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	Z		2	1	
5	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	A	A		2	1	
6	A	A	Z	B	X	C	Y	A	Z	B	X	C	Y	Y		1	2	
7	A	Z	B	X	C	Y	A	A	Y	C	X	B	Z	A		1	2	
8	A	Y	C	X	B	Z	A	A	Z	B	X	C	Y	A		1	2	

На рисунке 2.34 представлены векторные распределения удельных электромагнитных сил в жидкой фазе слитка для разных схем соединения обмотки индуктора. На рисунке 2.35 представлены сравнительные характеристики электромагнитных сил в жидкой фазе слитка, полной мощности системы и коэффициента мощности для разных схем включения обмотки.

Четырехполюсные схемы развивают сопоставимое с двухполюсными схемами усилие, но при этом затрачивается меньшая мощность. В результате анализа определено, что если лента обладает ферромагнитными свойствами, необходимо использовать схему № 5, в противном случае рекомендуется схема № 6.

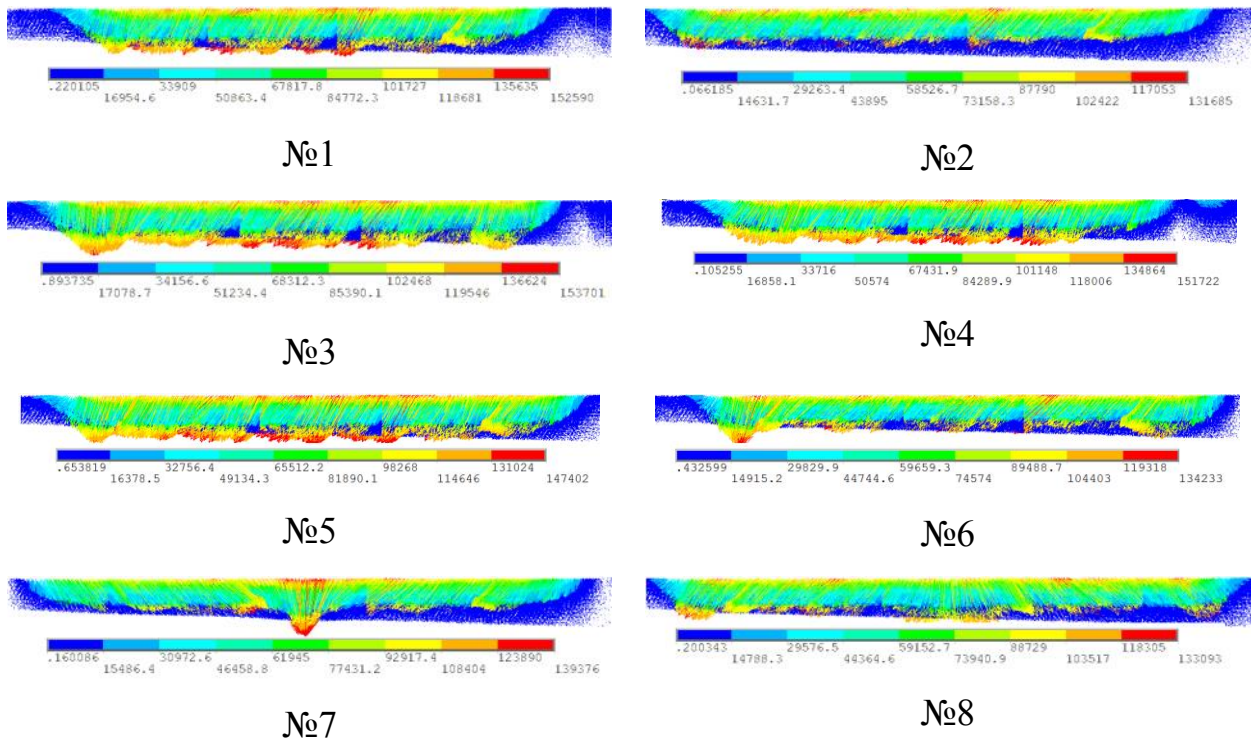


Рисунок 2.34 - Векторное распределение плотности электромагнитных сил (H/m^3) в жидкой фазе слитка для разных схем включения

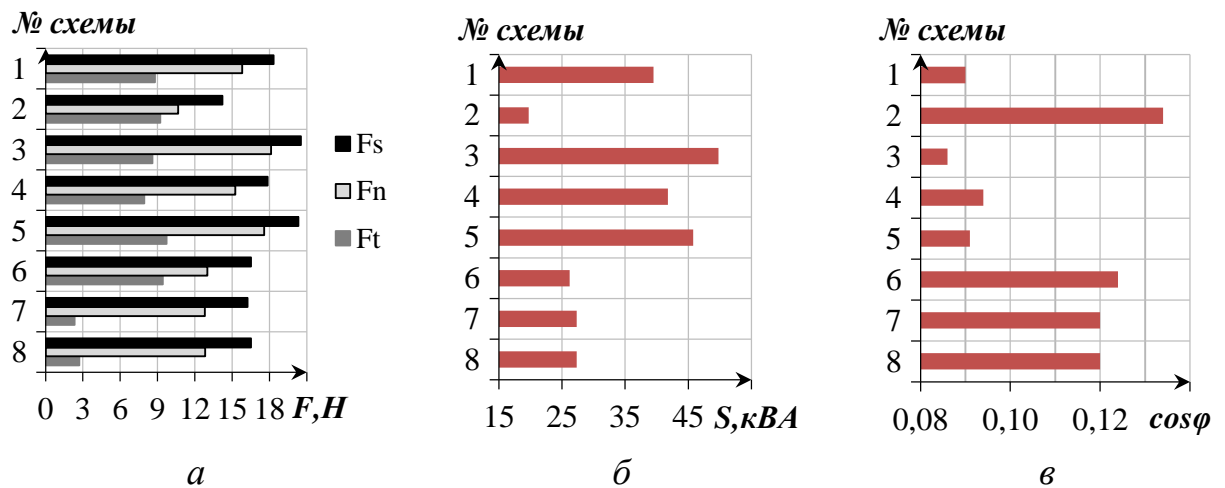


Рисунок 2.35 - Интегральные значения электромагнитных сил в жидкой фазе слитка для разных схем включения катушек (а), полной мощности системы (б) и коэффициента мощности (в)

2.3 Математическое моделирование гидродинамических процессов в жидкой фазе слитка

2.3.1 Описание модели и основные допущения

На третьем этапе производится расчет гидродинамических процессов, протекающих в жидкой фазе слитка при электромагнитном воздействии. В качестве расчетной области использовалась геометрия жидкой сердцевины слитка, полученная в результате расчета процесса кристаллизации.

Целью расчета является определение гидродинамических характеристик течения расплава в жидкой фазе слитка, поэтому в модели не требуется производить расчет тепловых полей. Таким образом, система уравнений, описывающих гидродинамические процессы, протекающие в жидкой фазе слитка при электромагнитном воздействии, базируется на уравнениях сохранения массы (2.3) и движения (2.4) с рядом условий и дополнений.

Расчетная область представляет собой изолированный объем, имеющий постоянную форму без взаимодействия с окружающей средой, поэтому в модели источниковые члены массы равны нулю ($s_p=0$). Область заполнена гомогенной несжимаемой жидкостью, свойства которой не зависят от температуры ($\frac{\partial \rho}{\partial t}=0$). Использование в расчете жидкости с постоянной плотностью не требует учета сил гравитации ($g=0$).

В качестве источникового члена уравнений движения при решении задачи магнитной гидродинамики служит сила Лоренца, представленная в виде векторного распределения удельных электромагнитных сил $s_v=f_{эм}$.

С учетом приведенных дополнений и путем проведения простых математических операций система уравнения (2.3 – 2.4) примет вид:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + (\rho \mathbf{v} \cdot \nabla) \times \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + \mathbf{f}_{\text{эм}}. \quad (2.40)$$

Число Рейнольдса, определяемое по формуле (2.2), для магнитогидродинамической задачи при ожидаемой скорости потока 0,1 м/с и характерном размере 0,05 м (соответствует половине диаметра сечения жидкой фазы слитка в зоне под индуктором) имеет значение 3000. Данное значение числа Рейнольдса приводит к необходимости учета в системе уравнений (2.39 – 2.40) турбулентного характера течения расплава.

Для расчета гидродинамических течений использовались две модели турбулентности: k - ω и LES . Первая модель позволяет получить осреднённые величины течения расплава, что дает общую картину структуры течений расплава жидкой фазе слитка. Вторая модель позволяет получить информацию о влиянии нестационарных эффектов турбулентного течения.

Модель k - ω включает в себя два дифференциальных уравнения: уравнение переноса кинетической энергии турбулентности k и удельной скорости диссипации энергии ω [97]. Модель k - ω предполагает, что турбулентная вязкость связана с кинетической энергией турбулентности и удельной скорости диссипации энергии через соотношение:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}, \quad (2.41)$$

где k – турбулентная кинетическая энергия, определяемая как разброс пульсации скорости, $\text{м}^2/\text{с}^2$;

ω – удельная скорость диссипации энергии, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$.

Использование моделей турбулентности подразумевает модифицирование уравнения движения путем введения усредненной и пульсирующей компонент вектора скорости:

$$\mathbf{v} = \bar{\mathbf{U}} + \mathbf{u}, \quad (2.42)$$

где $\bar{\mathbf{U}}$ – усредненная компонента вектора скорости, м/с;

\mathbf{u} – пульсирующая компонента вектора скорости, м/с.

Система уравнений (2.39 – 2.40) дополняется двумя уравнениями переноса турбулентной кинетической энергии и турбулентной частоты. Данные уравнения для компоненты вектора скорости v_j представлены ниже:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb}, \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b}, \quad (2.44)$$

где β' , α , β , σ_k , σ_ω – константы модели;

P_k – переменная, учитывающая образование турбулентности из-за сил вязкости;

P_{kb} , $P_{\omega b}$ – переменные, учитывающие Архимедовы силы.

Усредненные и пульсирующие компоненты вектора скорости в модели k - ω связаны через тензор Рейнольдсовых напряжений, рассчитываемых по формуле:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right). \quad (2.45)$$

Модель турбулентности *LES* (*Large eddy simulation*) основана на использовании подсеточного моделирования микромасштабной турбулентности. Суть метода заключается в том, что крупные вихри напрямую разрешаются на численной сетке и времени, а мельчайшие вихри подсеточного масштаба моделируются [78]. Разделение величин ϕ на крупные структуры $\bar{\phi}$ и мелкие структуры ϕ' происходит через фильтр [116]:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi', \quad (2.46)$$

$$\bar{\phi}(x, t) = \iiint \phi(x - x^*, t) G(x^*) d^3 x^*, \quad (2.47)$$

где $G(x^*)$ – фильтрующая функция, в которой задан наименьший масштаб турбулентности, допустимый фильтром.

Отфильтрованные от мелких вихрей уравнение Навье – Стокса имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{v}_i \bar{v}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 \bar{v}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^{SGS}}{\partial x_j}, \quad (2.48)$$

где τ_{ij}^{SGS} – подсеточный тензор вязких напряжений Рейнольдса, учитывающий влияние микромасштабной турбулентности.

Подсеточный тензор вязких напряжений определяется по формуле:

$$\tau_{ij}^{SGS} = \bar{v}_i \bar{v}_j - \bar{v}_i \bar{v}_j, \quad (2.49)$$

где $\bar{v}_i \bar{v}_j$ – член, учитывающий влияния микроскопических турбулентностей, который определяется подобно *RANS*-моделям, используя гипотезу Буссинеска на предположении о вихревой вязкости.

Система уравнений дополняется граничными условиями.

Для давления выполняется условие Дирихле:

$$p=0. \quad (2.50)$$

Для границ, соответствующих стенкам жидкого объема, выполняется условие прилипания:

$$\mathbf{v}=0. \quad (2.51)$$

Для расчета гидродинамических течений в жидкой фазе слитка исходными данными служат плотность, вязкость расплава. В качестве начальных условий накладывается поле электромагнитных сил, полученных в результате электромагнитного расчета.

Таким образом, для решения гидродинамической задачи течения расплава в жидкой фазе слитка, были приняты следующие допущения:

- в модели не выполняется расчет тепловых полей;
- пренебрегаем динамикой изменения геометрии жидкой фазы слитка и принимаем ее форму фиксированной;
- не учитываются течения расплава, вызванные вращением литейного колеса;
- влиянием скольжения электромагнитного поля относительно кристаллизатора и расплава пренебрегаем.

Построение геометрической и сеточной моделей проводится в *ANSYS Workbench*, решение системы дифференциальных уравнений в частных производных в расчётной области производится в *ANSYS CFX*, используя метод конечных объемов [48, 6]; анализ термогидродинамических процессов проводился в *ANSYS CFD-Post*.

Элементы расчетной сетки во всех областях структурированы и имеют форму четырехугольников (рисунок 2.36). Для правильного расчета пристеночного течения в области границы жидкой фазы сетка имеет уплотнение.

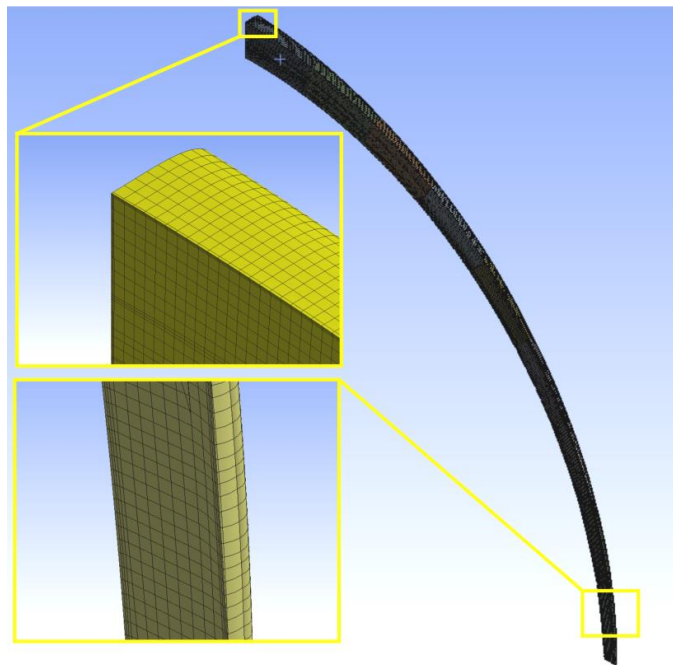


Рисунок 2.36 - Конечно-элементная модель жидкой сердцевинки слитка

Решается переходная задача, шаг по времени выбирается из заданного диапазона на каждой итерации расчета исходя из графика сходимости. Диапазон шага по времени имеет значения от 0,005 с до 0,1 с.

Математическая модель позволяет определять геометрические размеры жидкой сердцевинки слитка и распределение температуры в элементах кристаллизатора и слитке. Модель позволяет провести исследование влияния на геометрию жидкой сердцевинки слитка следующих исходных параметров литья:

скорости литья, первоначальных температур кристаллизатора и поступающего расплава, интенсивности и графика охлаждения.

2.3.2 Расчетная модель, геометрия, размеры и свойства материалов

Геометрия расчетной модели, представленная на рисунке 2.37, получена в результате решения задачи процесса кристаллизации. Для решения гидродинамической задачи с коротким индуктором (длина 0,3 м) используется геометрия жидкой фазы без учета изгиба (рисунок 2.37, *а*). Для решения задачи с длинным индуктором (длина 0,6 м) используется геометрия жидкой фазы с учетом изгиба (рисунок 2.37, *б*).

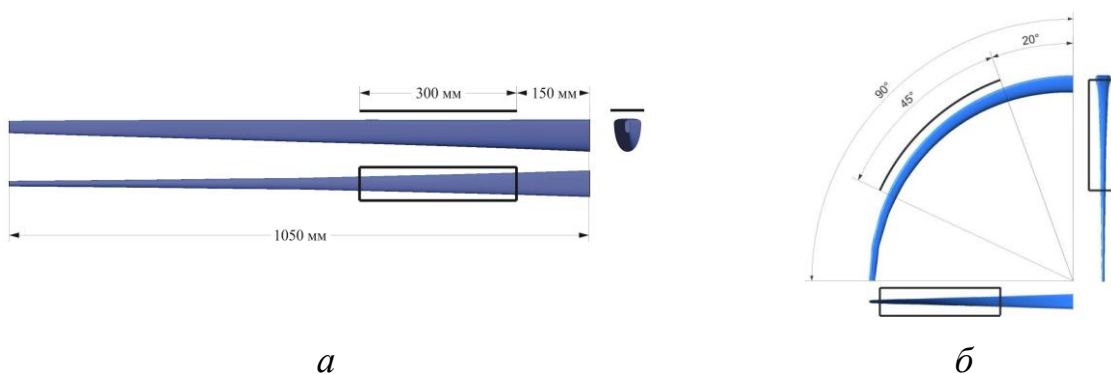


Рисунок 2.37 - Геометрия жидкой сердцевины слитка для решения гидродинамической задачи без учета изгиба с коротким индуктором (*а*) и с учетом изгиба и длинным индуктором (*б*)

Физические свойства расплава принимаются как для алюминия при температуре 700 °С. В качестве источника движения расплава выступали электромагнитные силы, полученные в результате электромагнитного расчета.

2.3.3 Результаты моделирования и их анализ

Первоначально произведен расчет времени переходного процесса при электромагнитном воздействии на жидкую фазу индуктором длиной 0,3 м. На модель были наложены электромагнитные силы, полученные при работе индуктора на частоте 30 Гц и с направлением движения бегущего магнитного поля, совпадающем с направлением вращения колеса кристаллизатора. При начальных условиях скорость движения расплава во всем объеме была принята равной нулю. На рисунке 2.38 приведены соответственно характер течения расплава в жидкой фазе для разных моментов времени и зависимость средней скорости движения расплава от времени работы индуктора.



Рисунок 2.38 - Характер движения расплава в жидкой фазе для разных моментов времени (*а*) и зависимость средней скорости движения расплава в жидкой фазе от времени (*б*)

Время переходного процесса после пуска составляет порядка 0,5 с, при этом средняя скорость движения расплава имеет значения 0,47 м/с. В жидкой фазе создается ярко выраженная одноконтурная циркуляция расплава в зоне под индуктором. В локальной зоне под индуктором скорость течения может достигать 3 м/с. Скорость движения расплава резко падает после выхода потока из зоны под индуктором и в дальнейшем поток разворачивается и замыкается по дну жидкой

фазы (образуется противопоток). Такое поведение можно связать с геометрией жидкой сердцевины слитка: площадь поперечного сечения постоянно уменьшается по мере его удаления от литейной машины. При этом поток расплава разгоняется в зоне под индуктором, но из-за изменения площади поперечного сечения жидкой фазы слитка весь объем потока не может пройти в глубину жидкой фазы и поэтому ему приходится разворачиваться и замыкаться в противоток. В связи с этим необходимо провести исследования влияния режимов работы электромагнитного модификатора на характер и распределение течений по длине жидкой фазы.

На рисунке 2.39 приведены картины характеры и скорости движения расплава в жидкой фазе слитка при разных углах скоса обмотки и зубцов индуктора.

