

На правах рукописи



АВДУЛОВ АНТОН АНДРЕЕВИЧ

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОДИФИКАТОР СЛИТКА
В РОТОРНОЙ ЛИТЕЙНОЙ МАШИНЕ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат

диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Красноярск – 2015

Работа выполнена на кафедре «Электротехнология и электротехника» в ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Тимофеев Виктор Николаевич

Официальные оппоненты: **Сарапулов Федор Никитич**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Уральский
федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина», кафедра
«Электротехника и электротехнологические
системы», профессор

Мягков Виктор Григорьевич
доктор физико-математических наук, старший
научный сотрудник, Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики им. Л. В. Киренского
Сибирского отделения Российской академии
наук, лаборатория физики магнитных пленок,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Новосибирский государственный
технический университет»

Защита состоится «17» декабря 2015г. в 14:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 999.007.02 на базе Сибирского федерального
университета и Института вычислительного моделирования СО РАН по
адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ауд. УЛК 115.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте
Сибирского федерального университета www.sfu-kras.ru.

Автореферат разослан 16 ноября 2015г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бронов Сергей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 \varnothing 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 разработка 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 А. *Jakovics*, Ю. М. Гельфгата, А. *Bojarevics* (Латвия), Е. *Baake*, В. *Nacke* (Германия), Т. *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 моделирования, 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введение обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, приведены научная новизна, теоритическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, отражены вопросы апробации и достоверности полученных результатов.

В первой главе рассмотрен агрегат непрерывного литья и прокатки для производства катанки из алюминиевых сплавов; рассмотрены способы и технологии улучшения структуры слитков; проведен анализ способов и устройств для электромагнитного воздействия на расплав в процессе кристаллизации; проведен анализ конструкции и особенностей работы роторных литейных машин с точки зрения применения МГД технологий; рассмотрены современные методы математического моделирования тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов; определены и поставлены задачи исследования и разработки электромагнитного модификатора структуры слитка.

Все литейно-прокатные агрегаты для производства алюминиевой катанки имеют схожую структуру (рис. 1) 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.

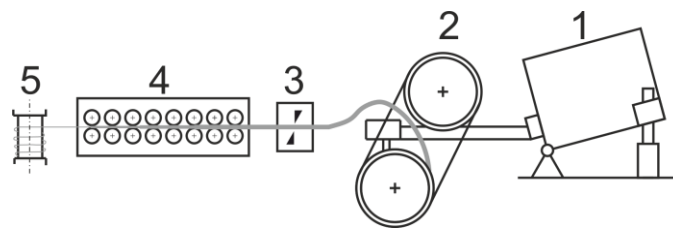


Рис. 1

Структуры слитка зависит от: химического состава сплава, наличия примесей и динамики его кристаллизации. Основные работы по улучшению структуры слитков связаны с добавлением в расплав модификаторов Al-Ti-B, ультразвуковым и электромагнитным воздействием на расплав.

При электромагнитном воздействии в расплаве образуются МГД течения, интенсифицирующие процесс кристаллизации за счет роста теплопередачи через фронт кристаллизации. Работы по данной теме сводятся к совокупности теоретических и экспериментальных исследований по определенным технологическим процессам в черной и части цветной металлургии.

С целью улучшения структуры слитка в роторной литейной машине предлагается разработать индукционную установку (электромагнитный модификатор) для воздействия на жидкую фазу в процессе кристаллизации.

Литейная машина (рис. 2) работает следующим образом: расплав из миксера поступает в лоток с носиком 1 из которого подается в литейную форму, образованную торцевым углублением вращающегося колеса кристаллизатора 2 и движущейся стальной ленты 3, которая для плотного прилегания прижата к колесу роликом 4. Поступивший расплав теряет теплоту и кристаллизуется. Для отвода теплоты от кристаллизатора используются оросители 5 и подается вода внутрь колеса 2. Слиток 7 извлекается из полости кристаллизатора съемником 6 и подается через ролики 8 на прокатный стан. Жидкая фаза слитка 10 имеет протяженность по колесу 2. На сечении А-А представлен кристаллизатор, состоящий из медного бандажа 12, конструкционных колец 13, стальной ленты

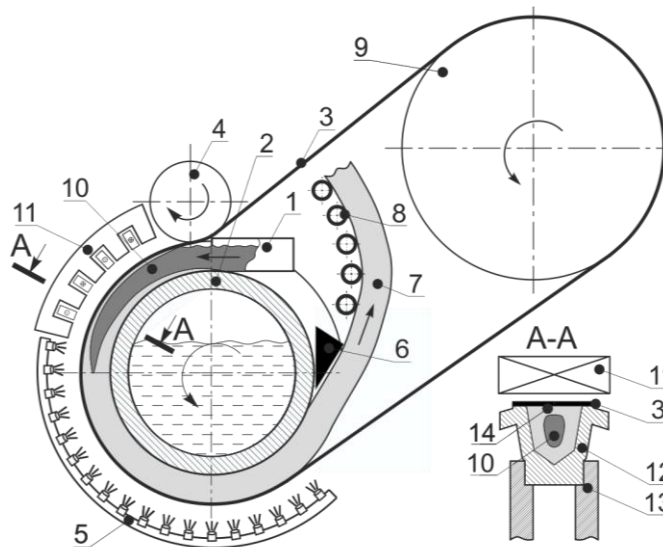
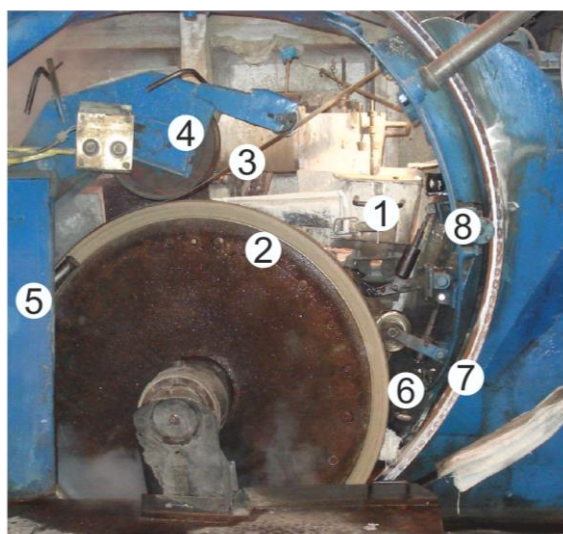


Рис. 2

3, жидкой 10 и твердой 14 фаз слитка. Медный бандаж имеет массивную конструкцию, эффективно экранирующую электромагнитное поле. В связи с этим индуктор 11 электромагнитного модификатора предлагается установить с торцевой стороны литейного колеса за прижимным роликом.

Для определения размеров и конструкции индуктора, его положения относительно литейной машины, режимов его работы, обеспечивающих модифицирование структуры слитка и получение заготовки высокого качества необходимо провести исследования протекающих в системе физических процессов и установить основные зависимости преобразования электрической энергии. Исходя из обзора и анализа современных методов исследования данных процессов, предложено выполнить работу путем использования численного математического моделирования, а слитки, закристаллизованные под воздействием электромагнитного поля, получить на физической модели и провести анализ структуры. При численном моделировании использовать программы *Fluent*, *ANSYS* и *CFX*.

Во второй главе предложен алгоритм математического моделирования тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов, протекающих в исследуемой системе; построены математические модели; проведен анализ интегральных и дифференциальных характеристик.

На рис. 3 представлена блок-схема сопряженных тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов.



Рис. 3

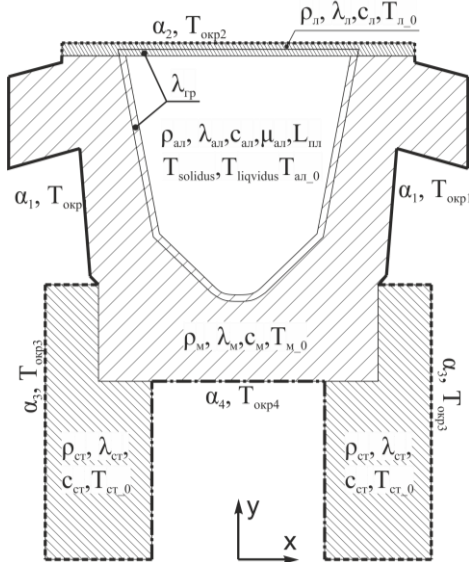


Рис. 4

На первом этапе производится расчет процесса кристаллизации слитка с целью определения геометрии жидкой сердцевины и влияния на нее параметров литья.

Задача решается в двухмерной постановке (рис. 4), так как теплота отводится в плоскости сечения кристаллизатора и слитка. Трехмерная геометрия жидкой сердцевины слитка строится по специальному алгоритму, путем обобщения границ раздела фаз для разных времен расчета.

Число Рэлея Ra , определенное при предварительной оценке, находится в диапазоне 120 – 1200, что требует учитывать свободно конвективные течения, образованные разностью плотностей расплава.

С учетом постановки задачи и принятых допущений, система уравнений, описывающих процесс кристаллизации состоит из уравнений неразрывности (1), движения (2) и энергии (3):

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_0 \mathbf{v})}{\partial t} + (\rho_0 \mathbf{v} \cdot \nabla) \times \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + \rho(T) \mathbf{g} + \frac{(1-\beta)}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} \mathbf{v}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_0 H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 \mathbf{v} H) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (3)$$

Для учета свободно конвективных движений в системе используется приближение Буссинеска–Обербека:

$$\rho(T) = \rho_0 (1 - k_\beta (T - T_0)). \quad (4)$$

В уравнения (1-4) \mathbf{v} – вектор скорости (м/с); ρ_0 – плотность расплава при базовой температуре (кг/м³); t – время (с); p – давление (Па); $\bar{\tau}$ – тензор вязких напряжений; \mathbf{g} – вектор ускорения свободного падения (м/с²); β – доля жидкой фазы; ε – малое число предотвращающее деление на 0; A_{mush} – постоянная скорости фазного перехода (кг/(м³с)); h – удельная энтальпия (Дж/кг); λ – коэффициент теплопроводности (Вт/(м*К)); T – температура (К). T_0 – базовая температура (К); k_β – коэффициент линейного расширения (1/К).

Для границ, соответствующих стенкам жидкого объема, выполняется условие прилипания ($\mathbf{v}=0$). Теплообмен стенок с окружающей средой происходит по закону Ньютона–Рихмана:

$$-\lambda |\nabla T| = \alpha (T - T_{окр}), \quad (5)$$

где: α – коэффициент теплоотдачи (Вт/(м²*К)); $T_{окр}$ – температура окружающей среды (К).

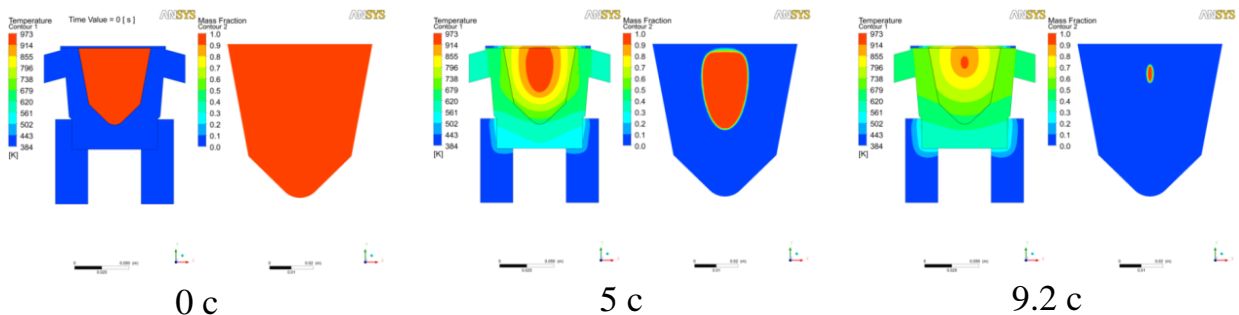


Рис. 5

В результате решения нестационарной термогидродинамической задачи получены картины распределения теплового поля и фазового состояния металла для разных моментов времени. Полная кристаллизация расплава происходит менее чем за 10 с (рис. 5). К концу процесса кристаллизации в медном бандеже

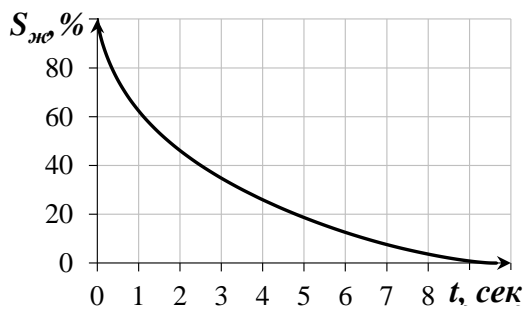


Рис. 6

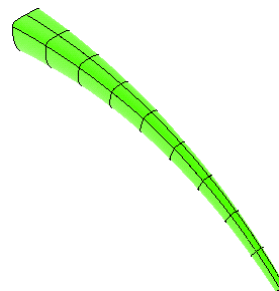


Рис. 7

наблюдается существенный градиент температур (порядка 200–250 К) из чего можно сделать вывод о преобладании процесса аккумуляции теплоты расплава медным бандажом. В результате расчета получена зависимость доли жидкой фазы от времени (рис. 6), на основании которой построена трехмерная модель жидкой сердцевины слитка (рис. 7).