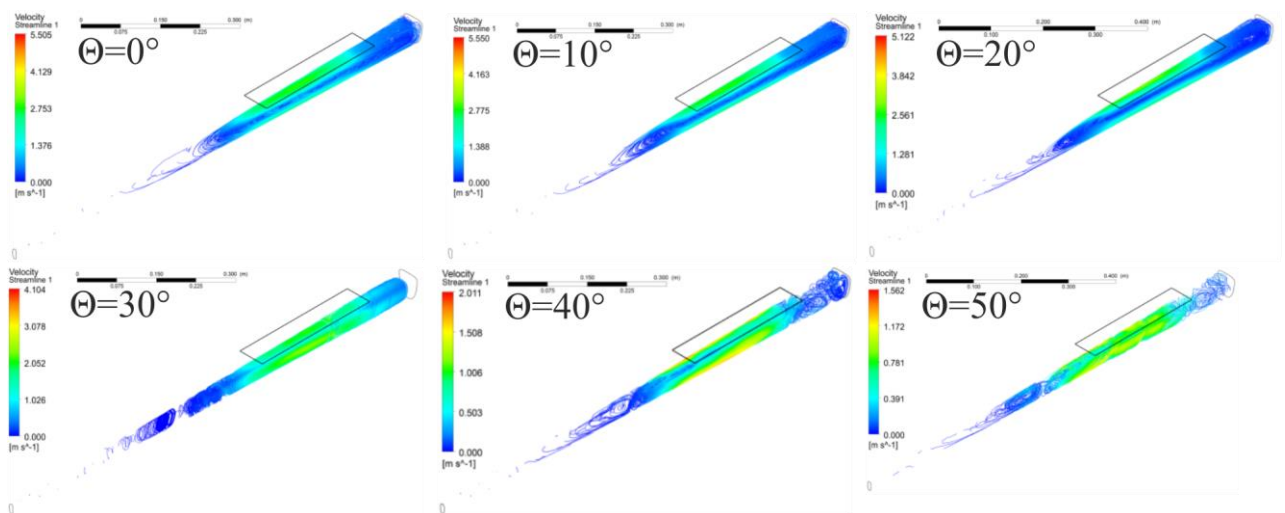


Рисунок 2.39 - Характер и скорости движения расплава в жидкой фазе при различных углах скоса обмоток и зубцов индуктора

На рисунке 2.40 приведена зависимость средней скорости движения расплава в жидкой фазе слитка от угла скоса обмотки и зубцов индуктора. При угле скоса в 0 град. в жидкой сердцевине слитка образуется одноконтурное течение металла под индуктором. При этом интенсивность течения резко падает при удалении от индуктора и уже на расстоянии 0,1 м от края индуктора средняя

скорость течения металла составляет менее 0,1 м. При изменении угла скоса, уже начиная с 20 град., течение становится винтовым и далее при увеличении угла более 30 град. эффективность воздействия падает. Это связано с уменьшением величины полюсного деления, что приводит к худшему проникновению поля внутрь слитка. Таким образом, использование индуктора со скосом зубцов и паза в диапазоне от 20 до 30 град. обеспечивает равномерное течение по границе раздела фаз, но в связи дугообразной формой самого индуктора данное решение сложно практически реализовать с конструкторской точки зрения. Поэтому в дальнейшем будет рассматриваться индуктор без скоса зубцов и катушек.

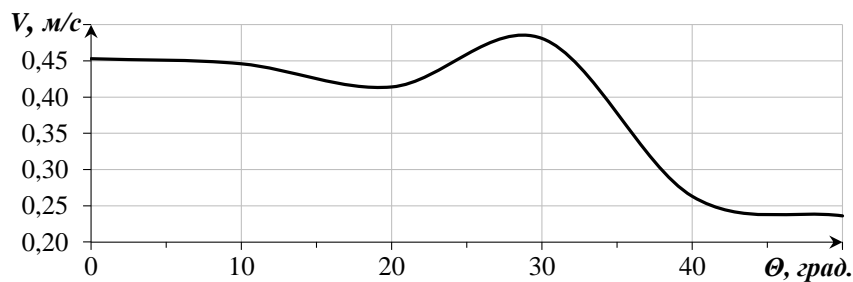


Рисунок 2.40 - Средняя скорость движения расплава в жидкой фазе слитка при разных углах скоса обмоток и зубцов индуктора

Первоначальное ориентирование на индуктор длиной 0,3 м было вызвано возможностью его монтажа на литейную машину с минимальными переделками последней. Результаты моделирования показывают наличие эффективного перемешивания в жидкой фазе слитка, расположенного непосредственно под индуктором. Это является недостаточным, т. к. длина жидкой фазы может достигать величины до 1,5 м. В связи с этим было принято решение об увеличении размера индуктора для возможности эффективного перемешивания всей жидкой фазы. Из-за этого при его установке на литейную машину будет необходимо сместить охладители кристаллизатора дальше по направлению вращения колеса.

В результате решения задачи были получены картины течений расплава в жидкой фазе слитка, используя модель турбулентности $k-\omega$ для разных схем соединения обмотки индуктора (рисунок 2.41). Электромагнитное поле создает одноконтурную или двухконтурную циркуляцию расплава вытянутую по длине жидкой фазы.

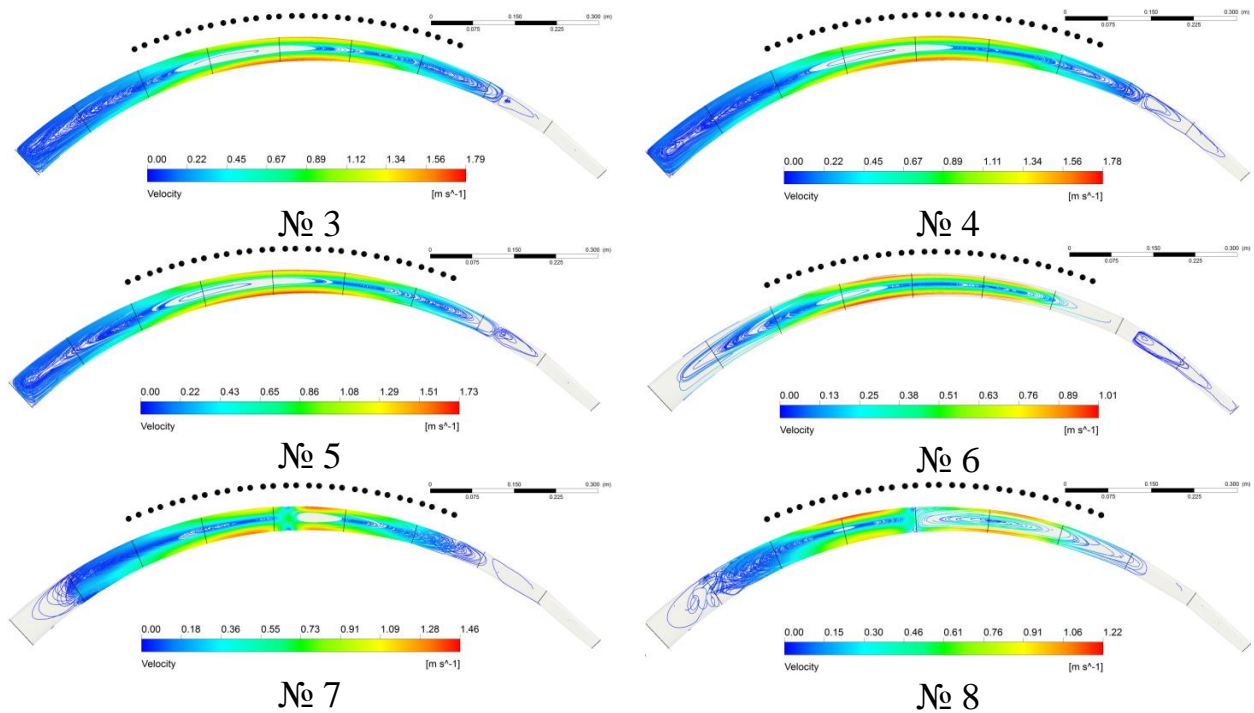


Рисунок 2.41 - Распределение поля скоростей расплава в жидкой фазе слитка для разных схем включения обмотки индуктора

На рисунке 2.42 приведены картины распределения скоростей в жидкой фазе слитка при разных схемах включения обмотки, полученные для модели турбулентности $k-\omega$; по оси абсцисс отложены градусы вертикально от оси колеса кристаллизатора. На графике двумя чертами обозначены начало и конец индуктора модификатора. Для всех схем включения характерно, что средняя по объему жидкой фазы скорость движения расплава лежит в диапазоне от 0,3 до 0,6 м/с, а максимальная скорость потока не превышает 2 м/с. Характерно, что, как и для машины длиной 300 мм, так и для машины длиной 600 мм интенсивное

течение наблюдается непосредственно под индуктором. Наилучшее распределение скоростей обеспечивают двухполюсные схемы № 3 и № 5. Четырехполюсная схема № 6 создает существенно менее интенсивное течение расплава под индуктором. Схемы № 7 и № 8, создающие два бегущих магнитных поля и двухконтурную циркуляцию расплава, не дают никаких преимуществ.

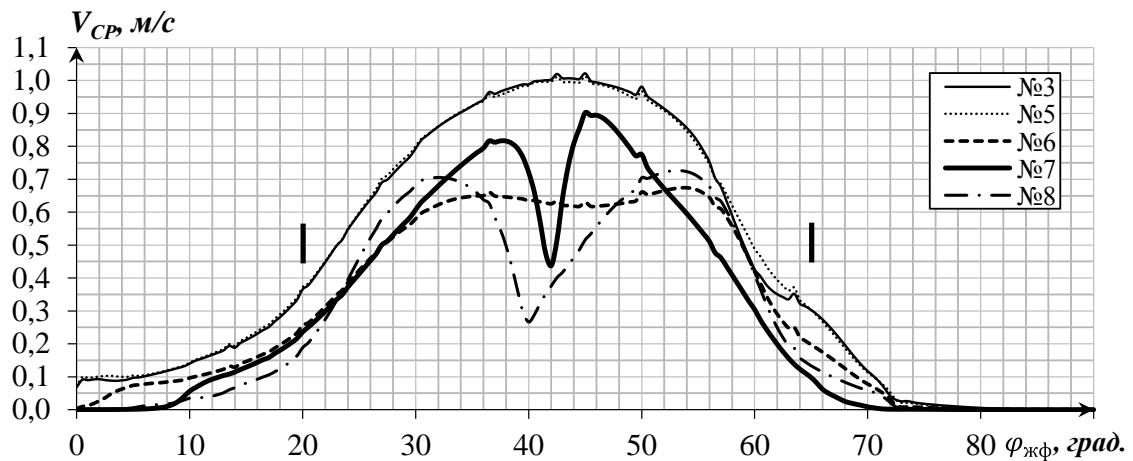


Рисунок 2.42 - Распределение средней скорости движения расплава по длине жидкой фазы слитка для разных схем включения обмотки индуктора

Направление движения бегущего поля и увеличение частоты питающего тока свыше 20 Гц (рисунок 2.43, а) не оказывает существенного влияния на характер и интенсивность течений. При частоте свыше 40 Гц происходит снижение скорости течения расплава. Направление движения бегущего магнитного поля против вращения колеса обеспечивает меньшие скорости течения расплава в зонах, расположенных не под индуктором (рисунок 2.43, б). Увеличение величины тока в индукторе (рисунок 2.43, в) обеспечивает рост скорости течения расплава в зоне под индуктором. При увеличении тока свыше 50 А существенного роста скорости течений расплава в начале жидкой фазы не наблюдается. Рост тока не обеспечивает создания течений расплава в зоне свыше 10 град. от края индуктора до конца жидкой фазы. Данной зоной можно

пренебречь, так как на нее приходится менее 10 % от общего объема кристаллизующегося расплава, которые также зависят от параметров литья.

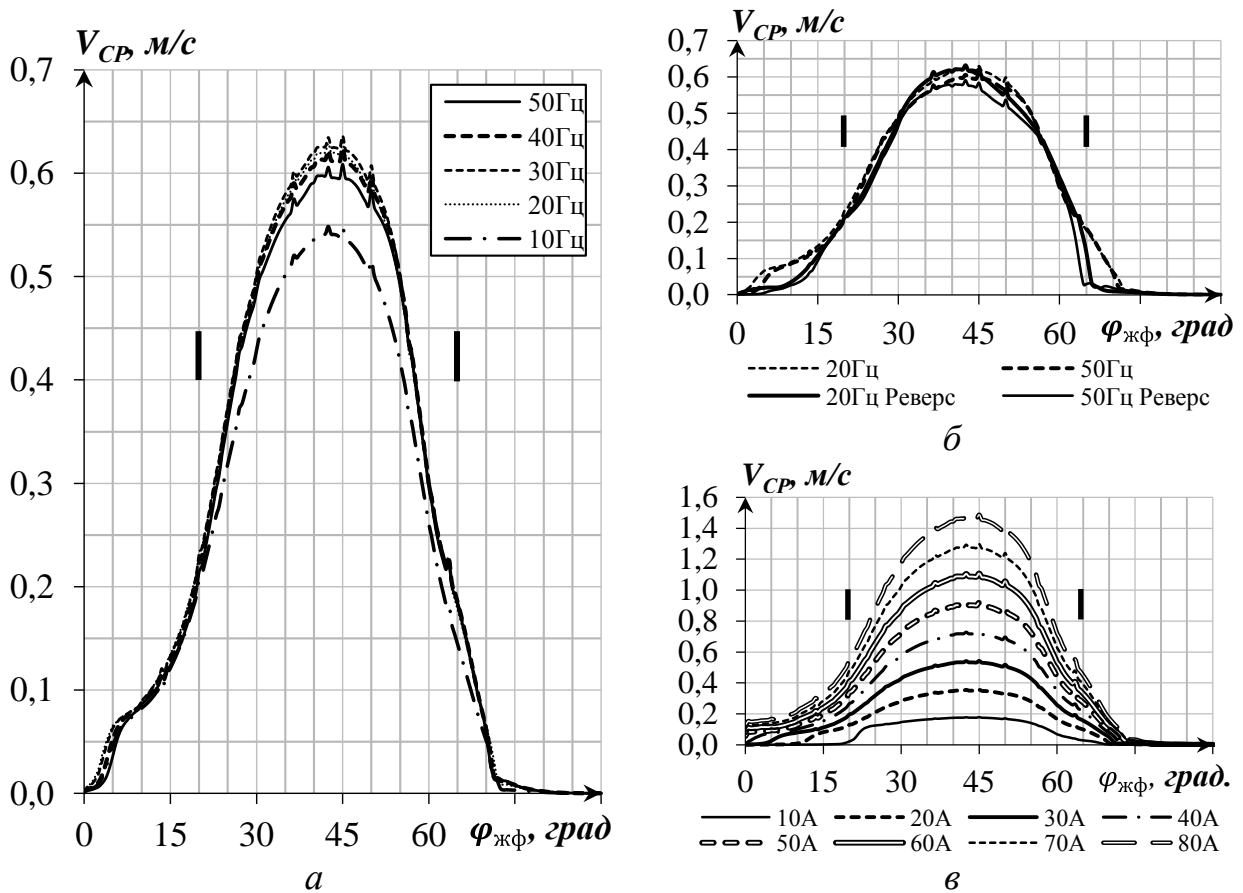


Рисунок 2.43 - Распределение средней скорости движения расплава по длине жидкой фазы слитка для разных значений частоты питающего тока (*a*), направления движения бегущего поля (*б*) и величины питающего тока (*в*)

Влияние скорости течения на процесс кристаллизации предложено оценивать через число Рейнольдса, характеризующее степень турбулентности течения и как следствие интенсивность теплообмена. Для этого выполнен гидродинамический расчет, используя модель турбулентности *LES*, и получены картины течений расплава (рисунок 2.44).

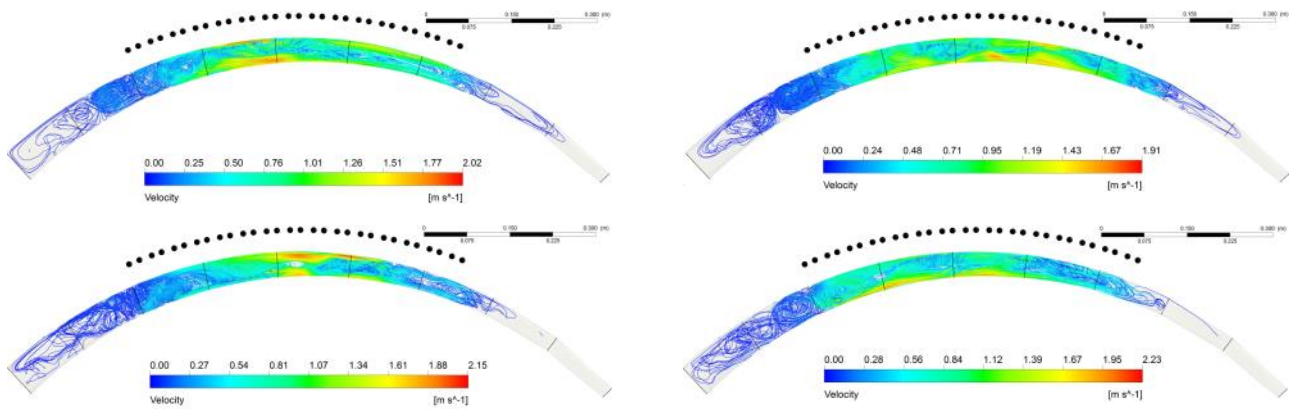


Рисунок 2.44 - Распределение поля скоростей расплава в жидкой фазе слитка в разные моменты времени для схемы включения № 5 и использование модели турбулентности *LES*

На основании полученных средних значений мгновенных скоростей v_{cp} по длине жидкой фазы для разных моментов времени рассчитаны числа Рейнольдса по формуле:

$$Re = \frac{\rho v_{cp} l_x}{\eta}, \quad (2.52)$$

где η - динамическая вязкость, кг/(м·с);

$l_x = \frac{2}{\pi} \sqrt{S_{\phi i} / 2}$ - характерный размер, определяемый как диаметр окружности, площадь которой равна половине площади поперечного сечения слитка на угле ϕi , м.

На рисунке 2.45, б приведены значения чисел Рейнольдса по длине жидкой фазы для разных моментов времени. Значение Re свыше 2000 наблюдается в зоне от 10 до 70 град. и достигает 52 000, что говорит о высокой турбулентности течений по длине жидкой фазы.