На протяжённость жидкой фазы оказывают существенное влияние температуры кристаллизатора и расплава. Путем обработки полученных характеристик была построена эмпирическая зависимость протяженности жидкой фазы слитка (в градусах) по литейному колесу:

$$\varphi_{\text{жф}} = \frac{(k_1 T_{\text{кр}} T_{\text{р}} - k_2 T_{\text{кр}} + k_3 T_{\text{р}} - k_4) n_{\text{кр}}}{\pi D_{\text{сл}}}, \quad (6)$$

где, $T_{\text{кр}}$ – температура кристаллизатора ($^{\circ}\text{C}$); $T_{\text{р}}$ – температура расплава ($^{\circ}\text{C}$); $n_{\text{кр}}$ – скорость вращения литейного колеса (об./мин); $D_{\text{сл}}$ – средний диаметр намотки слитка (м), $k_1=0,0049 \left[\frac{\text{град} \cdot \text{мин} \cdot \text{м}}{\text{C}^{\circ 2}} \right]$, $k_2=2,475 \left[\frac{\text{град} \cdot \text{мин} \cdot \text{м}}{\text{C}^{\circ}} \right]$, $k_3=0,601 \left[\frac{\text{град} \cdot \text{мин} \cdot \text{м}}{\text{C}^{\circ}} \right]$, $k_4=303,426 \left[\text{град} \cdot \text{мин} \cdot \text{м} \right]$ – коэффициенты уравнения.

Стальная лента за счет малой толщины быстро аккумулирует тепло и прогревается до температуры слитка. За счет этого в зоне слитка, прилегающего к стальной ленте, в начале литья образуется твердая фаза толщиной 3–4 мм и существует на всем протяжении процесса.

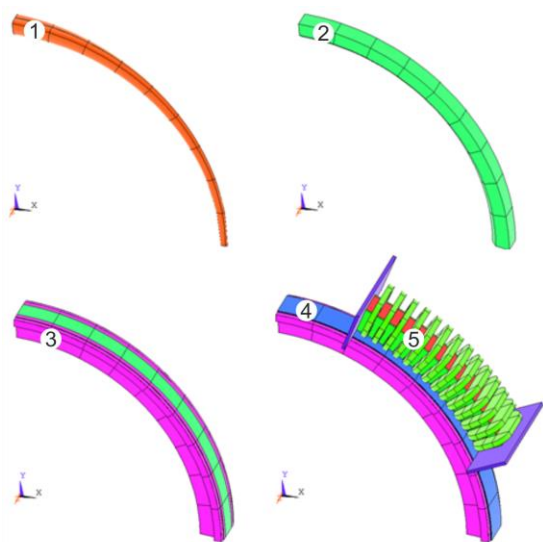


Рис. 8

На втором этапе производится расчет электромагнитных процессов протекающих в системе «индуктор–кристаллизатор–слиток». Геометрия расчетной области представлена на рис. 8 и состоит из жидкой 1 и твердой 2 фаз слитка, медного бандажа 3, стальной ленты 4 и индуктора электромагнитного модификатора 5. Исходя из длины жидкой фазы был принят индуктор с разверткой по литейному колесу в 45° . Индуктор представляет из себя дугообразный магнитопровод с намотанными через ярмо катушками, прижимными и

торцевыми пластинами. По причине наличия продольного краевого эффекта в индукторе заложены две компенсирующие катушки. Общее число катушек равно 14.

Предварительно рассчитанное для системы магнитное число Рейнольдса Re_m имеет значение менее 0,13, что существенно меньше 1. Это позволяет не учитывать в математической модели влияния поля скоростей расплава и вращения колеса на электромагнитное поле.

С учетом постановки задачи и принятых допущений система уравнений, описывающих электромагнитные процессы, состоит из уравнений векторного потенциала, непрерывности и тока:

$$\nabla^2 A = -\mu_a \delta, \quad \nabla \cdot \delta = 0, \quad \delta = -\gamma \frac{\partial A}{\partial t}. \quad (7)$$

В системе уравнений (7) A – векторный потенциал (Вб/м); μ_a – абсолютная магнитная проницаемость (Гн/м); δ – вектор плотности тока (A/m^2); γ – удельная электрическая проводимость ($1/Ohm \cdot m$). Принято, что расчетную область окружает среда с идеальными магнитными свойствами ($\mu = \infty$).

Решается гармоническая задача для комплексных величин векторного магнитного потенциала, в результате которой для каждого вектора существовала мнимая и вещественная части, которые в дальнейшем преобразовывались в действительные величины. Дифференциальные характеристики электромагнитного поля, такие как магнитная индукция, напряженности электрического и магнитного полей, средние за период векторы удельных электромагнитных сил и удельной тепловой мощности определяются следующим образом:

$$\mathbf{B} = \nabla A, \quad \mathbf{E} = \frac{\partial A}{\partial t}, \quad \mathbf{H} = \frac{\nabla A}{\mu_a}, \quad \mathbf{f}_{эм} = \delta \times \mathbf{B}, \quad q_{эм} = \gamma E^2. \quad (8)$$

Значения активной, реактивной и полной мощностей определяются по выражениям:

$$P = \int q_{эм} dV, \quad Q = \omega \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} dV, \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (9)$$

где dV – элементарный объем системы (m^3); ω – угловая частота (рад/с).

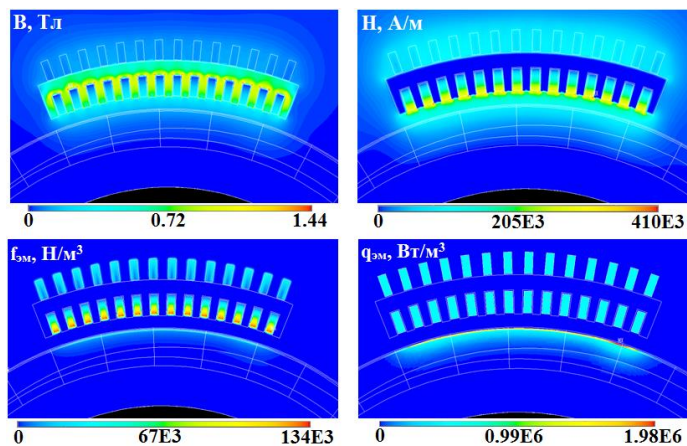


Рис. 9

Картины распределения B , H , $f_{эм}$ и $q_{эм}$ в системе представлены на рис. 9. Так как бегущее электромагнитное поле экранируется ферромагнитной лентой и твердой фазой слитка, проведены исследования их влияния на процесс электромагнитного воздействия и корректность расчета.

При исследовании магнитные свойства ленты кристаллизатора задавались через кривую намагничивания (ферромагнитная лента). Для неферромагнитной ленты относительная магнитная проницаемость μ принималась равной единице. Рассмотрены две схемы соединения обмотки индуктора с $p = 1$ и $p = 2$ с фазной зоной $\beta = 60^\circ$.

На рис. 10 представлены зависимости тангенциальных электромагнитных сил в жидкой фазе слитка (F_τ) и значения индукции в стальной ленте ($B_{л.}$) от величины линейной токовой нагрузки ($A_{л.}$) для разных схем включения обмотки и магнитных свойств ленты. Использование не ферромагнитной ленты позволяет получить большие значения электромагнитных сил. Для ферромагнитной ленты при определенной токовой нагрузке происходит

насыщение и магнитное поле проникает в слиток. Схема с числом пар полюсов $p = 1$ обеспечивает насыщение ленты при меньшей $A_{л}$, чем схема с $p = 2$, это связано с большей величиной магнитного потока приходящегося на полюс индуктора.

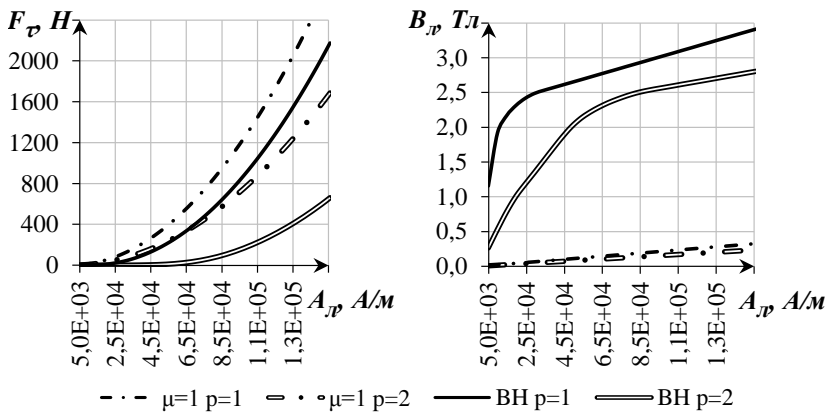


Рис. 10

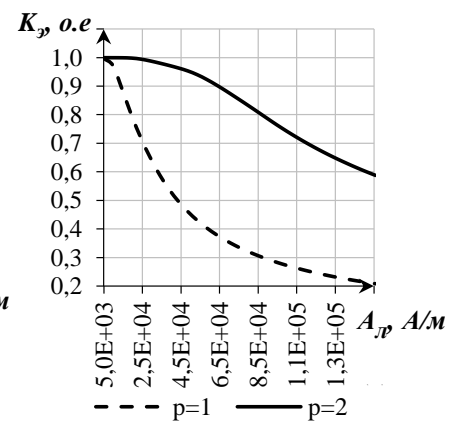


Рис. 11

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

$$K_3 = \frac{F_{l_i}/F_{max} - F_{BH_i}/F_{max}}{F_{l_i}/F_{max}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

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).

Зависимость K_3 от линейной токовой нагрузки представлена на рис. 11. Для экранирования не более 30% магнитного потока необходимо, чтобы линейная токовая нагрузка была не менее $8.5E4$ А/м.

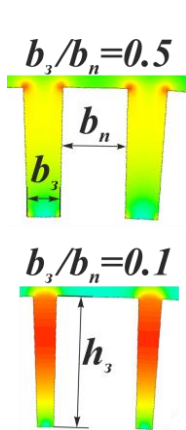


Рис. 12

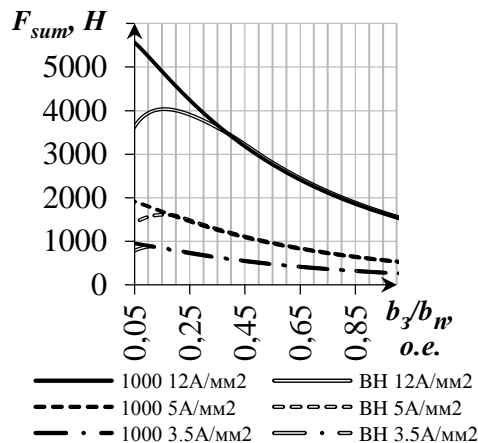


Рис. 13

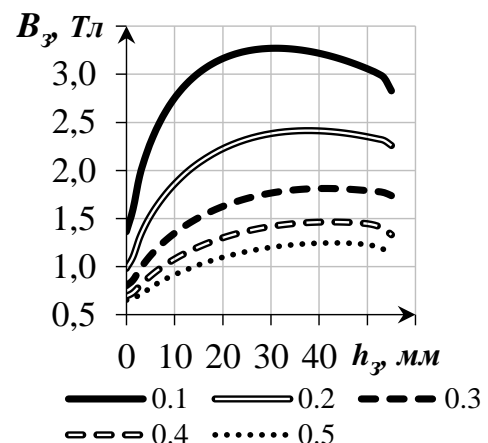


Рис. 14

Проведены исследования влияния ферромагнитных свойств магнитопровода на параметры системы для индукторов с разным отношением ширины зубца к ширине паза b_3/b_n (рис. 12). Свойства магнитопровода задавались через постоянную магнитную проницаемость $\mu = 1000$ и кривую намагничивания.