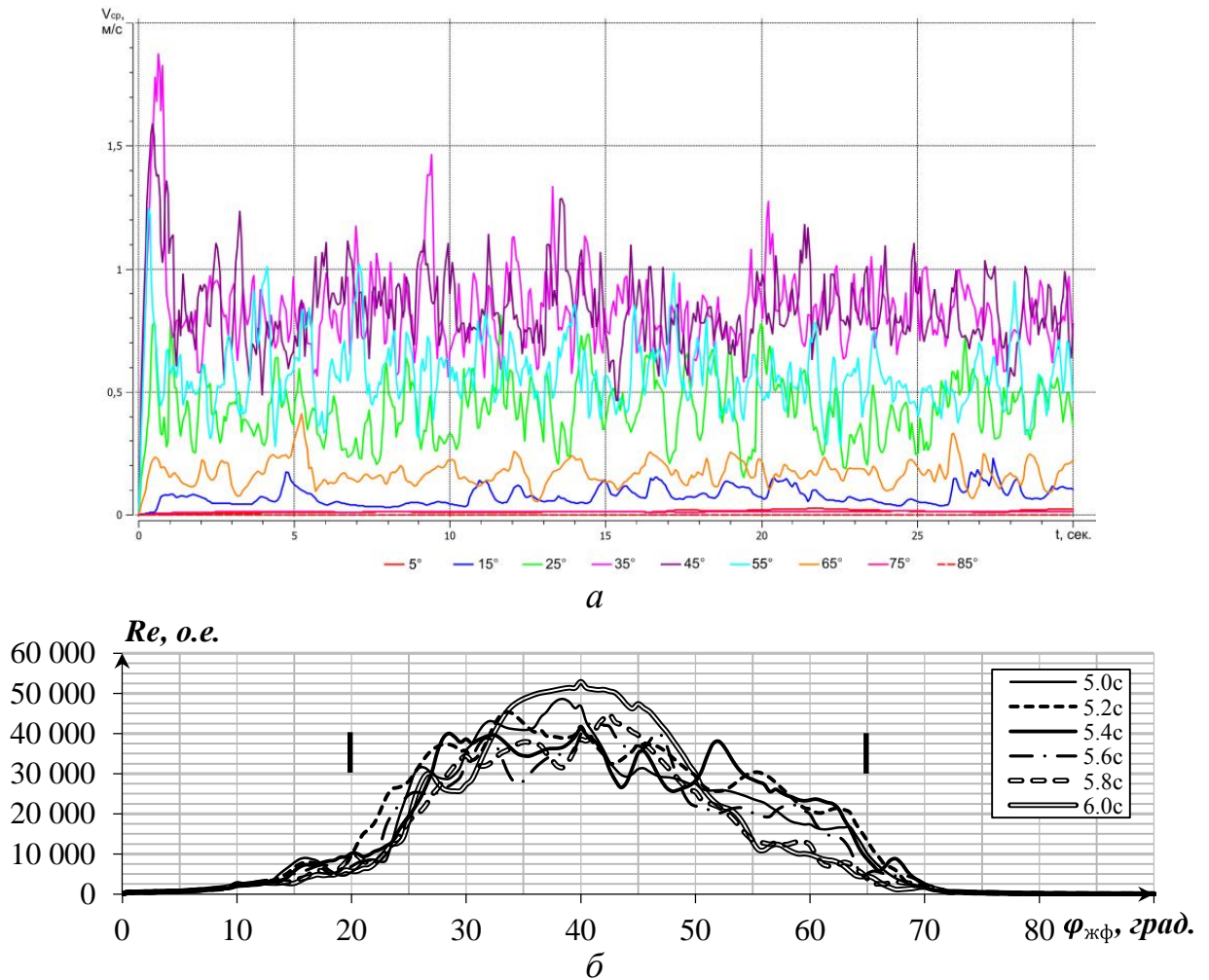


Рисунок 2.45 - Значения скоростей расплава в жидкой фазе в разные моменты времени

2.4 Выводы по главе 2

1. Разработанный алгоритм вычислительного процесса и математические модели для анализа сопряженных электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в кристаллизующемся слитке позволили получить дифференциальные и интегральные характеристики системы «индуктор – кристаллизатор – слиток».

2. Проведена предварительная оценка протекающих в системе термогидродинамических и электромагнитных процессов, с помощью критериев подобия, и приняты основные допущения моделей. Из анализа значений чисел подобия следует, что в системах электромагнитное поле будет оказывать существенное влияние на движение расплава, при этом обратное влияние будет несущественным.

3. Численный анализ физических процессов позволил: определить геометрию жидкой фазы слитка и влияния на нее технологических параметров литья; оценить влияние ферромагнитных свойств магнитопровода индуктора и стальной ленты литейной машины на процесс преобразования энергии; определить диапазон частот от 15 до 30 Гц, обеспечивающий наиболее эффективное воздействие на жидкую фазу слитка.

4. Полученные на основании математического моделирования картины гидродинамических течений в жидкой фазе слитка позволили определить схемы включения обмотки индуктора и режимы его работы. Установлено, что одноконтурная циркуляция расплава обеспечивает наилучшее проникновение гидродинамических течений по длине жидкой фазы.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЖИДКУЮ СЕРДЦЕВИНУ СЛИТКА

3.1 Задачи и постановка эксперимента

Целью настоящего исследования является разработка электромагнитного модификатора слитка в роторной литейной машине. Во второй главе решались задачи математического моделирования процесса кристаллизации, процесса распределения электромагнитного поля от индуктора в кристаллизующийся слиток и процесса возникновения течений в жидкой сердцевине слитка. В результате решения первой задачи определялась граница между жидкой и твердой фазами слитка в зависимости от скорости движения литейного колеса и условий охлаждения. Решение второй задачи позволяет определить дифференциальные и интегральные электромагнитные характеристики системы «индуктор – кристаллизатор – слиток». Важными дифференциальными характеристиками являются объемные электромагнитные силы в жидкой сердцевине слитка. Именно эти силы формируют структуру течений в жидкой сердцевине слитка, омывают границу кристаллизации и влияют на структуру получаемого слитка. Поскольку источником электромагнитного поля в системе является индуктор, то его геометрические размеры и параметры (полюсное деление, число полюсов и т. д.), а также режимы работы (токовая нагрузка, частота тока и т. д.) определяют картину распределения электромагнитных сил и в конечном итоге эффективность электромагнитного воздействия. Оценкой эффективности является структура закристаллизованного слитка, которая не определялась при математическом моделировании. В связи с этим важной задачей экспериментальных исследований является связь между факторами воздействия и результатом – структурой. По

анализу структур слитков, полученных в результате экспериментов при определенных режимах работы индуктора, и результатов математического моделирования косвенно возможно судить о достаточности электромагнитного воздействия.

Кроме этого при расчете индуктора были определены размеры магнитопровода, число витков, сечение и распределение катушек, схем соединения, активного реактивного и полного сопротивления фаз, величин потребляемых мощностей. В процессе эксперимента необходимо проверить достоверность результатов расчета как дифференциальных, так и интегральных характеристик.

Создание лабораторной установки, точно повторяющей процесс литья в роторной литейной машине, связано с большими материальными затратами [4]. Поэтому была разработана лабораторная установка с отличиями, представленными в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Отличия лабораторной установки от роторной литейной машины

№	Роторная литейная машина	Лабораторная установка
1	Непрерывный режим работы. Расплав непрерывно поступает в литейную машину, кристаллизуется и выходит в виде слитка на последующую механическую обработку	Кратковременный режим работы. Расплав заливается в изложницу, кристаллизуется и извлекается из изложницы
2	Кристаллизатор состоит из медного банджа с толщиной стенок от 10 до 25 мм и стальной ленты расположенной поверх банджа	Кристаллизатор реализован в виде изложницы, выполненной из нержавеющей стали с толщиной стенок 3 мм
3	Охлаждение слитка осуществляется косвенным способом путем подачи воды на кристаллизатор	Охлаждение слитка осуществляется путем естественной конвекции с возможностью подачи сжатого воздуха
4	Зона кристаллизации слитка имеет изгиб по литейному колесу	Изложница не имеет изгиба, расположена относительно земли под углом 45°
5	Расплав подается непрерывно, полностью заполняя полость	Заливка расплава осуществлялась через верх изложницы, в связи с чем струя

	кристаллизатора	металла в процессе заливки протекает по дну внутренней поверхности изложницы и постепенно заполняет изложницу
6	Форма поперечного сечения слитка представляет собой неравносторонний пятиугольник с площадью сечения 3200 мм^2	Поперечное сечение слитка имеет форму трапеции с основаниями 70 и 50 мм и высотой 55 мм. Площадь сечения 3200 мм^2

Несмотря на отличия лабораторной установки от промышленной литейной машины путем изменения параметров литья можно получить слитки со структурой, подобной структуре слитков, отливаемых на промышленной литейной машине. Общий вид лабораторной установки приведен на рисунке 3.1.

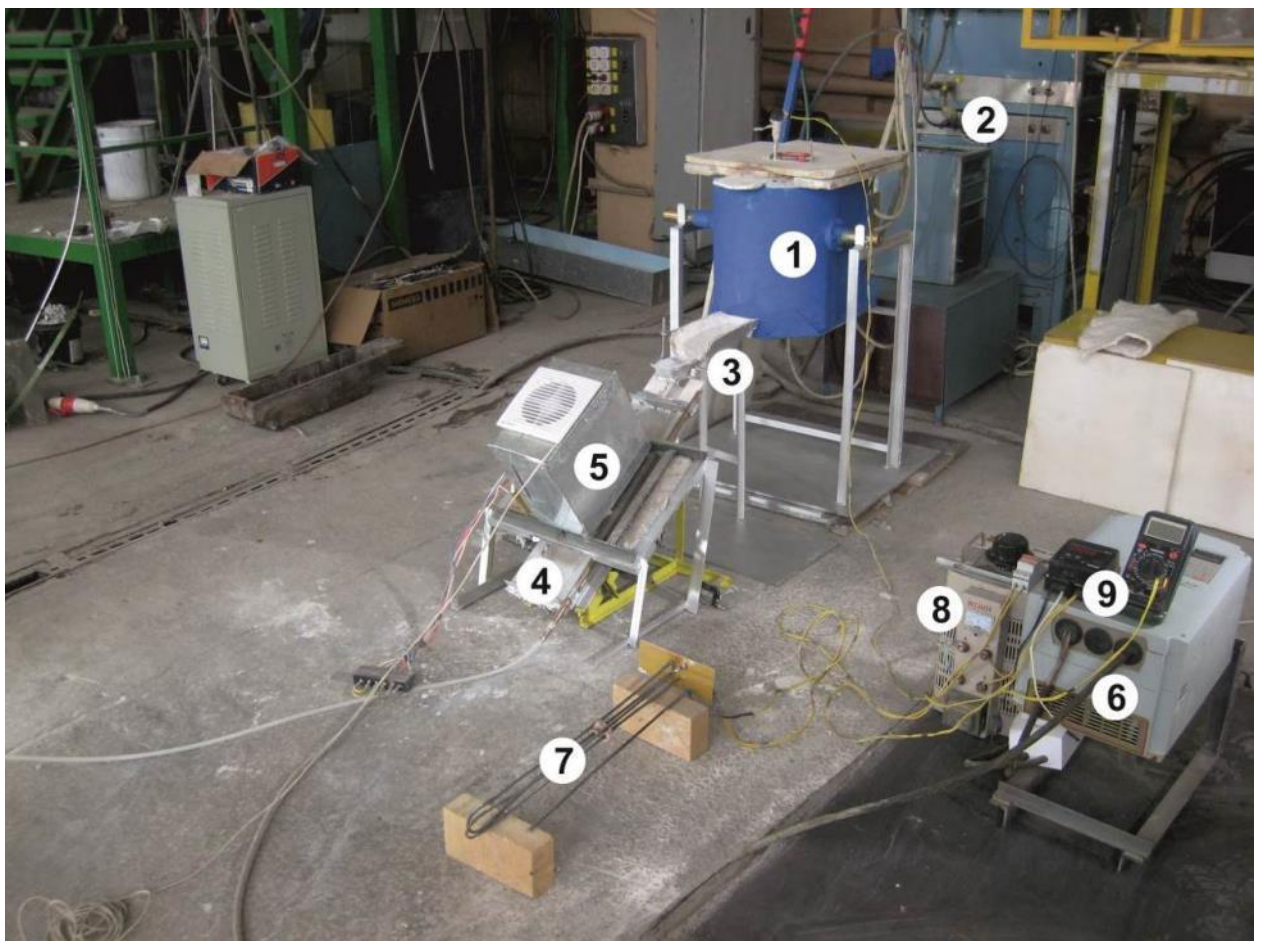


Рисунок 3.1 - Лабораторная установка с электромагнитным модификатором

Лабораторная установка состоит из тигельной печи 1, источника ее питания 2, лотка подачи расплава в изложницу 3, изложницы 4, индуктора электромагнитного модификатора, установленного на металлокаркасе с системой воздушного охлаждения 5, источника питания индуктора 6, устройства прогрева изложницы с термопарой 7, источника питания нагревателя 8 и измерительных устройств контроля температуры в печи и изложнице 9.

В установке используется индукционная тигельная печь объемом 10 литров косвенного нагрева с графитовым тиглем и частотой питающего тока 66 кГц (рисунок 3.2, *а*). Расплав из печи путем ее поворота подается через футерованный промежуточный лоток (рисунок 3.2, *б*) в изложницу. Для контроля температуры расплава в печи используется термопара, вмонтированная в крышку печи (рисунок 3.2, *в*). Крышка снимается перед литьем.

*а**б**в*

Рисунок 3.2 - Плавильная печь (*а*), промежуточный лоток (*б*) и печь с установленной крышкой и термопарой (*в*)

Изложница представляет собой разборную футерованную емкость,

состоящую из основания и крышки. Основание изложницы представляет собой сварную конструкцию, выполненную из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, образующую ванну длиной 650 мм трапецевидного сечения. Основание устанавливается на металлокаркас и образует угол в 45° относительно горизонтальной поверхности (рисунок 3.3, *а*). При этом для снижения тепловой деформации основание изложницы крепится на металлокаркасе при помощи болтового соединения только в верхней части. Крышка изложницы состоит из листа толщиной 3 мм (сталь 12Х18Н10Т) с ребрами жесткости и элементами системы прижима. Крышка устанавливается поверх основания изложницы (рисунок 3.3, *б*) и плотно прижимается к ней при помощи струбцин (рисунок 3.3, *в*). Для улучшения условий извлечения слитков внутренняя поверхность изложницы была покрыта тонким слоем футеровки на основе мела.

*а**б**в*

Рисунок 3.3 - Основание изложницы на металлокаркасе (*а*) с установленной (*б*) и закрепленной (*в*) крышкой

Индуктор физической модели электромагнитного модификатора (рисунок 3.4) представляет собой разомкнутый магнитопровод с семью зубцами и шестью катушечными группами со способом намотки катушек через ярмо магнитопровода [5]. Каждая катушечная группа состоит из двух двухслойных катушек, намотанных медной шиной 1,25 x 4 мм. Размеры индуктора приведены в таблице 3.2.

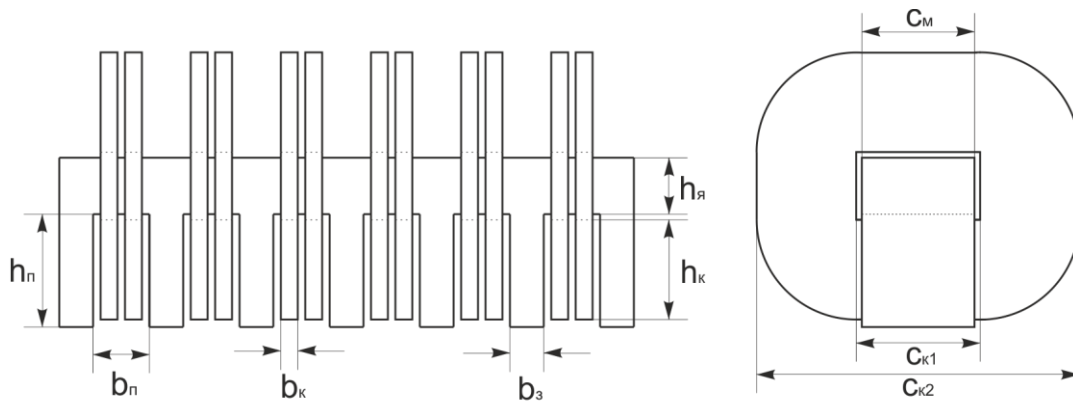


Рисунок 3.4 - Геометрия и размеры индуктора физической модели

Таблица 3.2 - Параметры геометрии расчетной модели

Параметр	Значение
Ширина зубца ($b_з$)	18 мм
Ширина паза ($b_п$)	30 мм
Глубина паза ($h_п$)	60 мм
Толщина катушки ($b_к$)	9 мм
Высота катушки ($h_к$)	53 мм
Высота ярма ($h_я$)	30 мм
Толщина магнитопровода ($c_м$)	60 мм
Внутренняя ширина катушки ($c_к1$)	66 мм
Внешняя ширина катушки ($c_к2$)	172 мм

Индуктор устанавливается на собственном металлокаркасе (рисунок 3.5, а) таким образом, чтобы его активная часть была обращена вниз и относительно горизонтальной поверхности образовывала угол 45° (рисунок 3.5, б). Активная зона индуктора накрывается пластиной стеклотекстолита толщиной 1,5 мм, поверх которой расположен слой теплоизоляции толщиной 5 мм из каолиновой ваты. Слой теплоизоляции предназначен для защиты индуктора от перегрева, вызванного тепловым потоком, идущим от изложницы. Для охлаждения индуктора поверх него устанавливается короб с вентилятором (рисунок 3.5, в).

Величина немагнитного зазора между активной поверхностью индуктора и расплавом в изложнице изменяется вплоть до минимального значения равного 8 мм путем перемещения индуктора относительно изложницы. На катушки индуктора подается трехфазное напряжение. При этом катушки соединены по схеме $AZBXCY$, что обеспечивает двухполюсную работу машины ($2p = 2$) с $\beta = 60^\circ$.

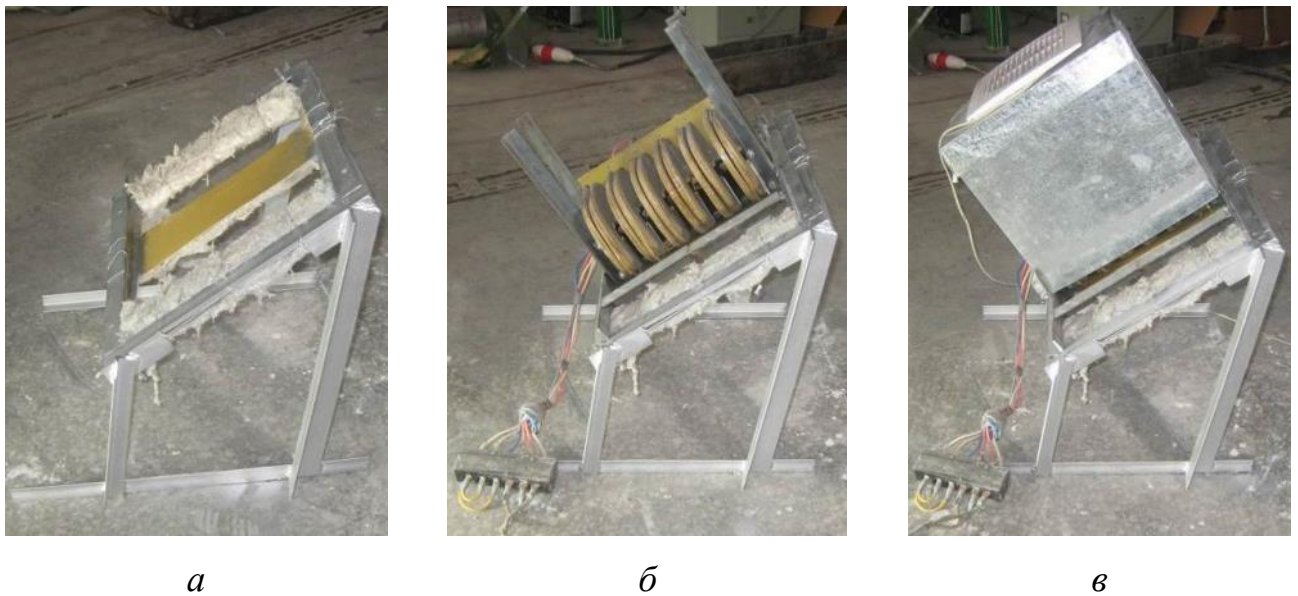


Рисунок 3.5 - Металлокаркас индуктора с теплоизоляцией (а) с установленным индуктором (б) и с системой охлаждения (в)

Для предварительного прогрева изложницы используется электронагреватель мощностью 2 кВт (рисунок 3.6, а), устанавливаемый внутри изложницы. Контроль температуры внутри изложницы осуществляется термопарой, установленной в нагревателе. Перед началом заливки термопара и нагреватель извлекаются через заливочное отверстие. Для изменения величины теплоотвода с крышки изложницы на ней устанавливается медная трубка с форсунками (рисунок 3.6, б) через которую подается сжатый воздух для обдува крышки.