На рис. 13 представлены зависимости суммарных электромагнитных сил в жидкой фазе слитка (F_{sum}) от отношения b_3/b_n для трех плотностей токов в катушках индуктора и магнитных свойств магнитопровода. Характеристики, приведённые на рис. 13, 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 рис. 14 приведено распределение индукции по высоте зубца для разных отношений b_3/b_n при плотности тока 5 А/мм^2 и учете кривой намагничивания. В зависимости от плотности тока в обмотке максимум сил приходится при значении b_3/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.

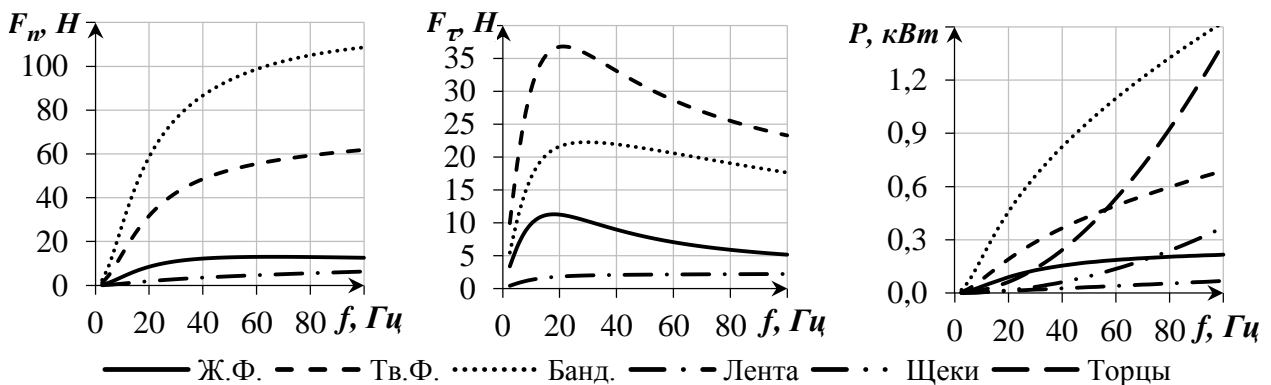


Рис. 15

На рис. 15 представлены зависимости интегральных значений нормальной и тангенциальной компонент электромагнитных сил и выделяемой тепловой мощности в элементах системы в зависимости от частоты тока питающего индуктор. Усилия, развиваемые в медном бандаже и твердой фазе слитка, от 2 до 6 раз больше, чем в жидкой фазе слитка.

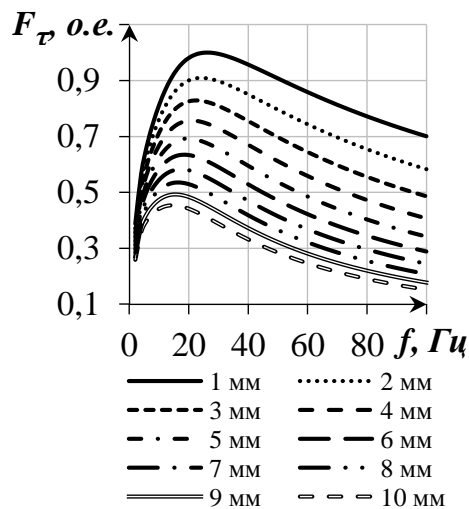


Рис. 16

Выделяемая тепловая мощность также существенно отличается и резко увеличивается при росте частоты. При росте частоты тока тангенциальная компонента сил 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.

На рис. 16 представлены тангенциальные силы в жидкой фазе слитка от частоты тока при разных толщинах твердой фазы между индуктором и жидкой сердцевиной слитка. Значения сил приведены в о. е., относительно максимальной силы, развиваемой при толщине

твердой фазы 1 мм. В зависимости от толщины твердой фазы оптимальная частота находится в диапазоне от 15 до 30 Гц.

Таблица 1

№ 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	

В табл. 1 приведены схемы включения обмотки индуктора. В схемах № 3, № 4, № 5, № 6 разными способами подключены компенсирующие катушки. Схемы № 7 и № 8 создают два сходящихся или расходящихся бегущих магнитных поля.

На рис. 17 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 усилия, 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.

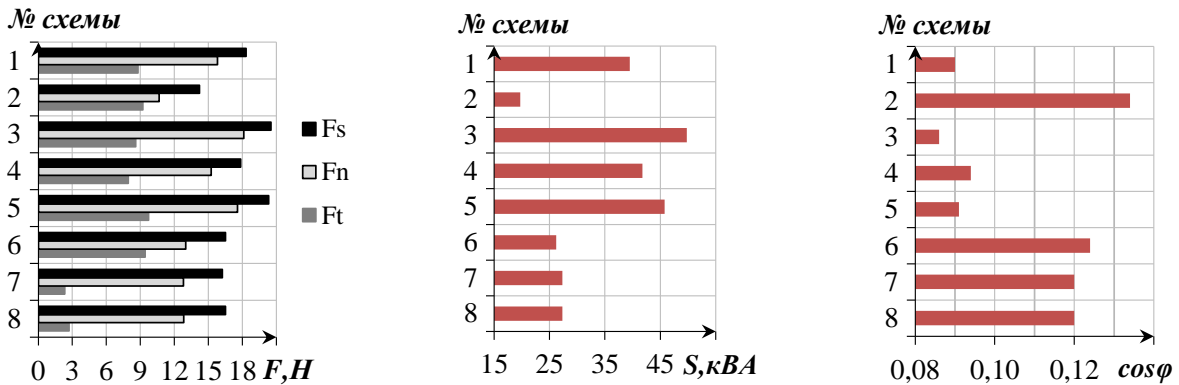


Рис. 17

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. Система уравнений, описывающих гидродинамические процессы, протекающие в жидкой фазе слитка при электромагнитном воздействии базируются на уравнениях неразрывности и движения:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad \frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + (\rho \mathbf{v} \cdot \nabla) \times \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + \mathbf{f}_{\text{эм}}. \quad (11)$$

Число Рейнольдса имеет значение порядка 3000, что требует учета в системе уравнений (11) турбулентного характера течения расплава. Для этого используются две модели турбулентности: $k-\omega$ и *Large eddy simulation (LES)*. Первая модель позволяет получить осреднённые величины течения расплава, что дает общую картину характера течений, вторая позволяет получить информацию о влиянии нестационарных эффектов турбулентного течения. Для границ, соответствующих стенкам жидкого объема выполняется условие прилипания. Решалась переходная задача. Шаг по времени изменялся в зависимости от усредненного по объему числа Куранта.