*а**б*

Рисунок 3.6 - Электронагреватель для прогрева изложницы (*а*) и устройство для подачи сжатого воздуха (*б*)

Контроль температур расплава в печи и в изложнице осуществляется с помощью двух хромель-алюмелевых термоэлектрических преобразователей (рисунок 3.7). Первый преобразователь был помещен в чехол из жаропрочной стали 12Х18Н10Т. Второй преобразователь, предназначенный для измерения температуры расплава в печи, был помещен в защитный чехол из стекловолокна и футеровки.

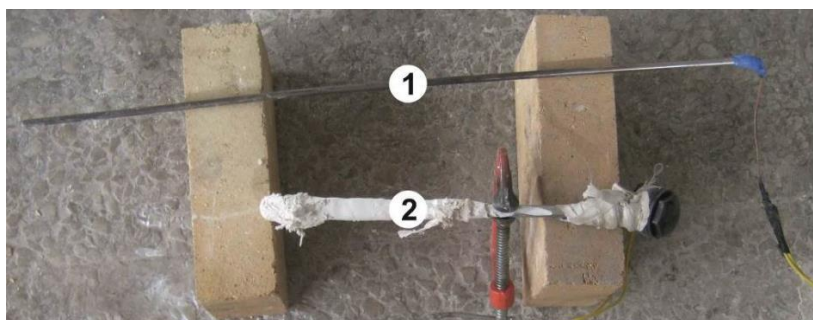


Рисунок 3.7 - Термоэлектрические преобразователи для контроля температуры внутри изложницы (*1*) и внутри печи (*2*)

Индуктор электромагнитного модификатора запитывается от трехфазного транзисторного источника питания «ВЕСПЕР EI-9011-025Н» (рисунок 3.8). В источнике питания используется векторная система управления, что позволяет регулировать величины подаваемого напряжения в диапазоне от 0 до 500 В и частоты тока в диапазоне от 0 до 400 Гц. Ток на нагреватель изложницы подается через однофазный автотрансформатор марки «РЕСАНТА АОСН 40А». Снятие значений температуры с термоэлектрических преобразователей осуществляется через измеритель «ОВЕН ТРМ-1» и мультиметр «S-line M890G» (рисунок 3.8).

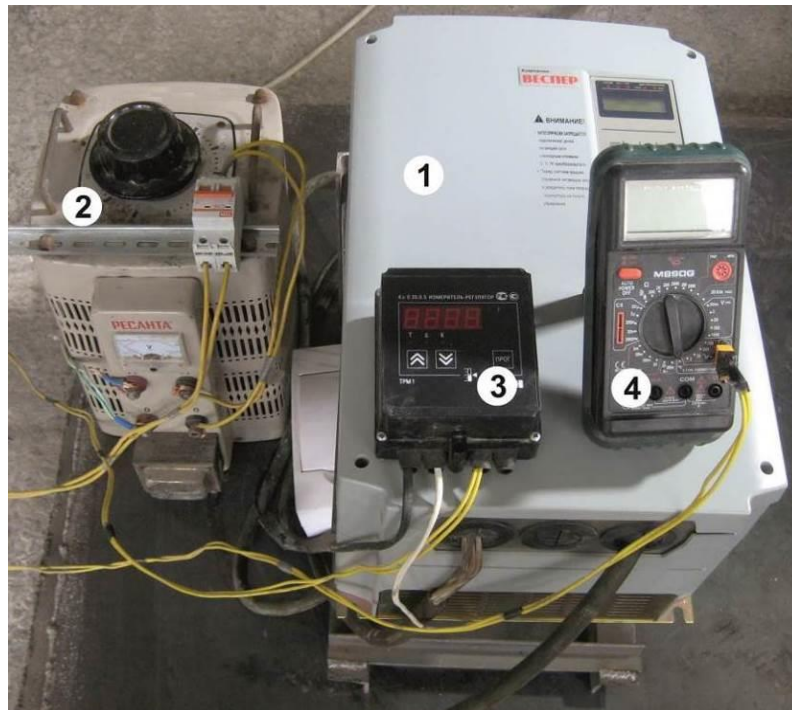


Рисунок 3.8 - Источники питания и средства измерения: 1 – источник питания ВЕСПЕР EI-9011; 2 – однофазный автотрансформатор АОСН; 3 – измеритель-регулятор ТРМ-1; 4 – мультиметр М890G

3.2 Методика проведения экспериментов и параметры литья

Лабораторная установка, подготовленная к литью, показана на рисунке 3.1. Промежуточный лоток максимально приближен к печи. Изложница установлена таким образом, чтобы ее заливочное отверстие находилось под сливным отверстием промежуточного лотка. Индуктор электромагнитного модификатора находится над изложницей. Величина зазора между индуктором и изложницей выставлялась путем изменения выдвижения регулирующей планки, смонтированной на металлокаркасе индуктора, которая при установке индуктора поверх изложницы упиралась в металлокаркас изложницы.



Рисунок 3.9 - Лабораторная установка при прогреве изложницы (элементы установки разнесены, нагреватель установлен в изложницу)

Малые величины зазора между индуктором и изложницей, а также окна доступа к внутренней полости изложницы для установки теплоизоляции и электронагревателя привели к необходимости разнесения элементов установки для предварительного прогрева (рисунок 3.9). Операции по сборке/разнесению элементов лабораторной установки выполнялись вручную. На выполнение данных операций затрачивалось порядка 20 с, что существенно не влияло на изменение температуры изложницы, прогретой перед литьем. Перед началом проведения экспериментов выполняется ряд операций по подключению установки к системам электропитания и подачи сжатого воздуха.

Методика проведения экспериментов на лабораторной установке для отливки одного слитка подразумевала выполнение следующих последовательных операций, приведенных в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Стадии и операции по проведению экспериментов

Стадия	Операции
1. Подготовка установки	<ul style="list-style-type: none"> – Обработка изложницы футеровочным составом. Сушка; – Сборка изложницы. Визуальная проверка изложницы на герметичность; – Установка элементов лабораторной установки в режим прогрева изложницы; – Установка электронагревателя внутрь изложницы; – Накрытие изложницы теплоизоляционным материалом; – Ввод параметров работы источника питания (в соответствии с программой экспериментов)
2. Подготовка расплава и температурных режимов	<ul style="list-style-type: none"> – Плавка металла в печи; – Прогрев изложницы до рабочей температуры (в соответствии с программой экспериментов); – Нагрев металла до температуры литья (в соответствии с программой экспериментов);

3. Подготовка к литью	<ul style="list-style-type: none"> – Извлечение электронагревателя, снятие теплоизоляционного материала; – Установка изложницы в положение литья; – Установка индуктора над изложницей (в соответствии с программой экспериментов); – Установка на крышке изложницы устройства для подачи сжатого воздуха
4. Литье	<ul style="list-style-type: none"> – Снятие крышки печи с термопарой; – Заливка расплава в изложницу до полного заполнения; – Обдув крышки изложницы сжатым воздухом (в соответствии с программой экспериментов); – Подача напряжения на индуктор, включение вентилятора охлаждения. Осуществление электромагнитного воздействия до полной кристаллизации расплава (в соответствии с программой экспериментов)
5. Извлечение слитка	<ul style="list-style-type: none"> – Разнесение элементов лабораторной установки в позицию для прогрева изложницы; – Разборка изложницы и извлечение слитка

Эксперименты на лабораторной установке проводятся в два этапа:

- на первом этапе проводятся экспериментальные плавки с целью определения параметров литья на лабораторной установке, позволяющей получить слитки со структурой, подобной структуре слитков, отливаемых на промышленной роторной литейной машине;

- на втором этапе были отлиты слитки с электромагнитным воздействием при различных параметрах литья, приведённых в таблице 3.4. Для достоверности результатов экспериментов для каждой выбранной совокупности параметров литья осуществлялась отливка и анализ трех слитков.

Время электромагнитного воздействия выбрано следующим образом: в ходе первых экспериментов по литью визуально установлено, что время образования усадочной раковины с момента полной заливки изложницы составляло от 180 до 300 с в зависимости от скорости охлаждения. В связи этим для экспериментов время работы электромагнитного модификатора принято в 300 с.

Таблица 3.4 - Технологические параметры литья

№	Параметр литья	Размерность	Значение
1	Температура расплава	°С	700
2	Температура изложницы	°С	450
3	Сила тока	А	5 / 10 / 15 / 20 / 25
4	Частота тока	Гц	10 / 20 / 30 / 50 / 70 / 100
5	Время охлаждения верхней части изложницы после заливки	с	от 0 до 300
6	Время электромагнитного воздействия	с	300
7	Время заливки расплава в изложницу	с	20
8	Направление движения поля	–	вверх / вниз
9	Теплоизоляция основания изложницы	–	есть / нет
10	Теплоизоляция верхней части изложницы	–	есть / нет
11	Момент включения электромагнитного модификатора	–	перед заливкой / после заливки / после заливки с выдержкой времени на охлаждение верхней части изложницы

Эксперименты проводились на алюминиевом сплаве марки А5Е, предназначенном для изготовления электротехнической продукции. Температура плавления данного сплава составляет 660 °С.

После извлечения и остывания слитка производятся операции по извлечению и подготовке темплетов для выполнения макроанализов структуры. С

каждого слитка берутся четыре образца согласно схеме раскройки, приведенной на рисунке 3.10. За точку отсчёта принято место слитка, относительно которого находится середина индуктора.

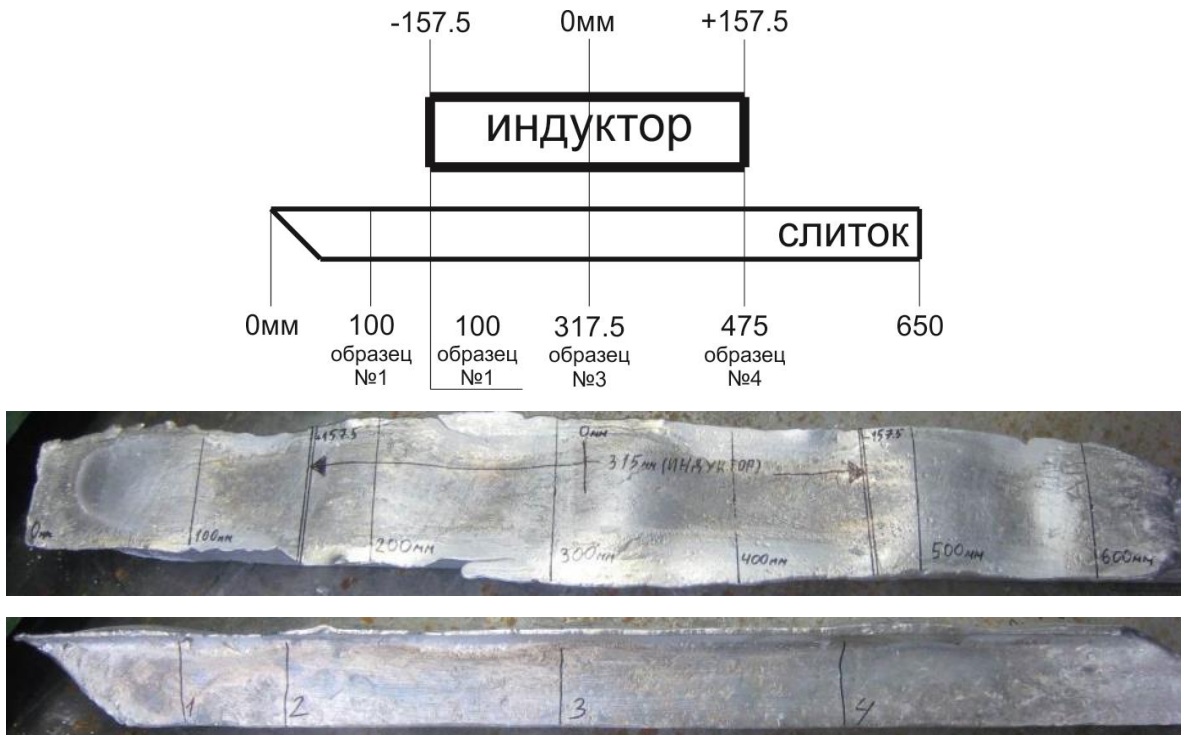


Рисунок 3.10 - Схема взятия образцов макроструктуры слитка относительно индуктора модификатора

Для исключения возможности перегрева места реза и рекристаллизации структуры разделка слитков осуществлялась на лентопильном станке с подачей охлаждающей жидкости в зону реза.

Подготовка поверхности темплетов для травления осуществлялась в несколько этапов. На первом этапе осуществлялась последовательная обработка поверхностей с помощью угловой шлифовальной машины абразивным кругом с зернистостью 80. После осуществлялась обработка поверхности с помощью эксцентриковой шлифовальной машины дисками с зернистостью 100, 150, 240 и 320. Травление темплетов для выявления макроструктуры осуществлялось

следующим образом: сначала темплет обрабатываемой поверхностью на 120 с опускался в 20 % водный раствор щелочи NaOH, после чего в травимую поверхность втирался водный раствор 50 % HCl, 25 % HNO₃, 12,5 % HF.

Сравнение макроструктур слитков, полученных на лабораторной установке, производилось с эталонным образцом слитка, полученного на промышленной роторной литейной машине. Образцы эталонной макроструктуры представлены на рисунке 3.11. В начале литья слиток имеет мелкозернистую структуру (рисунок 3.11, а), связанную с высокими скоростями охлаждения из-за непрогретости литейной машины. В процессе выхода литейной машины на рабочие температурные режимы размер зерна существенно увеличивается (рисунок 3.11, б). Эталонный слиток имеет схожую структуру со слитками, полученными на литейных машинах производства *Continuus-Properti S.p.A.* [90].



а



б

Рисунок 3.11 - Макроструктуры промышленных слитков в начале (а) и в конце (б) прогрева кристаллизатора роторной литейной машины перед подачей слитка в прокатный стан

Эталонная макроструктура по периферии, прилегающей к медному бандажу на глубину до 10 мм, имеют мелкозернистую структуру. Это можно объяснить высокими скоростями охлаждения. Ближе к центральной части слитка мелкозернистая структура переходит в зону столбчатых кристаллов.

3.3 Результаты экспериментов

Первоначальные эксперименты показали, что при заливке расплава в непрогретую изложницу происходит его быстрая кристаллизация, в связи с чем электромагнитное воздействие было неэффективно. При прогреве изложницы до температуры 450 °С и последующей заливке расплава скорость кристаллизации значительно снизилась, благодаря чему в слитке образовались крупные столбчатые кристаллы. При этом в начале слитка присутствовала мелкозернистая зона, так как в начале кристаллизации изложница еще обладает возможностью интенсивно аккумулировать тепло.

Путем подбора параметров степени прогрева изложницы и интенсивности ее охлаждения после заливки были получены слитки со структурой, аналогичной промышленным слиткам (рисунок 3.12, а). При данных параметрах охлаждения были отлиты все экспериментальные слитки. Многократное литье слитков при заданных параметрах литья и режимах работы электромагнитного модификатора подтвердило воспроизводимость структуры слитка.



Рисунок 3.12 - Макроструктуры слитков

При заливке металла в прогретую изложницу и включении электромагнитного модификатора непосредственно после заливки полученный

слиток имел серьезный дефект верхней поверхности, вызванный интенсивным течением металла вдоль поверхности и постоянным разрушением окисной пленки, т. е. происходило интенсивное образование оксидов. При таком проведении экспериментов жидкая сердцевина у слитка не образовывалась, т. к. верхняя часть слитка была все время в жидком состоянии (рисунок 3.12, б). Проявление данного эффекта на промышленной установке недопустимо, т. к. ведет к интенсивному окислению сплава и замешиванию окислов внутрь слитка, т. е. браку продукции. Для исключения данного дефекта после заливки осуществлялся обдув верхней части изложницы сжатым воздухом, перед включением электромагнитного модификатора. Экспериментально было установлено, что размытие верхней части слитка было слабо выражено при времени обдува более 20 с и отсутствовало при времени обдува более 40 с.

Наилучшего измельчения зерна в слитке удалось добиться при одновременном электромагнитном воздействии с обдувом верхней поверхности слитка, из чего можно сделать вывод о необходимости подбора оптимальных параметров интенсивности перемешивания и охлаждения верхней части слитка под модификатором на промышленной установке, при которых толщина закристаллизовавшегося металла в верхней части слитка будет минимальна. Это позволит электромагнитному полю эффективно проникать в жидкий расплав и исключает загрязнение слитка оксидами.

На рисунке 3.13 представлены образцы макроструктур слитков, отлитых при токе в индукторе 20 А с разной частотой. В отличие от промышленной установки, где происходит непрерывный процесс литья, в лабораторной установке происходит литье в форму, поэтому сравнение структур производится по центральным областям слитков (обозначены кругом). Из результата анализа структур следует, что увеличение частоты тока свыше 30 Гц не ведет к существенному измельчению структуры, а при частоте 100 Гц происходит укрупнение зерна, что можно связать с изменением глубины проникновения магнитного поля [80].



Без МГД воздействия



10 Гц



20 Гц



30 Гц



50 Гц



100 Гц

Рисунок 3.13 - Макроструктуры слитков при изменении частоты тока в индукторе

На рисунке 3.14 приведены структуры слитков, полученные при частоте 30 Гц и разной величине тока в индукторе. Из результата анализа структур следует, что увеличение величины тока свыше 20 А не ведет к существенному измельчению структуры. Структуры слитков при различных режимах литья и параметрах электромагнитного поля имеют качественное совпадение с результатами представленными в независимых источниках по исследованию процесса электромагнитного модифицирования на других литейных машинах [108, 109, 119, 120, 121].



Без МГД воздействия



5 А



10 А



15 А



20 А



25 А

Рисунок 3.14 - Макроструктуры слитков при изменении величины тока в индукторе

3.4 Сопоставление результатов физического и математического моделирования

В результате проведения экспериментальных исследований определены режимы работы индуктора физической модели, обеспечивающие измельчение кристаллической структуры слитка. Благодаря прямому геометрическому подобию физической модели промышленной литейной машине относительно поперечного сечения слитка полученные зависимости влияния частоты тока, питающего индуктор физической модели, на измельчение структуры слитка могут

использоваться при разработке промышленной установки. В отличие от этого влияние величины тока на измельчение кристаллической структуры зависит от конструкции и типа индуктора. Изменение тока в индукторе ведет к изменению величины электромагнитных сил, приложенных к жидкой фазе слитка. В связи с этим оценку изменения структуры слитка предложено построить в зависимости от развиваемых в жидкой фазе электромагнитных сил.

Таким образом, сопоставление результатов физического и математического моделирования производится путем установления зависимости изменения структуры слитка от величины приложенных к жидкой фазе электромагнитных сил. Для этого на лабораторной установке при частоте тока 30 Гц и величине тока от 5 до 30 А были отлиты слитки и выявлены их макроструктуры.

Путем математического моделирования были рассчитаны интегральные значения тангенциальных компонент векторов электромагнитных сил, развиваемых в жидкой фазе слитка при воздействии на нее индуктором лабораторной установки. Тангенциальная составляющая сил выбрана исходя из того, что она создает транзитное течение расплава в жидкой фазе слитка. На рисунке 3.15 представлена геометрия математической модели лабораторной установки и распределение удельных электромагнитных сил в жидкой фазе.

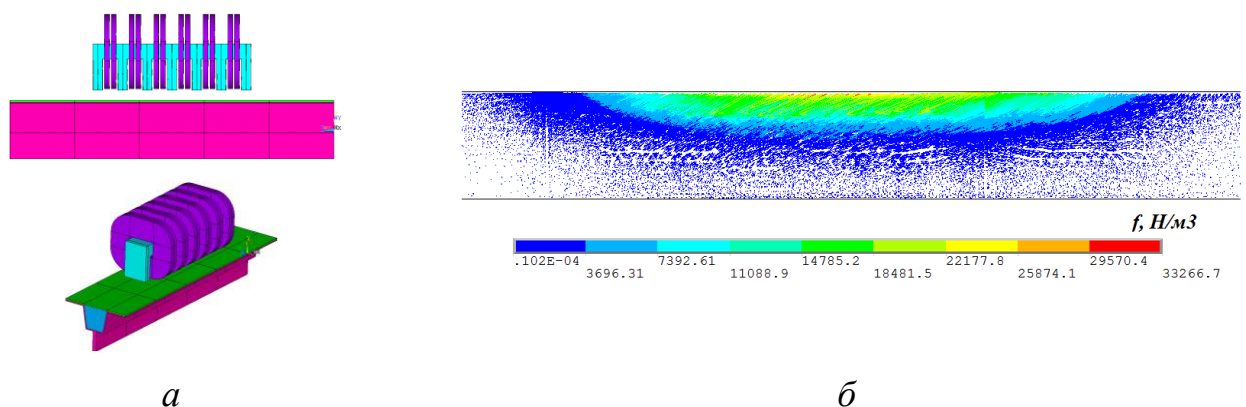


Рисунок 3.15 - Геометрия математической модели лабораторной установки (а) и распределение удельных электромагнитных сил в жидкой фазе (б)

Для сопоставления результатов было определено удельное значение электромагнитной силы на единицу длины индуктора по формуле:

$$f_{\tau} = \frac{F_{\tau}}{l_{\text{инд}}}, \quad (3.1)$$

где F_{τ} – полученная в результате математического моделирования тангенциальная компонента вектора электромагнитных сил в жидкой фазе, Н;

$l_{\text{инд}} = 0,3$ – длина индуктора лабораторной установки, м.

На основании значений удельных электромагнитных сил на единицу длины индуктора f_{τ} и полученных при этих значениях образцах макроструктур построена зависимость, представленная на рисунке 3.16. Увеличение электромагнитных сил до 7 Н/м приводит к существенному измельчению структуры слитка. Дальнейшее увеличение сил свыше 7 Н/м уже не приводит к заметному изменению макроструктуры.

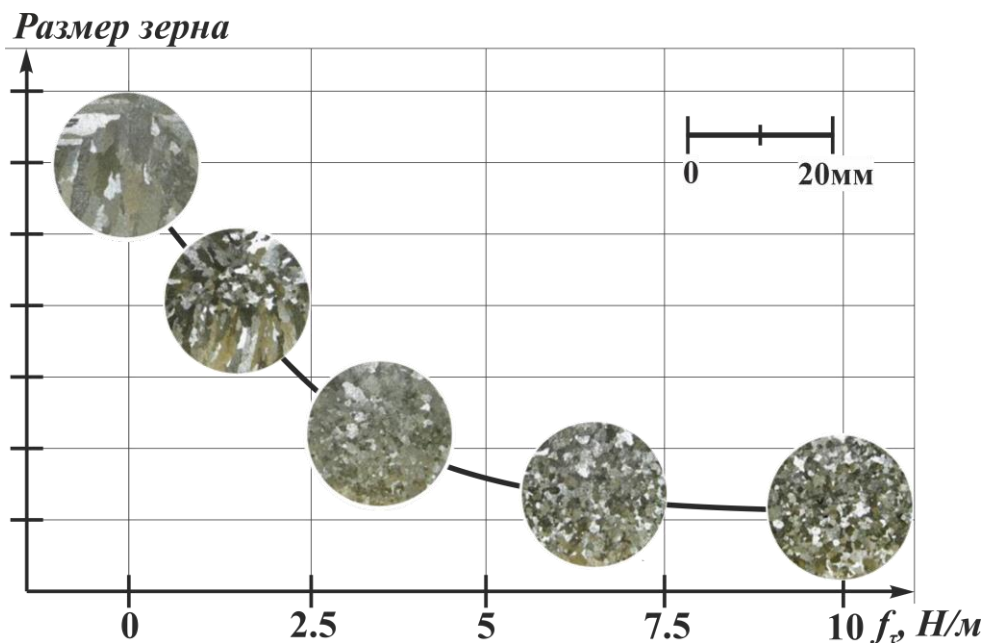


Рисунок 3.16 - Зависимость структуры слитков от величины тангенциальной компоненты электромагнитных сил в жидкой фазе слитка на единицу длины индуктора

Таким образом, путем регулирования величины тока в индукторе электромагнитного модификатора, способного развивать усилие в жидкой фазе слитка вплоть до $f_{\tau} = 7 \text{ Н/м}$, можно получить требуемую по технологии структуру слитка.

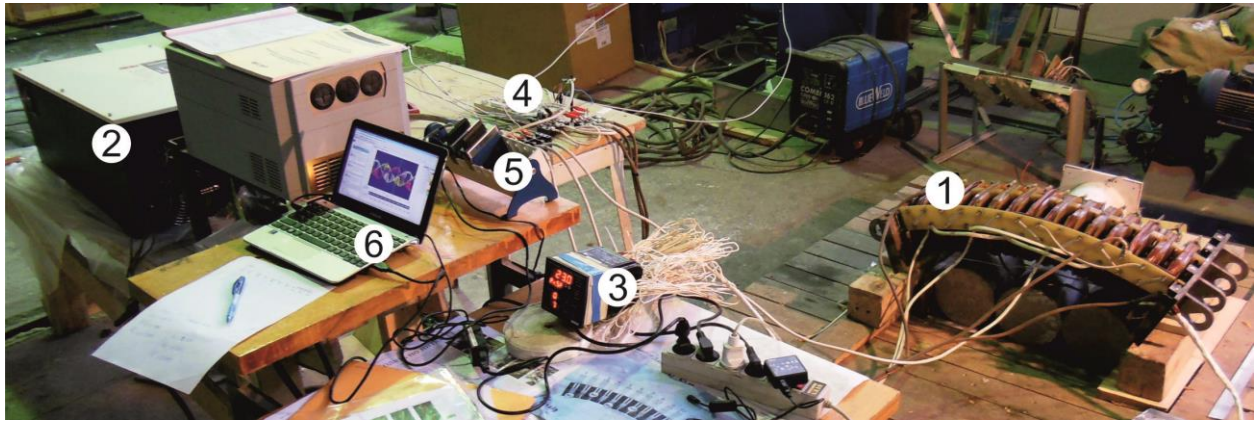
3.5 Верификация результатов математического моделирования

Проверка адекватности построенной математической модели проводилась путем сравнения результатов моделирования и измерений энергетических показателей и магнитных полей индуктора физической модели.

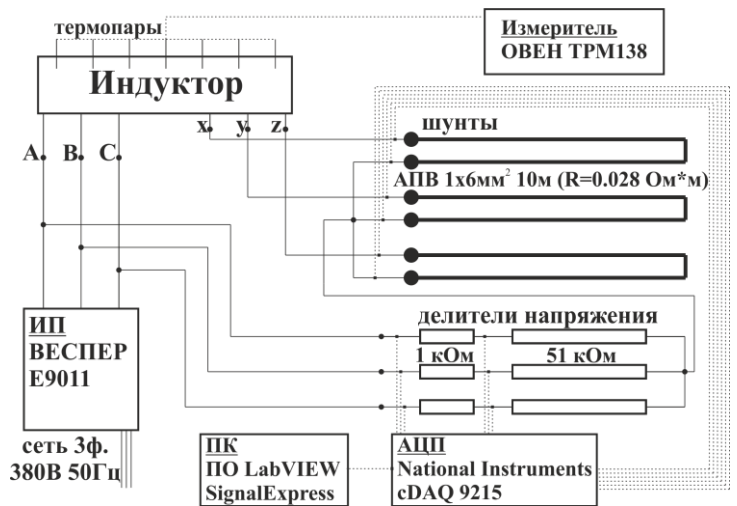
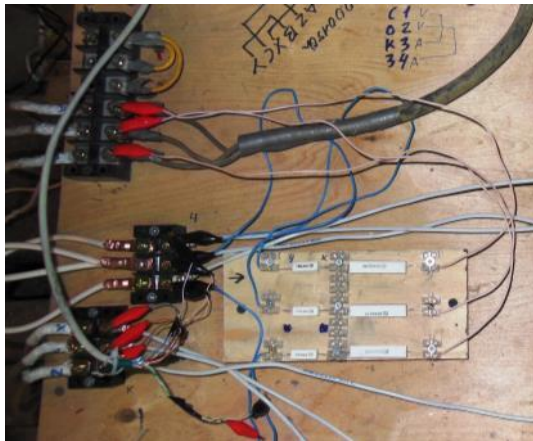
Для измерения энергетических параметров работы индуктора был собран измерительный стенд на основе современных аналого-цифровых преобразователей и виртуальных измерительных приборов производства *National Instruments* [102] (рисунок 3.17, а). Стенд состоит из объекта измерений (индуктора) 1, источника питания 2, измерителя температуры в индукторе 3, измерительной схемы 4, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 5 и ЭВМ 6 с программным обеспечением цифрового осциллографа.

Измерительная схема (рисунок 3.17, б и 3.17, в) состоит из трех делителей напряжения и трех шунтов, что в совокупности с шестиканальным АЦП позволяет осуществлять измерения величин токов, напряжений и сдвигов фаз между ними. Полученных данных достаточно для определения энергетических параметров работы индуктора и оценки несимметрии фаз питающих токов.

Источник питания фирмы ВЕСПЕР EI-9011-025Н использует широтно-импульсную модуляцию для формирования выходного напряжения. Форма напряжения на выходе из источника питания, представленная на рисунке 3.18, получена путем широтно-импульсной модуляции и имеет ярко выраженный ступенчатый характер.



а



б

в

Рисунок 3.17 - Стенд для измерения напряжения и токов в индукторе: общий вид (а), подключение шунтов и делителей (б) и принципиальная схема (в)

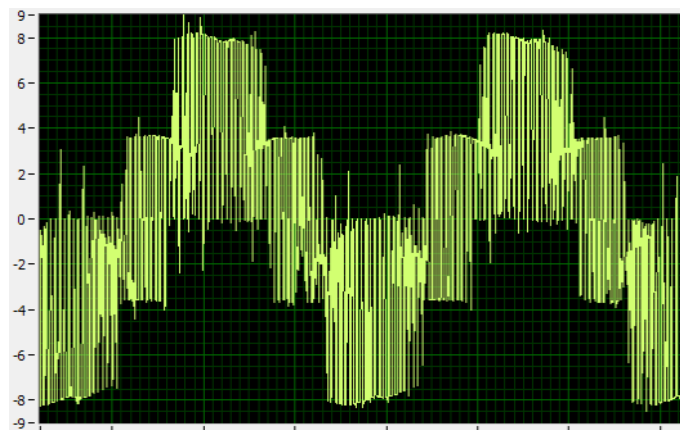


Рисунок 3.18 - Форма питающего напряжения

По этой причине ток, протекающий по индуктору, имеет большое количество шумов и высших гармоник, что требует использовать при измерении токов шунты с высоким активным сопротивлением, в качестве которых использован провод АПВ 1 x 6 мм² длиной 10 м с $R = 0,028 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Для измерения магнитного поля индуктора был собран измерительный стенд (рисунок 3.19), состоящий из измеряемого индуктора 1, двух датчиков Холла 2, измерительной схемы с усилителем сигнала 3 и осциллографа 4.



Рисунок 3.19 - Стенд для измерения напряженности магнитного поля

Сравнение результатов математического моделирования и измерений энергетических характеристик и магнитного поля приведены на рисунке 3.20. Измерение поля проводилось на разных расстояниях от индуктора. На рисунках линиями обозначены результаты математического моделирования, символами обозначены измеренные величины.

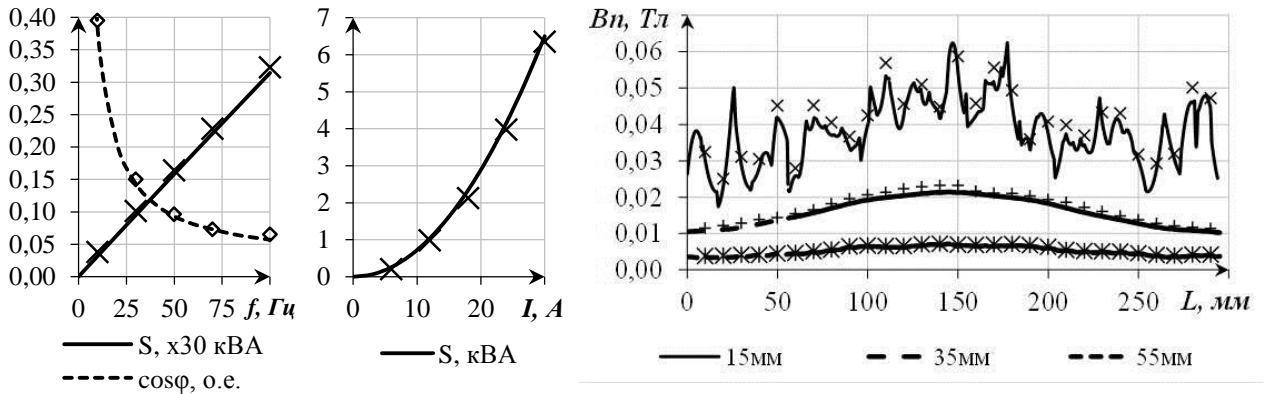


Рисунок 3.20 - Форма питающего напряжения

Среднее отклонение результатов не превышает 10 %, что говорит о достаточной достоверности разработанной математической модели.

3.6 Выводы по главе 3

1. Разработанная лабораторная установка позволяет при определенных параметрах кристаллизации получить слитки из алюминиевых сплавов со структурами, аналогичными структурам слитков, полученных на промышленных литейных машинах.

2. Установлено наличие требуемого технологического эффекта в исследуемой системе – модифицирования структуры слитка посредством электромагнитного воздействия.

3. Определено, что увеличение частоты тока индуктора свыше 30 Гц не ведет к существенному измельчению структуры, а при частоте 100 Гц и выше происходит укрупнение полученного зерна.

4. Установлен эффект разрушения верхней части слитка интенсивными течениями расплава, вызванными воздействием электромагнитного модификатора. Для устранения данного эффекта рекомендуется реализовать в опытной установке возможность обдува воздухом (либо охлаждения водой)

стальной ленты роторной литейной машины непосредственно под электромагнитным модификатором.

5. В результате проведения физического и математического моделирования построена зависимость изменения размера зерна в слитке от величины тангенциальной компоненты электромагнитных сил на единицу длины жидкой фазы слитка. Зависимость позволяет построить взаимосвязь между факторами воздействия – электромагнитными силами в жидкой фазе слитка, полученными в результате математического моделирования, и результатом воздействия – структурой слитков.

6. Индуктор электромагнитного модификатора, способный развивать усилие в жидкой фазе слитка вплоть до $f_t = 7$ Н/м, обеспечивает получение требуемой по технологии структуры слитка.

7. Сравнения результатов математического моделирования и измерений энергетических характеристик и магнитного поля индуктора лабораторной установки подтвердили достоверность разработанной математической модели.

4 ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ УСТАНОВКА МАГНИТНОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДИФИКАТОРА

4.1 Общее описание комплекса

Опытно-промышленная установка магнитного гидродинамического модификатора (МГДМ) разработана для кристаллизатора литейно-прокатного агрегата № 3 Филиала ОАО «СУАЛ» ИркАЗ-СУАЛ» (входит в состав Объединённой компании «РУСАЛ»). Опытно-промышленный комплекс был изготовлен в ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» (г. Красноярск). Комплекс предназначен для модифицирования жидкого расплава алюминия и алюминиевых сплавов в процессе литья заготовки на роторной литейной машине. Оборудование изготовлено согласно ТУ 3442-014-35131371-2014.

Установка состоит из следующих основных элементов: индуктор (рисунок 4.1, *а*), ороситель (рисунок 4.1, *б*), воздуховод (рисунок 4.1, *в*), силового шкафа (рисунок 4.2, *а*) и пульта управления (рисунок 4.2, *б*). Кроме перечисленных элементов в состав комплекса входят система крепежа индуктора над колесом литейной машины, кабельные трассы, вентилятор системы охлаждения и рама пульта управления.

Устройство создаёт переменное электромагнитное поле, проникающее в жидкий расплав. В металле наводятся вихревые токи, взаимодействующие с полем индуктора. Такое взаимодействие создаёт электромагнитные силы, которые приводят расплав в движение. Движущийся металл охватывает границу раздела фаз в момент кристаллизации, что способствует появлению новых зон кристаллизации и как следствие обеспечивает мелкозернистую и однородную структуру слитка.

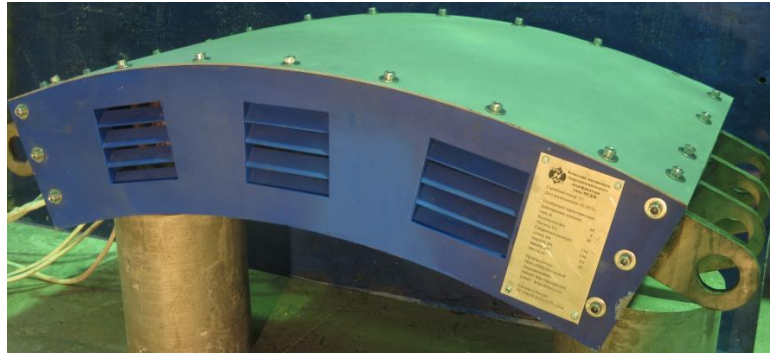
*a**б**в*

Рисунок 4.1 - Индуктор (*a*), ороситель (*б*) и воздуховод (*в*) опытно-промышленной установки

*a**б*

Рисунок 4.2 - Силовой шкаф (*a*) и пульт управления (*б*) опытно-промышленного комплекса

Индуктор располагается с торцевой стороны литейного колеса в зоне зажимного ролика и подвешивается на его раме и кронштейне (рисунок 4.3). Конструкция крепежа индуктора обеспечивает его синхронное перемещение вместе с кронштейном зажимного ролика, что дает возможность производить техническое обслуживание стана. Для исключения возможности разрушения твердой фазы слитка гидродинамическими течениями в зазоре между индуктором и литейной машиной установлен многозонный регулируемый ороситель стальной ленты, обеспечивающий повышение теплоотвода.