В результате решения задачи были получены картины течений расплава в жидкой фазе слитка: используя модели турбулентности $k-\omega$ (рисунок 18) и LES (рис. 19). Электромагнитное поле создает одноконтурную или двухконтурную циркуляцию расплава вытянутую по длине жидкой фазы. При использовании модели LES течение имеет нестабильный характер с множеством вихрей.

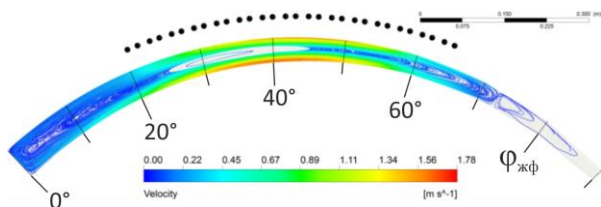


Рис. 18

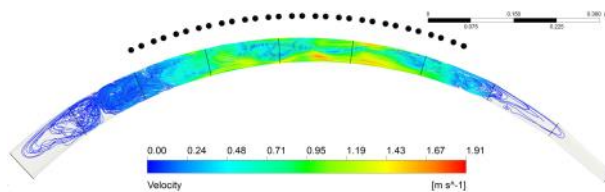


Рис. 19

На рис. 20 приведены картины распределения скоростей в жидкой фазе слитка при разных схемах включения обмотки, полученные для модели турбулентности $k-\omega$ по оси абсцисс отложены градусы от вертикально оси колеса кристаллизатора. На графиках двумя чертами обозначена зона установки индуктора. 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 не дают никаких преимуществ.

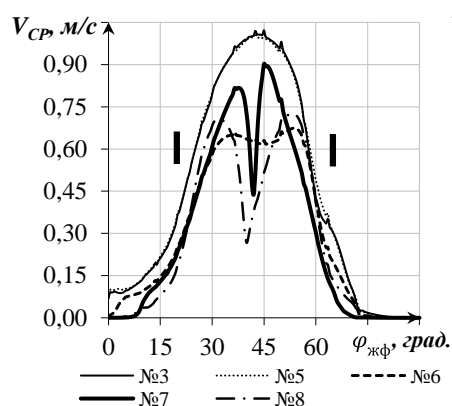


Рис. 20

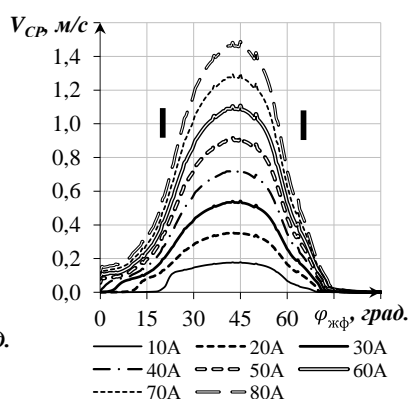


Рис. 21

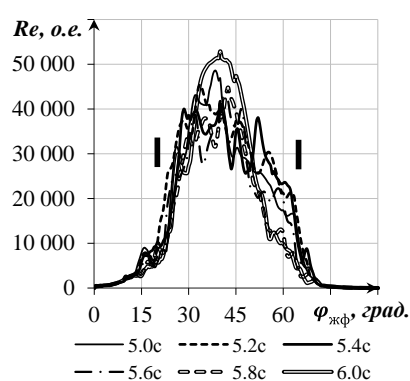


Рис. 22

Направление движения бегущего поля и изменение частоты тока в диапазоне 20–50 Гц не оказывают существенного влияния на характер и интенсивность течений. Увеличение величины тока в индукторе (рис. 21) 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.

На рис. 22 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 52000, что говорит о высокой турбулентности течений по длине жидкой фазы.

Решение нестационарной термогидродинамической задачи позволило определить фазовые состояния металла внутри кристаллизующегося слитка,

построить трехмерную модель жидкой сердцевины слитка. В результате анализа электромагнитных процессов в системе индуктор-кристаллизующийся слиток получена картина распределения удельных электромагнитных сил в области жидкой сердцевины, которая позволила на следующем этапе определить характер течений на границе фазового перехода. Определены геометрия, схемы соединения катушек в обмотке индуктора, режимы его работы и их связь с распределением скоростей жидкого металла и условием кристаллизации слитка.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований на лабораторной установке для литья слитков с электромагнитным воздействием; проведена верификация результатов математического моделирования; сопоставлены результаты физического и математического моделирования, приведен анализ структуры слитков.

Для оценки степени улучшения структуры слитков была создана лабораторная установка (рис. 23) состоящая из индукционной тигельной печи 1 с

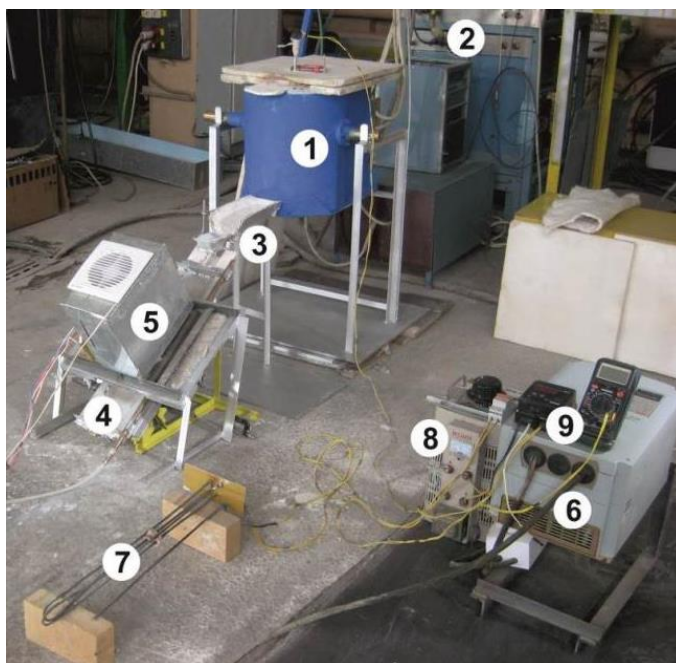
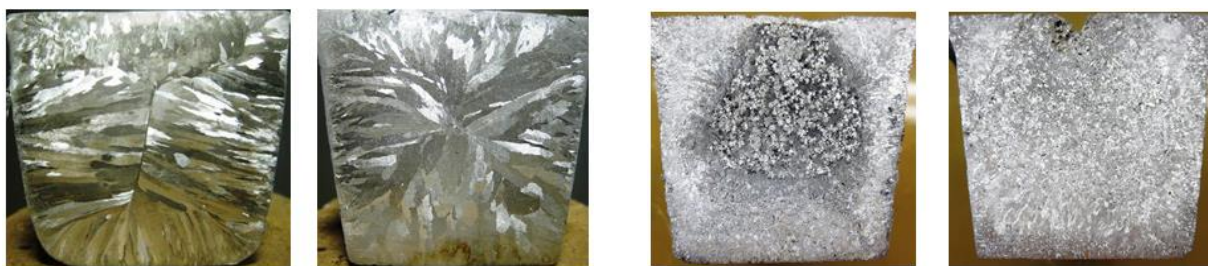