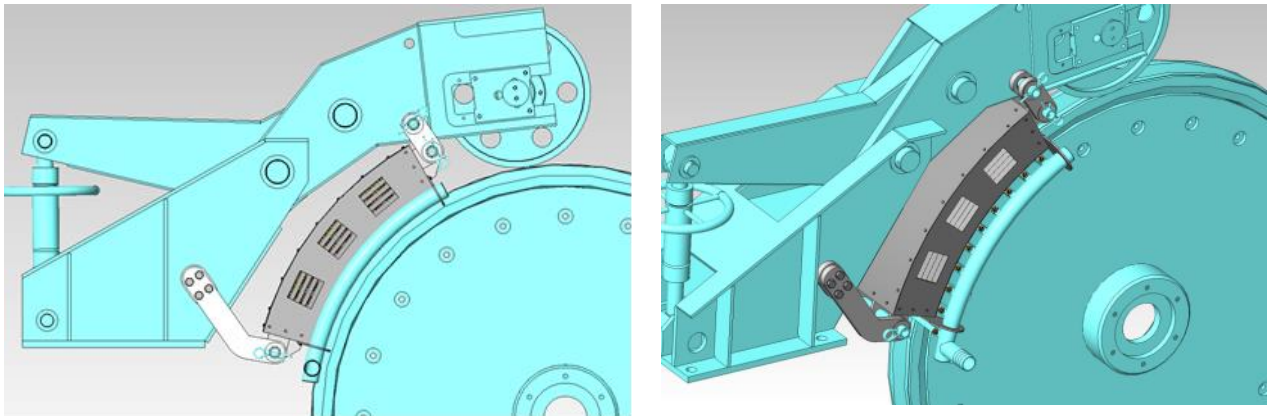


Рисунок 4.3 - Индуктор, установленный на кристаллизаторе

Индуктор представляет собой дугообразный магнитопровод с катушками, намотанными через ярмо (рисунок 4.4). Магнитопровод индуктора изготовлен из электротехнической стали толщиной 0,35 мм, а основные конструкционные элементы выполнены из нержавеющей стали, т. к. условия эксплуатации требуют высокой коррозионной стойкости. Для эксплуатации в парогазовой среде индуктор имеет сплошную многослойную лаковую изоляцию.

Каркас индуктора МГДМ должен быть жёстким, чтобы обеспечивать равномерное распределение нагрузок от обмотки. К торцевым листам индуктора приварены петли для его крепления над литейным колесом. Индуктор снабжён съёмными крышками для защиты токоведущих частей, подключения силовых кабелей и проводов схемы теплового контроля. На внешнем каркасе индуктора

предусмотрено место для болтового заземления корпуса. Предусмотрены отверстия для подачи охлаждающего воздуха от вентилятора на обмотку индуктора. На катушках обмотки установлены термодатчики для контроля температуры обмотки индуктора.

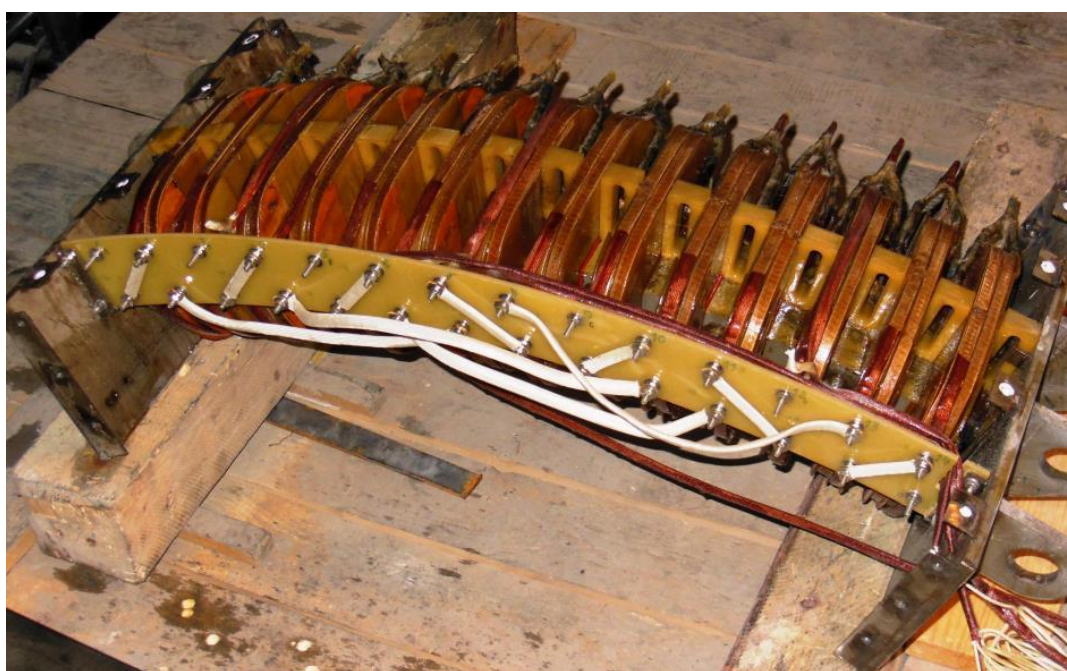


Рисунок 4.4 - Индуктор со снятыми крышками

Источник питания собран на основе частотного преобразователя «ВЕСПЕР EI-9011-050Н», преобразующего трёхфазное напряжение промышленной частоты в трёхфазное напряжение регулируемой частоты и амплитуды. Источник питания расположен в шкафу одностороннего обслуживания со степенью защиты IP31. В шкафу источника питания установлены вводные автоматические выключатели, блок питания системы управления, пусковая аппаратура управления вентилятором охлаждения обмотки индуктора. Кнопки для управления источником питания, измеритель-регулятор температуры обмотки индуктора, светосигнальные индикаторы состояния источника питания и вентилятора охлаждения установлены на дверце пульта управления. Источник питания монтируется в помещении с температурой воздуха не ниже 5 °С, таким образом,

чтобы длина кабелей, соединяющих его с индуктором МГДМ, не превышала 70 м. Для работы в условиях заводской сети на входе источника питания установлен *RL*-фильтр.

Пульт управления обеспечивает включение индуктора и вентилятора системы охлаждения, при этом вентилятор может включаться в автоматическом режиме в зависимости от температуры обмотки индуктора.

Включение и отключение индуктора МГДМ производят кнопками с пульта управления. Отключение может происходить автоматически по истечении заданного времени. В цепь управления источника питания комплекса включены блокировки от внешних устройств: вентилятора воздушного охлаждения обмотки, превышения температуры обмотки индуктора МГДМ. При отклонении любого параметра от заданного значения индуктор МГДМ автоматически отключается.

В системе управления реализовано аварийное обесточивание индуктора из-за перегрева. Контроль температуры производится семью термопарами, установленными в разных зонах индуктора. Измерение, индикация и задание уставок температур осуществляется через универсальный измеритель-регулятор. Пульт управления выполнен по релейно-контакторной схеме с целью возможности эксплуатации при отрицательных температурах.

Основные параметры и характеристики опытно-промышленной установки приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Основные параметры и характеристики комплекса

Параметр	Значение
1. Технические данные индуктора	
1.1. Внутренний диаметр, мм	1570
1.2. Развертка, град.	45
1.3. Габаритные размеры (Д x Ш x В), мм	714 x 394 x 211
1.4. Масса, кг	85
1.5. Ток фазы, А	60
1.6. Линейная токовая нагрузка, А/м	$0,82 \cdot 10^5$
1.7. Напряжение линейное, В	340
1.8. Частота, Гц	30

1.9. Коэффициент мощности	0,06
1.10. Режим работы	непрерывный
2. Условия эксплуатации	
2.1. Температура окружающей среды, °С	от –30 до +40
2.2. Вид охлаждения	принудительное воздушное
2.3. Расход воздуха, м ³ /час	1000
3. Конструктивные параметры	
3.1. Ширина зубца, мм	18
3.2. Ширина паза, мм	23
3.3. Глубина паза, мм	55
3.4. Высота ярма, мм	25
3.5. Толщина пакета магнитопровода, мм	90
4. Обмоточные данные	
4.1. Тип обмотки	катушечная через ярмо
4.2. Число пазов	14
4.3. Число катушек	14
4.4. Тип катушки	двухслойная
4.5. Число витков в катушке	58
4.6. Число пазов на фазу ($L1 - L2 - L3$)	6 – 4 – 4
4.7. Схема соединения обмотки	звезда
4.8. Класс нагревостойкости изоляции	Н

Для стабильной работы серийных источников питания требуется обеспечение симметричной нагрузки фаз. Для этого в конструкции индуктора заложены компенсирующие катушки. С целью определения схемы соединения, обеспечивающей наибольшую симметрию нагрузки, были проведены испытания разных схем соединения обмотки (рисунок 4.5).

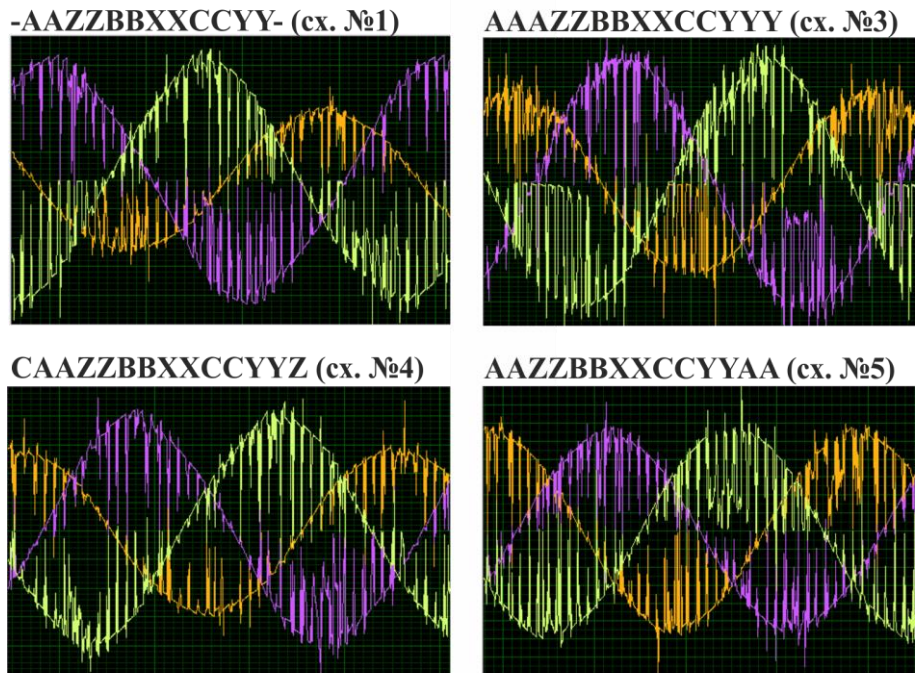


Рисунок 4.5 - Формы токов в индукторе при разных схемах соединения обмотки индуктора

При не включении компенсирующих катушек (схема № 1) в фазе $L3$ величина тока на 40% ниже, чем в фазах $L1$ и $L2$. Наименьшую несимметрию нагрузки (менее 3%) обеспечивает схема № 5, в которой фаза $L1$ состоит из шести катушек расположенных в центре и по концам индуктора.

4.2 Сравнение экспериментальных и расчетных данных характеристик работы опытно-промышленного образца

Полученные в результате измерений энергетические показатели работы комплекса, сопоставление с результатами математического моделирования представлены на рисунок 4.6.

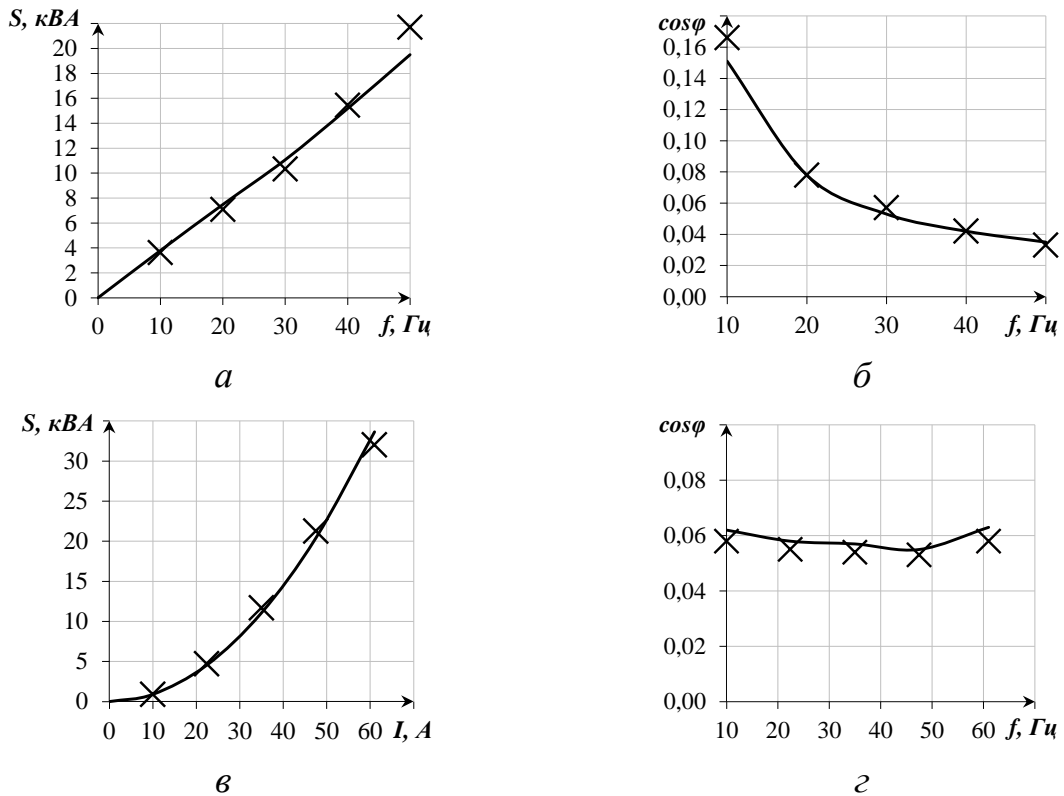


Рисунок 4.6 - Зависимости полной мощности и $\cos\phi$ при постоянной величине тока 35 А (*а, б*) и при постоянной частоте 30 Гц (*в, г*) полученный в результате математического моделирования и измерений

Проведено сопоставление результатов измерений и математического моделирования магнитного поля в рабочей зоне индуктора. Для этого произведена разметка активной поверхности индуктора, представленная на рисунок 4.7.

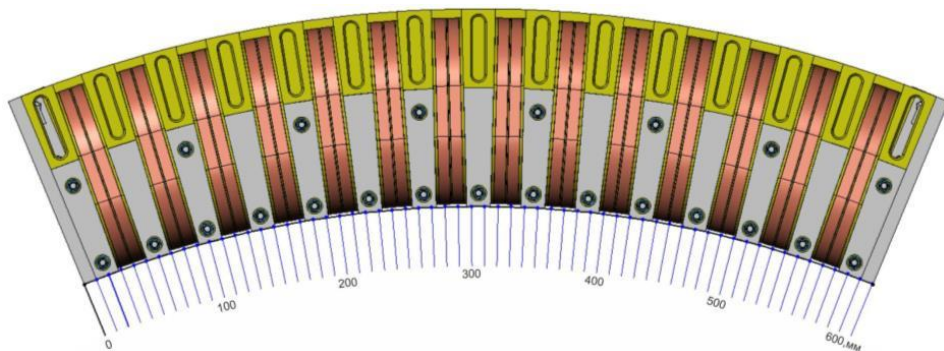
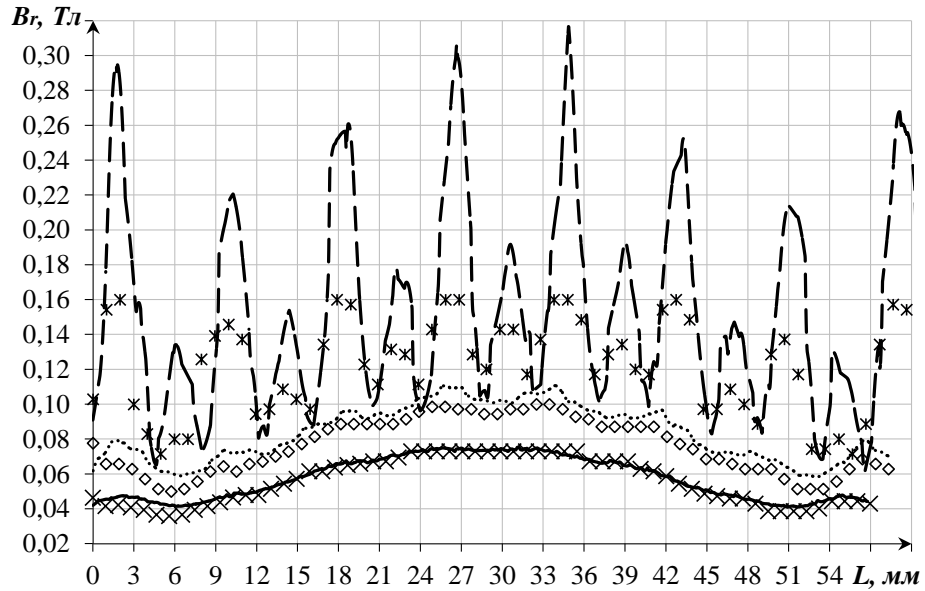
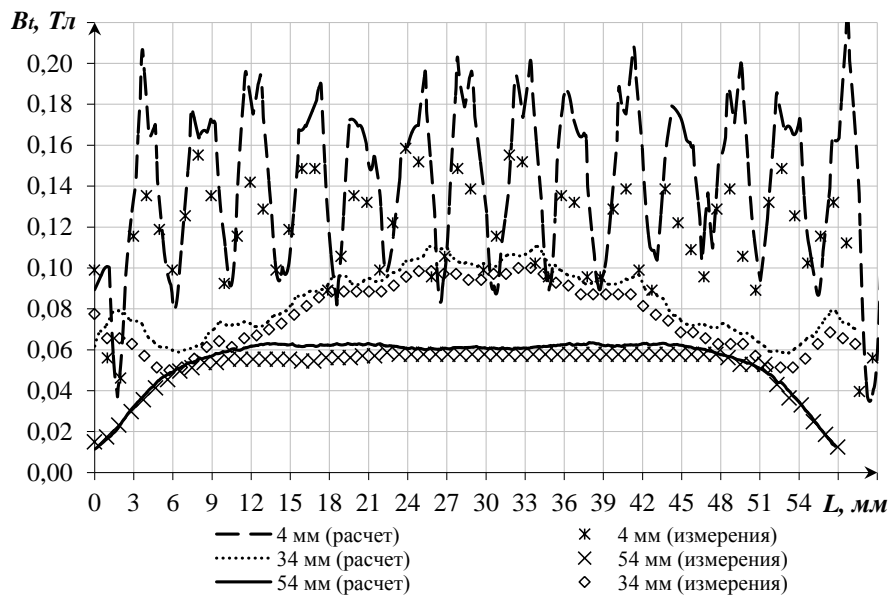


Рисунок 4.7 - Разметка активной поверхности индуктора для измерения магнитного поля

Результаты измерений полей приведены на рисунок 4.8, где линиями показаны результаты математического моделирования, а символами – результаты измерений.



а



б

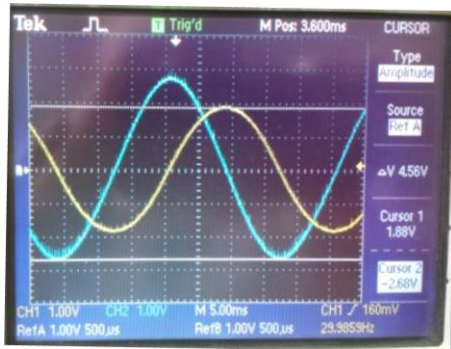
Рисунок 4.8 - Распределения радиальной (а) и тангенциальной (б) составляющих вектора магнитной индукции по длине индуктора при $I = 55$ А и $f = 30$ Гц для разных расстояний от активной поверхности

Для оценки степени изменения магнитного поля при работе с ферромагнитной пластиной между датчиком и индуктором был установлен элемент ферромагнитной ленты (рисунок 4.9).

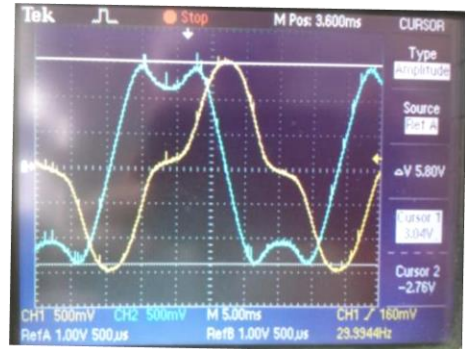


Рисунок 4.9 - Индуктор с установленным элементом ферромагнитной ленты

На рисунке 4.10 приведены измеренные осциллограммы нормальной и тангенциальной составляющих вектора магнитной индукции без и с ферромагнитным листом. Наличие ферромагнитного листа приводит к уменьшению амплитудных значений индукции и появлению высших гармоник.



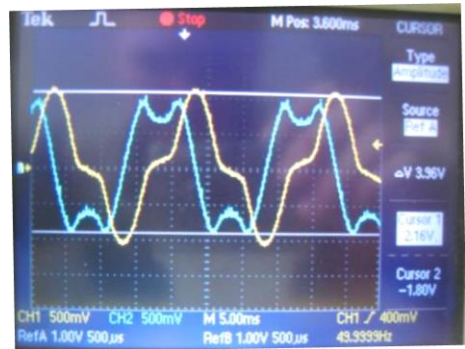
а



б



в



г

Рисунок 4.10 - Формы нормальной и тангенциальной составляющих вектора магнитной индукции при 30 Гц 55 А без листа (а) и с листом (б) и 50 Гц 35 А без листа (в) и с листом (г)

4.3 Рекомендации по проектированию и промышленным испытаниям комплексов магнитного гидродинамического модификатора для роторных литейных машин

Индуктор электромагнитного модификатора должен быть спроектирован исходя из требования обеспечения создания усилия в жидкой фазе слитка до $f_{\tau} = 7$ Н на один метр ее длины, что позволит осуществить процесс электромагнитного модифицирования структуры слитка в роторной литейной машине в соответствии с заданной технологией.

Если на роторной литейной машине используется лента, не обладающая ферромагнитными свойствами, то с целью снижения реактивной мощности системы необходимо использовать индуктор с числом пар полюсов $p = 1$, в противном случае рекомендуется $p = 2$. При этом для экранирования не более 30 % магнитного потока необходимо, чтобы индуктор обеспечивал линейную токовую нагрузку не менее $8,5 \times 10^4$ А/м.

При толщине твердой фазы слитка между индуктором и жидкой фазой до 10 мм индуктор электромагнитного модификатора должен питаться частотой от 15 до 30 Гц.

Для исключения возможности образования дефектов слитка, вызванных размыванием стенки слитка гидродинамическими течениями, электротехнический комплекс должен быть оснащен системой подачи охлаждения на кристаллизатор в области под индуктором комплекса.

В основе системы электропитания индуктора комплекса рекомендуется использовать транзисторный источник с векторным управлением потока, обеспечивающий подстройку величины и частоты напряжения, подаваемого на индуктор.

Испытания комплекса электромагнитного модификатора рекомендуется выполнять в несколько этапов.

1-й этап. Испытание комплекса на холостом ходу.

Условия испытаний: проводятся на литейной машине без подачи расплава.

Цель испытаний: проверка работоспособности комплекса, определение направления движения бегущего электромагнитного поля, определение температуры обмоток при выходе на стабильный температурный режим.

2-й этап. Испытание комплекса во время прогрева стана в начале разливки.

Условия испытаний: проводят во время прогрева кристаллизатора, до момента подачи слитка в прокатный стан. При недостатке времени испытания проводят в течение нескольких разливок. Частота тока в индукторе 30 Гц,

направление движения электромагнитного поля – по направлению вращения кристаллизатора литейного колеса.

Цель испытаний: проверка работоспособности комплекса, определение направления движения бегущего электромагнитного поля, определение температуры обмоток при выходе на стабильный температурный режим. Определение величины тока частотой 30Гц, питающего индуктор, и настройка интенсивности охлаждения кристаллизатора через ороситель, расположенный между индуктором и кристаллизатором, обеспечивающих поверхность слитка без дефектов при максимально возможной величине тока индуктора. Оценка нагрева индуктора тепловым потоком, идущим от кристаллизатора.

3-й этап. Испытания комплекса во время выпуска агрегатом продукции.

Условия испытаний: проводятся во время прогрева и работы агрегата по выпуску продукции. Частота тока в индукторе 30Гц, направление движения электромагнитного поля по направлению вращения кристаллизатора литейного колеса.

Цель испытаний: получение образцов слитка (последний отрезанный слиток перед подачей слитка в прокатный стан) и катанки, полученных с использованием электромагнитного модификатора. Оценка влияния электромагнитного модифицирования на качество и физико-механические свойства катанки. Оценка работы индуктора и рабочей температуры обмотки при длительном включении.

4.4 Выводы по главе 4

1. В результате проделанной работы разработан электромагнитный модификатор для промышленной роторной литейной машины, обеспечивающий создание течений расплава в жидкой фазе слитка разной интенсивности в

зависимости от заданного технологического процесса. При этом в установке реализованы решения для обеспечения ее стабильной работы в условиях литейных производств.

2. Выработаны рекомендации по проектированию и промышленным испытаниям комплексов магнитного гидродинамического модификатора для роторных литейных машин, использованные для разработки ТУ 3442-014-35131371-2014.

3. Предложена специальная схема соединения обмотки индуктора электромагнитного модификатора, обеспечивающая симметричную нагрузку фаз.

4. Проведённые сравнения экспериментальных и расчетных данных характеристик работы опытно-промышленного образца электромагнитного модификатора подтверждают заложенные при проектировании характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный обзор и анализ работы агрегатов для производства алюминиевой катанки и современных МГД-устройств для модифицирования структур слитков в процессе кристаллизации позволил определить место установки индуктора, принять обоснованные допущения и построить расчётную модель исследуемой системы.

2. Проведенный обзор методов математического моделирования процессов, протекающих при кристаллизации слитка с электромагнитным воздействием, определил пути построения алгоритма вычислительного процесса и построения моделей тепловых, электромагнитных и гидродинамических явлений с использованием программных продуктов *ANSYS*, *CFX* и *FLUENT* и физического моделирования методом прямого геометрического подобия для определения режимов работы установки, обеспечивающих модифицирование структуры.

3. Разработанный метод исследования процесса электромагнитного модифицирования структуры слитка, совмещающий математическое и физическое моделирование, позволяет построить взаимосвязь структуры слитка от характеристик воздействующего электромагнитного поля в жидкой фазе слитка; получить дифференциальные и интегральные параметры системы; осуществить разработку электромагнитного модификатора для промышленной литейной машины.

4. Численный анализ физических процессов позволил определить геометрию жидкой фазы слитка и влияния на нее технологических параметров литья; дифференциальные и интегральные характеристики электромагнитного поля в системе; оценить влияние ферромагнитных свойств магнитопровода индуктора и стальной ленты литейной машины на процесс преобразования энергии; определить диапазон частот от 15 до 30 Гц, обеспечивающий наиболее эффективное воздействие на жидкую фазу слитка; установить, что наилучшее

проникновение гидродинамических течений по длине жидкой фазы обеспечивает одноконтурная циркуляция расплава.

5. Экспериментальные исследования на физической модели позволили установить зависимости изменения структуры слитка от режимов работы индуктора; сделать вывод о необходимости получения в жидкой фазе слитка тангенциальных электромагнитных сил не менее 7 Н на метр длины индуктора для обеспечения процесса модифицирования структуры; необходимости увеличения теплоотвода со стальной ленты литейной машины в процессе электромагнитного воздействия для сохранения целостности жидкой сердцевины слитка.

7. Результаты работы использованы в ТУ № 3442-014-35131371-2014 «Комплекс магнитного гидродинамического модификатора типа МГДМ» и при разработке программы опытно-промышленных испытаний комплекса. В электромагнитном модификаторе предложено использовать дугообразный индуктор с 14 пазами и катушками со специальной схемой соединения обмотки (AAZZBBXXCCYYAA), обеспечивающей симметричную нагрузку фаз.

8. Разработан электромагнитный модификатор для роторной литейной машины агрегата ЛПА-АК, оказывающий электромагнитное воздействие на жидкую фазу слитка разной интенсивности в зависимости от заданного технологического процесса. При этом в установке реализованы решения для обеспечения ее стабильной работы в условиях литейных производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдулов, А. А. Применение электромагнитного перемешивателя при непрерывном литье / А. А. Авдулов, А. В. Литовченко // Сборник докладов VI Международной Интернет-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика» (InnoTech 2014). – 2014. – Режим доступа: <http://www.conference.msa.pstu.ru/public/INN/>.
2. Авдулов, А. А. Проблемы и перспективы магнитогидро-динамических технологий перемешивания расплавов / А. А. Авдулов, В. Н. Тимофеев, А. И. Корчагин, Е. А. Павлов, Е. А. Головенко // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2011. – № 7. – С. 150–155.
3. Авдулов, А. А. МГД-перемешиватель для работы с малым уровнем расплава алюминия в ванне печи / В. Н. Тимофеев, А. А. Авдулов, С. А. Бояков, Ю. С. Авдулова, И. С. Гудков // Журнал «Индукционный нагрев». – 2013. – № 26. – С. 16–20.
4. Авдулов, А. А. Физическое моделирование электромагнитного модифицирования структуры слитка в роторной литейной машине / А. А. Авдулов, И. С. Гудков, Ю. С. Авдулова // Сборник научных трудов I международной научной конференции молодых ученых «Электротехника энергетика машиностроение ЭЭМ-2014» Часть 1. Секция ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. – 2014. – С. 64–67.
5. Авдулов, А. А. Физическое моделирование линейных индукционных машин металлургического назначения / А. А. Авдулов, Е. А. Головенко, В. Н., Тимофеев, В. А. Горемыкин, Т. А. Боякова // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2011. – № 7. – С. 91–94.

6. Авдулов, А. А. Электромагнитные вращатели жидкого металла в канальной части индукционной печи / А. А. Авдулов, И. С. Гудков, В. Н. Тимофеев // Журнал «Индукционный нагрев». – 2013. – № 26. – С. 21–25.
7. Авдулов, А. А. Электромагнитный модификатор структуры алюминиевого слитка для роторной литейной машины / А. А. Авдулов, В. Н. Тимофеев, И. С. Гудков, С. А. Бояков, Ю. С. Авдулова // Журнал «Электрометаллургия». – 2015. – № 2. – С. 25–31.
8. Авдулов, А. А. Электромагнитный модификатор структуры слитка в роторной литейной машине / А. А. Авдулов, В. Н. Тимофеев, С. А. Бояков, В. Ф. Фролов // Сборник докладов VI Международного Конгресса «Цветные металлы и минералы», г. Красноярск. – 2014. – С. 1003–1009.
9. Алиферов, А. Индукционный и электроконтактный нагрев металлов монография / А. Алиферов, С. Луци. – Новосибирск : изд-во НГТУ, 2011. – 411 с.
10. Алиферов, А. Индукционный и электроконтактный нагрев металлов: монография / А. Алиферов, С. Луци. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 411 с.
11. Альтман, М.Б. Алюминиевые сплавы: Плавка и литье алюминиевых сплавов / сост. М. Б. Альтман, А. Ф. Андреев, Н. Н. Белоусов и др. ; отв. ред. В. И. Добаткин. – М. : Metallurgia, 1970. – 416 с.
12. Бабичев, А. П. Физические величины: справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др. ; под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
13. Беляев, А. И. Металловедение алюминия и его сплавов : справ. изд-е; 2-е изд., перераб. и доп. / А. И. Беляев, О. С. Бочвар, Н. Н. Буйнов и др. – М. : Metallurgia, 1983. – 280 с.
14. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М. : Высшая школа, 1964. – 730 с.
15. Блинов, Ю. И. Источники питания электротермических установок учеб. пособие / Ю. И. Блинов, А. С. Васильев ; Ленингр. электротехн. ин-т им. В. И. Ульянова (Ленина). – Л. : ЛЭТИ, 1989. – 53 с.

16. Бондарев, Б. И. Плавка и литье деформируемых магниевых сплавов / Б. И. Бондарев. – М. : Metallurgia, 1973. – 288 с.
17. Бондарев, Б. И. Модифицирование алюминиевых деформируемых сплавов / Б. И. Бондарев, В. И. Напалков, В. И. Тарарышкин. – М. : Metallurgia, 1979. – 224 с.
18. Бочвар, А. А. Metalловедение / А. А. Бочвар. – М. : Metallurgizdat, 1956. – 495 с.
19. Бычков, С. А. Воздействие электромагнитного поля на расплав в процессе кристаллизации / С. А. Бычков, Н. Г. Батов, Б. А. Сокунов // Вестник московского энергетического института. – 2010. – № 2. – С. 67-71.
20. Варгафтик, Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. – М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 708 с.
21. Воронцова, Л. А. Алюминий и алюминиевые сплавы в электрических изделиях / Л. А. Воронцова, В. В. Маслов, И. Б. Пешков. – М. : Энергия, 1971. – 224 с.
22. Габидуллин, Р. М. Непрерывное литьё алюминиевых сплавов / Р. М. Габидуллин, В. А. Ливанов, В. С. Шипилов – М. : Metallurgia, 1977. – 168 с.
23. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы : пер. с англ. / Р. Галлагер – М. : Мир, 1984. – 428 с.
24. Гершуни, Г. З. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости / Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкий. – М. : Наука, 1972. – 392 с.
25. Демидович, В. Б. Проектирование электротермических установок: учеб. пособие / В. Б. Демидович ; Ленингр. электротехн. ин-т им. В. И. Ульянова (Ленина). – Л. : ЛЭТИ, 1988. – 62 с.
26. Ефимов В. А. О применении внешних воздействий на жидкий металл / А. В. Ефимов // Применение магнитной гидродинамики в металлургии и литейном производстве. – Киев : ИПЛ АН УССР Т1. – 1981. – с. 3–6

27. Ефимов, В. А. Перспективы развития работ по применению внешних воздействий на жидкий и кристаллизирующийся металл / В. Ефимов. – Киев, 1977. – 160 с.
28. Ефимов, В. А. Специальные способы литья: справочник / В. А. Ефимов, Г. А. Анисович, В. Н. Бабич и др. ; под общ. ред. В. А. Ефимова. – М. : Машиностроение, 1991. – 436 с.
29. Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах : справ. изд. / В. Е. Зиновьев. – М. : Metallurgy, 1989. – 384 с.
30. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – 8-е изд. – М. : Химия, 1971. – 118 с.
31. Кирко, И. М. Жидкий металл в электромагнитном поле / И. М. Кирко // М.-Л. : Энергия – 1964. – 160 с.
32. Колачев, Б. А. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов: Учебник для вузов. / Б. А. Колачев, Р. М. Габидуллин, Ю. В. Пигузов; 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Metallurgy, 1992. – 272 с.
33. Колесниченко, А. Ф. Изменение условий кристаллизации непрерывноотливаемого стального слитка при использовании концепции полного электромагнитного перемешивания / А. Ф. Колесниченко, А. А. Колесниченко, В. И. Дубоделов, В. В. Буряк // Металл и литье Украины. –2008. – № 3–4. – С. 16–20.
34. Кольбе, Э. Расчет индукторов : учеб. Пособие / Э. Кольбе, А. Б. Кувалдин ; ред. Р. К. Джапарова. – М. : МЭИ, 1982. – 78 с.
35. Королев, А. А. Работы ВНИИМЕТМАШ по металлургическому оборудованию / под ред. А. А. Королева и В. Г. Дрозда // М. : Изд-во ВНИИМЕТМАШ, 1970. – С. 423.
36. Кравченко, А. Н. Краевые характеристики в задачах электродинамики / А. Н. Кравченко. – Киев: Наукова думка, 1989. – 224 с.
37. Кувалдин, А. Б. Технологические процессы с применением индукционного нагрева : учеб. Пособие / А. Б. Кувалдин ; ред. А. Ю. Макаров ; Моск. энерг. ин-т. – М. : Изд-во МЭИ, 1990. – 104 с.

38. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: теория поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 536 с.
39. Лиелпетер, Я. Я. Жидкометаллические индукционные МГД-машины / Я. Я. Лиелпетер. – Рига : Зинатне, 1969. – 245 с.
40. Миронов, Ю. М. Основы управления электрошлаковыми печами : учеб. пособие / Ю. М. Миронов ; Чуваш. гос. ун-т им. И. Н. Ульянова. – Чебоксары : ЧГУ, 1987. – 92 с.
41. Миронов, Ю. М. Теоретическая электротехника электрических электродных печей : учеб. пособие / Ю. М. Миронов ; Чуваш. гос. ун-т им. И. Н. Ульянова. – Чебоксары : ЧГУ, 1997. – 231 с.
42. Миронова, А. Н. Особенности электротехнологических установок как потребителей электроэнергии / А. Н. Миронова, Ю. М. Миронов ; Чуваш. гос. ун-т им. И. Н. Ульянова. – Чебоксары : ЧГУ, 1990. – 76 с.
43. Миронова, А. Н. Энерготехнологическая эффективность дуговых сталеплавильных печей : учеб. пособие / А. Ю. Миронова, Ю. М. Миронов под ред. Ю. М. Миронова ; Чуваш. гос. ун-т им. И. Н. Ульянова. – Чебоксары : ЧГУ, 1999. – 153 с.
44. Немков, В. С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В. С. Немков, В. Б. Демидович. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 279 с.
45. ОАО АХК ВНИИМЕТМАШ им. академика А. И. Целикова [корпоративный сайт]. URL: <http://www.vniimetmash.ru/referens-list/itemlist/category/21-mashiny-nepregryvno-go-litya-i-litejno-prokatnye-agregaty> (дата обращения: 06.05.2015).
46. Остроумов, Г. А. Свободная тепловая конвекция в условиях внутренней задачи / Г. А. Остроумов. – М. : Гостехиздат, 1952. – 286 с.
47. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
48. Патанкар, С. В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах: пер. с англ. / С. В. Патанкар. – М. : Изд. МЭИ, 2003. – 312 с.