Рис. 23

источником питания 2, заливочного лотка 3, изложницы 4, индуктора 5 с источником питания 6, нагревателя изложницы 7 с автотрансформатором 8 и измерителей температуры 9 изложницы и расплава. Изложница выполнена из нержавеющей стали и позволяет отливать слитки длиной до 650 мм. Площадь и форма поперечного сечения слитка сопоставима со слитком, получаемым на промышленной установке. Индуктор длиной 300 мм представляет собой разомкнутый магнитопровод с семью зубцами и шестью катушками со способом намотки через ярмо магнитопровода. Катушки соединены по схеме *AZBXCY*.

Эксперименты проводились на сплаве марки А5Е следующим образом: предварительно прогревается изложница до заданной температуры, через лоток заливается расплав в изложницу, выдерживается время с целью образования жидкой сердцевины слитка, включается индуктор и осуществляется электромагнитное воздействие на расплав до полной кристаллизации.

Путем подбора параметров степени прогрева изложницы и интенсивности ее охлаждения после заливки были получены слитки со структурой аналогичной промышленным слиткам (рис. 24). При данных параметрах охлаждения были отлиты все экспериментальные слитки.



Промышленный образец Лабораторный образец

Рис. 24

Дефекты структуры

Рис. 25

В процессе проведения экспериментов обнаружен эффект разрушения целостности твердой фазы слитка, расположенной между индуктором и жидкой фазой, вызванный интенсивным теплообменом на границе раздела фаз (рис. 25). Проявление данного эффекта на промышленной установке недопустимо, так как ведет к интенсивному окислению сплава и замешиванию окислов внутрь слитка, т.е. браку продукции. Для исключения промывтия, в процессе кристаллизации между индуктором и изложницей подавался сжатый воздух, обеспечивая повышение теплоотвода с поверхности изложницы.



Без МГД воздействия

10 Гц

30 Гц

50 Гц

100 Гц

Рис. 26

На рис. 26 представлены образцы макроструктур слитков, отлитых при токе в индукторе 20 А с разной частотой. Сравнение структур производилось 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.

Сопоставление результатов физического и математического моделирования производилось 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. Для сопоставления результатов было определено удельное значение электромагнитной силы на единицу длины индуктора по формуле:

$$f_{\tau} = F_{\tau} / l_{\text{инд}} \quad (12)$$

где F_{τ} – полученная в результате математического моделирования тангенциальная компонента вектора электромагнитных сил (Н); $l_{\text{инд}}$ – длина индуктора лабораторной установки (м).

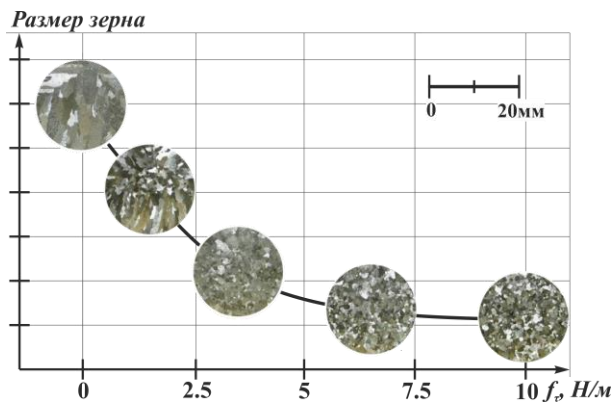


Рис. 27

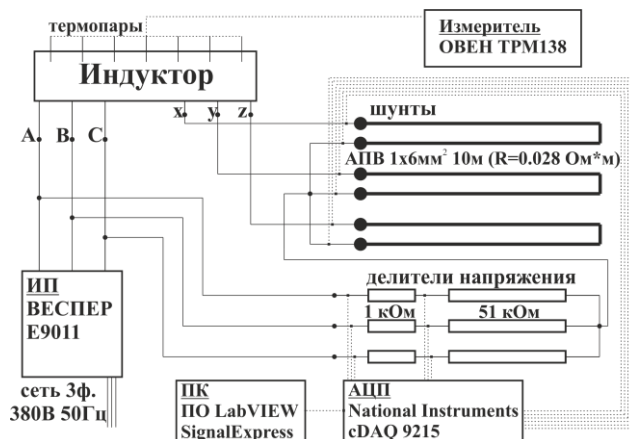


Рис. 28

Значения удельных электромагнитных сил на единицу длины индуктора f_{τ} и полученные при этих значениях образцы макроструктур представлены на рис. 27. Как видно из зависимости, увеличение электромагнитных сил до 7 Н/м приводит к существенному измельчению структуры слитка. Дальнейшее увеличение сил не приводит к заметному изменению макроструктуры. Таким образом, путем регулирования величины тока в индукторе электромагнитного модификатора, способного развивать усилие в жидкой фазе слитка вплоть до $f_{\tau} = 7$ Н/м, можно получать требуемую по технологии структуру слитка.

Для измерения энергетических характеристик, с целью проверки адекватности построенной математической модели, был разработан и собран стенд, схема которого представлена на рис. 28. Измерение магнитного поля индуктора осуществлялось датчиками Холла вдоль поверхности индуктора и на разных расстояниях от индуктора. Сравнение результатов математического моделирования и измерений энергетических характеристик и магнитного поля приведены на рис. 29. Измерение поля проводилось на разных расстояниях от индуктора. На рисунках линиями обозначены результаты математического моделирования, символами обозначены измеренные величины. Среднее отклонение результатов не превышает 10%, что говорит о достаточной достоверности разработанной математической модели.