49. Первухин, М. В. Электротехнология и оборудование для получения непрерывнолитых слитков в электромагнитном кристаллизаторе. Теория и практика : дис. ... докт. техн. наук М. В. Первухина. – Красноярск : Полиграфический центр Библиотечно-издательского комплекса СФУ, 2012. – 310 с.
50. Первухин, М.В. Математическое моделирование электромагнитных и термогидродинамических процессов в системе «индуктор-слиток» электромагнитного кристаллизатора / М. В. Первухин, М. Ю. Хацаюк, А. В. Минаков, Н. В. Сергеев // Магнитная гидродинамика Vol. 47. – 2011. – с. 3–11.
51. Первухин, М. В. Электротехнология и оборудование для непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор / М. В. Первухин, В. Н. Тимофеев, М. Ю. Хацаюк, Н. В. Сергеев // XVII Международный конгресс UIE «Энергоэффективные, экономичные, экологичные, образовательные электротехнологии». Материалы конгресса. Санкт-Петербург. 21–25 мая –2012. – с. 41–46.
52. Повх, И. Л. Магнитная гидродинамика в металлургии / И. Л. Повх, А. Б. Капуста, Б. В. Чекин. – М. : Металлургия, 1974. – 240 с.
53. Полищук, В. П. Магнитогидродинамические насосы для жидких металлов / В. П. Полищук, М. Цин, Р. К. Горн и др; отв. ред. В. А. Ефимов; АН УССР. Ин-т проблем литья. – Киев : Наук. Думка, 1989. – 256 с.
54. Прохоров, А. М. Физическая энциклопедия / гл. ред. А. М. Прохоров; ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. Т. 4 Пойтинга-Робертсона-Стримеры – М. : Большая Российская энциклопедия, 1994. – 704 с.
55. Рохлин, Л. Л. Металловедение цветных металлов и сплавов / Л. Л. Рохлин, Н. Р. Бочвар. – М. : Наука, 1972. – С. 61.
56. Рубцов, В. П. Релейно-контакторные системы управления ЭТУ : учеб. пособие / В. П. Рубцов, Н. А. Лавринов, А. П. Попов ; под ред. Ф. В. Долбилина ; Моск. энерг. ин-т (техн. ун-т). – М. : Изд-во МЭИ, 1996. – 55 с.

57. Рубцов, В. П. Электромеханические системы электротехнологических установок: учеб. пособие / В. П. Рубцов, Н. А. Лавринов ; под ред. Ю. А. Слесарева ; Моск. энерг. ин-т. – М. : Изд-во МЭИ, 1993. – 81 с.
58. Самойлович Ю. А. Кристаллизация слитка в электромагнитном поле / Ю. А. Самойлович. – М. : Metallurgia, 1986. – 168 с.
59. Самойлович, Ю. А. Формирование слитка / Ю. А. Самойлович. – М. : Metallurgia, 1977. – 160 с.
60. Сарапулов, Ф. Н. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения: учеб. пособие / Ф. Н. Сарапулов, С. Ф. Сарапулов, П. Шымчак. – 2-е изд., перераб. и доп. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – 431 с.
61. Сарапулов, Ф. Н. Электротехнологическая виртуальная лаборатория учеб. пособие / Ф. Н. Сарапулов, С. Ф. Сарапулов, Д. Н. Томашевский, В. Э. Фризин, И. В. Черных. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2003. – 233 с.
62. Соколов, М. М. Дискретный электропривод механизмов электротермических установок / М. М. Соколов, В. П. Рубцов. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 119 с.
63. Тамм, И. Е. Основы теории электричества: учеб. пособие для вузов / И. Е. Тамм; 11-е изд., испр. и доп. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.
64. Фигуровский, Д. К. Влияние воздействия электромагнитного поля в процессе кристаллизации на формирование структуры нейзильбера / Д. К. Фигуровский // Цветные металлы. – 2007. – № 2. – С. 121–125.
65. Хацаюк, М. Ю. Индукционная установка с МГД воздействием на высоколегированные алюминиевые сплавы в процессе их приготовления и разлива: автореферат дис. ... канд. техн. наук М. Ю. Хацаюка – Красноярск : Полиграфический центр Библиотечно-издательского комплекса СФУ, 2013. – 22 с.
66. Хрипченко, С. Ю. Формирование структуры и свойств алюминиевых слитков в условиях магнитогидродинамического воздействия / С. Ю. Хрипченко, В. М. Долгих, С. А. Денисов, И. В. Колесниченко, Л. В. Никулин // Цветные металлы. – 2013. – №4. С. 70–73.

67. Хэтч, Дж. Е. Алюминий: свойства и физическое металловедение : справ. изд-е; пер. с англ. / Дж. Е. Хэтч. – М. : Metallurgia, 1989. – 422 с.
68. Чалмерс, Б. Теория затвердевания; перев. с англ. / Б. Чалмерс; под ред. М. В. Приданцева. – М. : Metallurgia. – 1968. – 288 с.
69. Чеботарев, В. А. Разработка и исследование кристаллизатора роторного типа для непрерывного литья полос из цветных металлов : автореф. дис. ... канд. техн. наук В. А. Чеботарева. – М. : Издательство ВНИИМЕТМАШ, 1970. – 23 с.
70. Чередниченко, В. С. Вакуумные плазменные электропечи / В. С. Чередниченко, Б. И. Юдин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 586 с.
71. Чередниченко, В. С. Электрические печи сопротивления. Теплопередача и расчеты электропечей сопротивления / В. С. Чередниченко, А. С. Бородачев, В. Д. Артемьев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. – 620 с.
72. Чередниченко, В. С. Электротехнологические установки и системы. Теплопередача в электротехнологии. Упражнения и задачи: учеб. пособие / В. С. Чередниченко, В. А. Сеницын, А. И. Алиферов, В. А. Тюков, Ю. И. Шаров ; под ред. В. С. Чередниченко, А. И. Алиферова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск : Изд-во ГТГТУ, 2011. – 571 с.
73. Чернышев, И. А. Электромагнитное воздействие на металлические расплавы / И. А. Чернышев. – М. : Metallurgizdat, 1963. – 85 с.
74. Чиркин, С. В. Теплофизические свойства материалов ядерной техники : Справочник / С. В. Чиркин. – М. : АТОМИЗДАТ, 1968. – 484 с.
75. Чуркин, Б. С. Теория литейных процессов : учебник / под. ред. Э. Б. Гофмана. – Екатеринбург, 2006. – 454 с.
76. Шмитц, К. Рециклинг алюминия. Справочное руководство / К. Шмитц, Й. Домагала, П. Хааг. // пер. с англ. – М. : АЛЮСИЛ МВиТ, 2008. – С. 528.
77. Эскин, Г. И. Ультразвуковая обработка расплавленного алюминия: справ. изд-е; 2-е изд., перераб. и доп. / Г. И. Эскин. – М. : Metallurgia, 1988. – 232 с.
78. Юн, А. А. Теория и практика моделирования турбулентных течений / А. А. Юн. – М. : – 2009. – 272 с.

79. Avdulov, A. Application of MHD technology in non-ferrous metallurgy in Siberia / V. Timofeev, M. Khatsayuk, A. Avdulov, G. Lybzikov // 9th International conference on Fundamental and applied MHD, Thermo acoustic and Space technologies PAMIR-14, c. Riga. – 2014. – P. 101–105.
80. Avdulov, A. Electromagnetic Modification of Aluminium Ingots in Rotary Casting Machine / A. Avdulov, I. Gudkov, Y. Avdulova // Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications, Switzerland. – 2015. – Vol. 698. – P. 193–198.
81. Avdulov, A. Numerical simulation of the peration modes of the cylindrical MHD-pump for dispensing molten aluminum from the stationary mixer / E. Golovenko, V. Goremykin, E. Pavlov, V. Kovalsky, A. Avdulov, Y. Avdulova // Journal Magnetohydrodynamics, Latvia, Salaspils-1, Institute of Physics. – 2011. – P. 105–114.
82. AMAG Casting GmbH [корпоративный сайт]. URL: <https://amag.at> (дата обращения: 07.05.2015).
83. ANSYS Help [Электронный ресурс]: ANSYS Help system – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM).
84. Atamanenko, T. V. Influence of Ultrasonic Melt Theatment on structure foramation in aluminiumalloys with high amount of transition metals / T. V. Atamanenko, D. G. Eskin, L. Katgerman // Light metals. – 2009. – P. 827- 830.
- 85 Baake, E. LES modeling of the cold crucible melting processes / E. Baake, A. Umbrashko, A. Jakovics. // Electromagnetic processing of materials. The 2nd Sino-German workshop, Dresden, – 2005. – 26 p.
86. Boender, W. Numerical Simulation of DC Casting; Two Ways to Interpret the Results of a Thermo-Mechanical Model / W. Boender, A. Burghardt, E. P. van Klaveren // Continuous Casting: Proceedings of the International Conference on Continuous Casting of Non-Ferrous Metals. H. R. Müller. – 2006. – P. 189-193.
87. Brandt, R. Electrical Resistivity and Thermal Conductivity of Pure Aluminum and luminum Alloys up to and above the Melting Temperature / R. Brandt, G. Neuer // International Journal of Thermophysics. Vol. 28. No. 5. October 2007.

88. Brocato, C. M. Properzi updates the CCR (continius casting & rolling) technology with new rolling stands / C. M. Brocato // Presented at the 4th International Melt Quality Workshop, Istanbul, Turkey. – 2008.
89. Continuus-Properzi S.p.A. [корпоративный сайт]. URL: <http://properzi.com/> (дата обращения: 06.05.2015).
90. Continuus-Properzi S.p.A. [корпоративный сайт]. URL: <http://www.properzi.com/literature/category/1-aluminium-al-alloys-rod?download=2:properzi-up-dates-the-ccr-technology-with-new-rolling-stands> (дата обращения: 04.09.2014).
91. Detomi, A. M. The impact of TICAL and TIBAL grain refiners on casthouse processing / A. M. Detomi, A. J. Messias, S. Majer, P. S. Cooper // Light metals. – 2011.
92. Deyang Dongjiagang Mechanical & Electrical Equipment Co., Ltd. [корпоративный сайт]. URL: <http://dongjiagang.en.alibaba.com/> (дата обращения: 06.05.2015).
93. Deyang Hongguang Machine Equipments Co., Ltd [корпоративный сайт]. URL: <http://schgkj.cn/> (дата обращения: 06.05.2015).
94. Kolesnichenko, A. F. Magneto-pulse mold stirring and centerline defects by continuous steel casting / A. F. Kolesnichenko, A. A. Kolesnichenko, V. V. Buryak // The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials «EPM 2006», Sendai, Japan, October 23–27, 2006. – P. 57–62.
95. Ferziger, J. H. Computational methods for fluid dynamics / J. H. Ferziger, M. Peric. – Berlin, Springer verlag, 2002. – 431 p.
- 96 Frishfelds, V. Study of melting dynamics of oxides in inductor crucible / V. Frishfelds, A. Jakovics, B. Nacke // Heating by electromagnetic sources (HES-04), Padua – 2004. – P. 157–164.
97. Kolmogorov, A. N. Equations of turbulent motion of an incompressible fluid / A. N. Kolmogorov // Izvestia Academy of Sciences, USSR; Physics 6:56-58. 1942.

98. Kuwana, K. Calculation of heat transfer coefficients at the ingot surface during DC casting / K. Kuwana, S. Viswanathan, John A. Clark, A. Sabau, M. I. Hassan, K. Saito, S. Das // *Light metals*. – 2005. – P. 989–993.
99. Landaberea, A. Numerical Simulation of DC Casting; Numerical Simulation of the Upward Continuous Casting of Magnesium Alloys / A. Landaberea, P. Pedrós, E. Anglada, I. Garmendia // *Continuous Casting: Proceedings of the International Conference on Continuous Casting of Non-Ferrous Metals*. H. R. Müller. – 2006. – P. 202–208.
100. Morishita, M. Effect of Grain Refiner on Surface Crack of 3004 Alloy during DC Casting / M. Morishita, K. Tokuda // *Continuous Casting: Proceedings of the International Conference on Continuous Casting of Non-Ferrous Metals*. H. R. Müller. – 2006. – P. 29–35.
101. Nastac, L. Multiscale Modeling of Ingot Solidification Structure Controlled by Electromagnetic and Ultrasonic Stirring Technologies / L. Nastac. – The University of Alabama, 2012. – 8 с.
102. National Instruments Corporation [корпоративный сайт]. URL: <http://russia.ni.com> (дата обращения: 04.12.2014).
103. Sabau, A. Heat transfer boundary conditions for the numerical simulation of the DC casting process / A. Sabau, K. Kuwana, S. Viswanathan, K. Saito, and L Davis // *Light metals*. – 2004. – P. 667–672.
104. Sommerhofer, H. A. New continuous casting process / H. Sommerhofer, P. Sommerhofer // *Light metals*. – 2006. – P. 865–868.
105. Sommerhofer, H. Influence parameters on continuous casting of aluminum / H. Sommerhofer // *Light metals*. – 2003. – P. 773–740.
106. Southwire Company LLC [корпоративный сайт]. URL: <http://southwire.com> (дата обращения: 06.05.2015).
107. Spitas, S. Numerical modeling of free surface dynamics of melt in the induction crucible furnace / S. Spitas, A. Jacovics, A. Baake, E. Nacke // *Fundamental and Applied MHD, Vol.2*, – Borgo, Corsica, France. – 2011. – P. 675–679.

108. Szajnar, J. Exogeneous inoculation of pure Al with use of electromagnetic field // J. Szajnar, T. Wróbel // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2010. – November.
109. Szajnar, J. Horizontal continuous casting of Al and Al-Si alloy in semi-industrial conditions // Jan Szajnar, Tomasz Wrobel. – 2013.– April.
110. Szajnar, J. Influence of electromagnetic field on pure metals and alloys structure // J. Szajnar, M. Stawarz, T. Wróbel, W. Sebzda // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2009. – May.
111. Szajnar, J. Methods of inoculation of pure aluminium structure // J. Szajnar, T. Wróbel // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2008. – March.
112. Szajnar, J. Influence of Inoculation on Properties of Aluminium EN AW-Al99,5 // J. Szajnar, T. Wróbel // Archives of foundry engineering. – 2007. – v. 7.
113. Taylor, J. A. Anomalous grain coarsening behavior in grain-refined aluminum alloys cast using low superheat / J. A. Taylor, H. Wang, D. H. St. John, I. F. Bainbridge // Light metals. – 2001.
- 114 Umbrashko, A. Melt flow and skull formation modelling possibilities for TiAl melting process in induction furnace with cold crucible / A. Umbrashko, A. Baake, A. Jakovics // Modeling for electromagnetic processing. Proceedings of the International scientific colloquium – Hanover. – 2008. – P. 331–336.
115. Voller, V. R. A Fixed-Grid Numerical Modeling Methodology for Convection-Diffusion Mushy Region Phase-Change Problems / V. R. Voller, C. Prakash // - International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1987. – Vol. 30. – P. 1709–1719.
116. Wachter, E. M. Anwendung der Instationären Flamelet Methode auf Diffusions Flammen im Post-Processing-Modus / E. M. Wachter. – VDI Verlag. – 2005.
117. Voller, V. R. Modeling Solidification Processes / V. R. Voller // Technical report. Mathematical Modeling of Metals Processing Operations Conference, Palm Desert, CA American Metallurgical Society. – 1987.

118. Voller, V. R. A Computational Modeling Framework for the Analysis of Metallurgical Solidification Process and Phenomena / V. R. Voller, A. D. Brent, K. J. Reid // Technical report. Conference for Solidification Processing Ranmoor House, Sheffield, England. – 1987.
119. Wróbel, T. Review of inoculation methods of pure aluminium primary structure / T. Wróbel // Metal 2011. – 2011. – August.
120. Wróbel, T. The influence of inoculants sort on pure Al structure / T. Wrobel // Metal 2012. – 2012. – February.
121. Wróbel, T. The influence of inoculation type on structure of pure aluminium / T. Wrobel // Metal 2012. – 2012. – March.
122. Zhang H. The role of B element on refining purity aluminium / H. Zhang // Light metals. – 2006. – P. 777–782.
123. Zhang, L. Effect of ultrasonic power and casting speed on solidification structure of 7050 aluminum alloy ingot in ultrasonic field / L. Zhang, J. Yu, X. Zhang // Journal of J. Cent. South Univ. Technol № 17. – 2010. – P. 431–436.
124. Zhang, L. Formation of microstructure in Al-Si alloys under ultrasonic metl treatment / L. Zhang, D. G. Eskin , A. Miroux and L. Katgerman // Light metals. – 2010. – P. 999–1004.
125. Zhu, Q. Effect of application of out-of-phase electromagnetic field on horizorntal direct chill casting of 7075 aluminum alloy / Q. Zhu, Z. Zhao X. Wang, J. Cui // Light metals. – 2010. – P. 703–710.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ООО

«НПЦ Магнитной гидродинамики»

В. Н. Тимофеев

«15» января 2015г.

**АКТ**

Внедрения в производственную деятельность результатов диссертационной работы Авдулова Антона Андреевича «Электромагнитный модификатор слитка в роторной литейной машине»

Результаты научно-исследовательской работы Авдулова А. А. использованы техническими специалистами ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» при разработке технических условий №3442-014-35131371-2014 на комплекс магнитного гидродинамического модификатора типа МГДМ предназначенного для модифицирования структуры слитка в процессе кристаллизации на роторной литейной машине. Применение результатов позволило:

1. Определить конструкцию и схему соединения обмотки индуктора модификатора, обеспечивающие симметричную нагрузку фаз.
2. Выработать рекомендации по проектированию и испытаниям электромагнитных модификаторов структур слитков на роторных литейных машинах.

Начальник конструкторского отдела
ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики»

 С. Н. Перфильев

Коммерческий директор
ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики»

 С. А. Бояков

ПРИЛОЖЕНИЕ 2



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе СФУ

М. В. Румянцев

«__» _____ 2015г.

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы Авдулова Антона Андреевича в учебном процессе Политехнического института ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Теоритические результаты диссертационной работы Авдулова А. А. на тему «Электромагнитный модификатор слитка в роторной литейной машине» использованы при преподавании дисциплин «Электротехнические комплексы и системы», «Проектирование ЭТУС» бакалаврам специальности 551300 – «Электротехника, электромеханика и электротехнология» и магистрам направления 140400.68 – «Электроэнергетика и электротехника».

Практические результаты диссертационной работы использованы при преподавании дисциплины «Математическое и физическое моделирования ЭТУС» бакалаврам специальности 551300 – «Электротехника, электромеханика и электротехнология» и магистрам направления 140400.68 – «Электроэнергетика и электротехника».

Использование результатов диссертационной работы повышает качество подготовки специалистов в области электротехнологии и электротехники и расширяет диапазон знаний студентов.

Заведующий кафедрой
«Электротехнология
и электротехника» ПИ СФУ
д.т.н., профессор


В. Н. Тимофеев

Директор ПИ СФУ
д.т.н., профессор


Е. А. Бойко