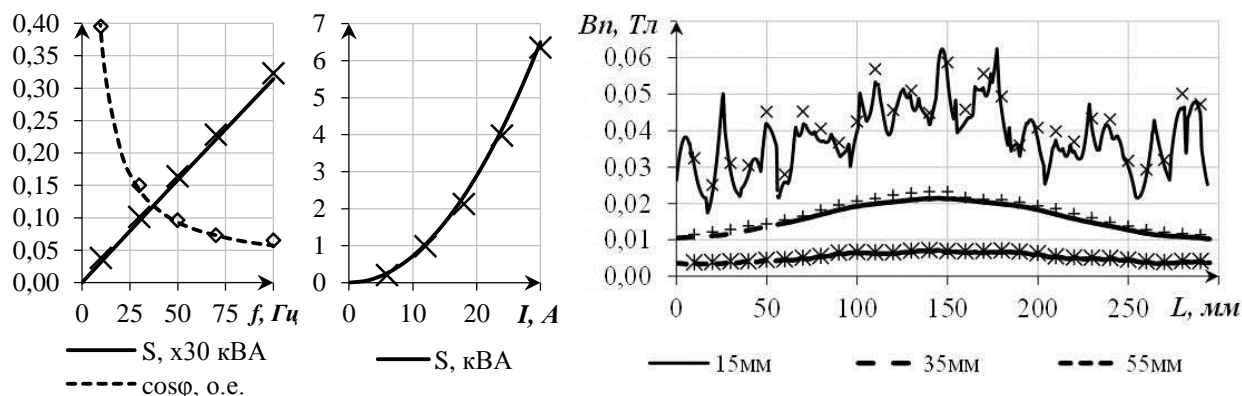


Рис. 29

Наличие достоверной математической модели и полученные экспериментальные результаты позволяют разработать электромагнитный модификатор для опытно-промышленной установки, определить его параметры и режимы работы.

В четвертой главе изложены рекомендации по проектированию электромагнитного модификатора для промышленных установок непрерывного литья алюминиевых слитков, приведено описание его конструкции и режимов работы; предложена симметричная по фазам обмотка.

Электромагнитный модификатор разработан для установки на кристаллизатор литейно-прокатного агрегата по производству алюминиевой катанки. Агрегат расположен в Филиале ОАО «СУАЛ» ИркАЗ-СУАЛ» (входит в состав Объединённой компании «РУСАЛ»). Комплекс изготовлен ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» (г. Красноярск) согласно ТУ 3442-014-35131371-2014. Комплекс состоит из индуктора (рис. 30), силового шкафа (рис. 31), пульта управления (рис. 32), вентилятора с воздуховодами, оросителя и кабельных трасс.



Рис. 30



Рис. 31



Рис. 32

Индуктор представляет собой дугообразный магнитопровод с катушками, намотанными через ярмо. Магнитопровод индуктора изготовлен из электротехнической стали. Основные конструкционные элементы выполнены из нержавеющей стали, так как условия эксплуатации требуют высокой коррозионной стойкости. Для эксплуатации в парогазовой среде индуктор имеет сплошную многослойную лаковую изоляцию.

В качестве источника питания используется серийный трехфазный транзисторный частотный преобразователь мощностью 50 кВА с компенсацией реактивной мощности. Для работы в условиях заводской сети на входе источника питания установлен RL -фильтр.

Для стабильной работы источника 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

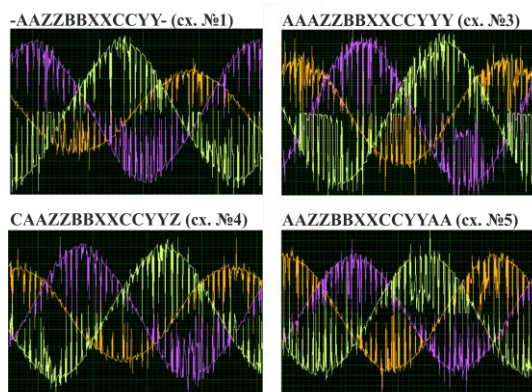


Рис. 33

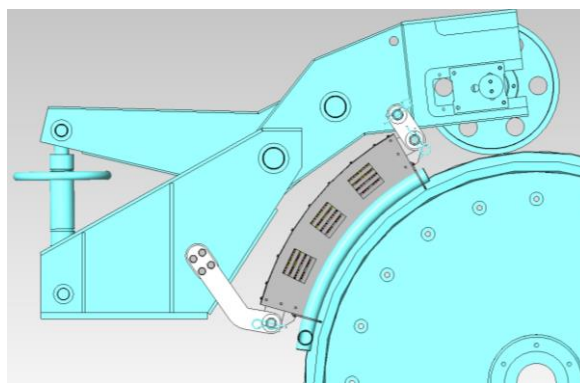


Рис. 34

разных схем (рис. 33). При отключении 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.

Пульт управления обеспечивает включение индуктора и вентилятора системы охлаждения, при этом вентилятор может включаться в автоматическом режиме в зависимости от температуры обмотки индуктора. В системе управления реализовано аварийное обесточивание индуктора из-за перегрева. Контроль температуры производится семью термопарами, установленными в разных зонах индуктора. Пульт управления выполнен по релейно-контакторной схеме с целью возможности эксплуатации при отрицательных температурах.

Индуктор монтируется с торцевой стороны литейного колеса в зоне за прижимным роликом и подвешивается на его раме и кронштейне (рис. 34). Конструкция крепежа индуктора обеспечивает его синхронное перемещение вместе с кронштейном прижимного 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

Таблица 2

Параметр	Значение
1 Технические данные индуктора	
1.1 Внутренний диаметр, мм	1570
1.2 Развертка, град	45
1.3 Габаритные размеры (ДхШхВ), мм	714x394x211
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 окр. среды, °С	от -30 до +40
2.2 Вид охлаждения	прин. возд.
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
3.2 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

регулируемый ороситель стальной ленты, обеспечивающий повышение теплоотвода. Итоговые геометрические и энергетические параметры комплекса приведены в табл. 2.

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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

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.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:
В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **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.

2. **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.

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 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.

5. **Авдулов, А. А.** Проблемы и перспективы магнитогидродинамических 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.

В зарубежных изданиях

6. **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.

7. **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.

8. **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.

В других изданиях

9. **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.

10. **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/>.

11. **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.

Подписано в печать 16.10.2015. Печать плоская. Формат 60x84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ 3124

Библиотечно-издательский комплекс
Сибирского федерального университета
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-67; <http://bik.sfu-kras.ru>
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru