

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
институт
Электротехнология и электротехника
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В. Н. Тимофеев
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2016 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

ПЛАВИЛЬНО-ЛИТЕЙНЫЙ КОМПЛЕКС С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ
КРИСТАЛЛИЗАТОРОМ

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

13.03.02.11 Электротехнологические установки и системы

Руководитель

подпись, дата

профессор, д.т.н.
должность, ученая степень

М. В. Первухин
инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

А.А. Гуляшинов
инициалы, фамилия

Красноярск 2016

Продолжение титульного листа БР по теме «Плавильно-литейный комплекс с электромагнитным кристаллизатором»

Нормоконтролер

подпись, дата

М.В. Первухин

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Технологии получения высококачественной продукции из алюминий-кремниевых сплавов.....	6
1.1 Сплавы алюминия с кремнием и их применение	6
1.1.1 Механические свойства.....	6
1.1.2 Литейные свойства.....	7
1.1.3 Промышленное применение.....	8
1.2 Технологические проблемы получения алюминий-кремниевых слитков ..	10
1.3 Обзор способов непрерывного литья алюминий-кремниевых сплавов ..	12
1.3.1 Непрерывное литьё алюминий-кремниевых сплавов.....	13
1.3.2 Полунепрерывное литьё алюминий-кремниевых сплавов	17
1.3.3 Гранульная технология.....	21
1.3.4 Сравнительный анализ способов получения слитков.....	24
1.4 Электромагнитные кристаллизаторы.....	24
1.4.1 Принцип работы и конструкция ЭМК	25
1.4.2 Основные закономерности формирования слитка при литье в ЭМК ..	29
1.4.3 Выбор технологических параметров литья в ЭМК.....	32
1.4.4 Направления совершенствования конструкции.....	33
2 Математическое моделирование электромагнитных процессов кристаллизующегося в магнитном поле слитка.....	35
2.1 Описание объекта исследования.....	35
2.2 Постановка задачи математического моделирования.....	36
2.3 Математическая модель электромагнитных процессов в системе «индуктор–слиток».....	38

2.4 Анализ результатов математического моделирования	42
2.4.1 Интегральные и дифференциальные электромагнитные параметры системы «индуктор-слиток».....	42
2.4.2 Энергетические характеристики системы «индуктор-слиток».....	45
2.4.3 Силовые характеристики системы «индуктор-слиток».....	47
3 Экспериментальная электротехнологическая установка с электромагнитным кристаллизатором для получения непрерывнолитых слитков.....	56
3.1 Общее описание установки.....	56
3.2 Технологические параметры процесса получения слитков из сплава AK18.....	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	67
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	68
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	73
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	74

ВВЕДЕНИЕ

В условиях промышленности, предъявляющей всё более высокие требования к качеству металлургической продукции, поиск и внедрение современных литейных технологий является одной из наиболее приоритетных задач. К числу эффективных решений относятся технологии и оборудование, предусматривающие производственное использование различных электрофизических факторов.

Свойства алюминиевых полуфабрикатов во многом определяются условиями кристаллизации отливаемых слитков. Наиболее ярко эта зависимость прослеживается в высоколегированных сплавах, содержащих тугоплавкие, малорастворимые компоненты. Актуальной технологией, способной обеспечить высокие скорости охлаждения и электромагнитное перемешивание отливаемого слитка, является электромагнитный кристаллизатор.

Способ литья в электромагнитное поле обладает высоким потенциалом в области получения больших объёмов сплавов ввиду увеличения производительности процесса литья, улучшения условий труда и качества выпускаемой продукции. Максимальная эффективность процесса достигается применением модернизированных конструкций и использованием оптимальных параметров источника питания.

В данной работе рассмотрены основные физические свойства алюминий-кремниевых сплавов и их промышленное применение. Проведён литературный и патентный обзор современных технологий и оборудования непрерывного литья. Также детально рассмотрены принцип действия и конструкция электромагнитных кристаллизаторов. Построена математическая модель системы «индуктор-слиток» для анализа протекания электромагнитных процессов. Рассмотрена экспериментальная электротехнологическая установка с электромагнитным кристаллизатором и её технологические параметры процесса получения слитков.

1 Технологии получения высококачественной продукции из алюминий-кремниевых сплавов

1.1 Сплавы алюминия с кремнием и их применение

Силумин – это сплав на основе алюминия с кремнием. Он является разновидностью лёгких, высокопрочных алюминиевых сплавов с содержанием кремния от 3 до 50 процентов, устойчив к коррозии во влажной атмосфере и морской воде.

В силуминах кремний – основной легирующий элемент, благодаря ему сплав становится высоко текучим и малоусадочным, что положительно влияет на его литейные свойства и свариваемость. Максимальное содержание кремния в литейных сплавах как правило 22-24 процента, но в порошковой металлургии может достигать 40-50 процентов [1].

Наличие большого количества эвтектики в структуре силуминов обеспечивает этим сплавам высокую жидкотекучесть, малую усадку, низкую склонность к образованию горячих трещин и хорошую герметичность. В двойных сплавах Al-Si эвтектика состоит из твердого раствора и кристаллов практически чистого кремния, в легированных помимо двойной имеются тройные и более сложные эвтектики.

Важнейшими характеристиками силуминов, определяющими их технологичность и области применения, являются литейные и механические свойства [2].

1.1.1 Механические свойства

Механические свойства зависят от химического состава, технологии изготовления (модифицирования, способа литья и т.д.), а также термической обработки. В двойных силуминах с увеличением содержания кремния до эвтектического состава снижается пластичность и повышается прочность.

Снижение прочности и пластичности вызывается возникновением в структуре сплавов крупных кристаллов первичного кремния. Измельчение структуры путем модифицирования – это единственный способ повышения механических свойств этих сплавов. Обычно они модифицируются натрием в виде хлористых и фтористых солей, вводимым в жидкий сплав в количестве 2 или 3 процентов от массы сплава. Это приводит к увеличению пластичности и прочности [3].

В последние годы качество отливок всё чаще оценивают с использованием характеристик трещиностойкости (в первую очередь вязкости разрушения) и выносливости. Эти характеристики, как и свойства при растяжении, могут изменяться в широких пределах в зависимости от состава и структуры [2].

В большинстве случаев легирование отражается на трещиностойкости через изменение структуры – размеры и формы зерна, параметров дислокационной структуры, количества и размеров выделений избыточных фаз и т.д. Ещё более значительно сказываются на структурных параметрах режимы обработки: условия кристаллизации, режимы термообработки [2].

По плотности, электро- и теплопроводности силумины мало отличаются от других литейных алюминиевых сплавов. Следует особо выделить коэффициент линейного термического расширения (КЛТР), который у силуминов заметно ниже, чем у сплавов на базе систем Al–Cu и Al–Mg. Величина КЛТР сильно снижается с увеличением содержания кремния, поэтому поршневые сплавы (для которых это особенно важно) являются, как правило, высококремнистыми [5].

1.1.2 Литейные свойства

Уровень литейных свойств определяется составом сплава и технологическими режимами литья. К основным литейным свойствам относят:

жидкотекучесть, усадку, горячеломкость, склонность к образованию усадочных пустот, а также микроликвацию [2].

Жидкотекучесть характеризует способность расплава заполнять литейную форму. Жидкотекучесть – типичное технологическое свойство, поскольку сильно зависит от методики и условий проведения экспериментов по её оценке, в первую очередь от температуры литья и формы, металлостатического напора и др. [6,7]. Все эти факторы влияют на жидкотекучесть через физические свойства расплава (вязкость, поверхностное натяжение) и формирующуюся в процессе затвердевания структуру.



Рисунок 1.1 – Микроструктуры сплава АК12.
А – до модифицирования, Б – после модифицирования

Наиболее популярными в промышленности среди легированных силуминов средней прочности являются сплавы с добавками магния или магния и марганца [9].

1.1.3 Промышленное применение

Применение силуминов в качестве конструкционных материалов связано в первую очередь с особым набором свойств данных сплавов [4, 6–8, 19, 20]. Отличные литейные свойства, высокая механическая и хорошая коррозионная стойкость совместно с относительно небольшим удельным весом ставят силумины в особый ряд материалов, перспективных в части замены стали в различных конструкциях и агрегатах [19].

Использование силуминов в качестве конструкционного материала позволяет существенно снизить трудоемкость производства отливок по сравнению с производством из черных металлов (чугунов). Существенное снижение веса отливки – ещё одна положительная особенность применения силуминов [2]. Широкая гамма литых сплавов на базе системы Al–Si с добавками различных легирующих элементов [6, 8, 20] позволяет выбрать наилучший материал для производства большой номенклатуры фасонных отливок различной степени сложности с применением разных видов литья и последующей термообработки [24].

Способность силуминов выдерживать повышенное рабочее давление позволяет изготавливать из них герметичные детали, эксплуатируемые в различных средах [22]. Серьёзным потребителем силуминов в настоящее время является автомобильная промышленность, где вопрос цены из-за острой конкуренции многочисленных производителей стоит исключительно остро. С каждым годом процент использования литых алюминиевых деталей в автомобиле растёт, причём растёт перечень отливок ответственного назначения, работающих в условиях знакопеременной нагрузки, например рычагов в системе подвески в ходовой части [2].

Применение силуминов в авиации обусловлено изготовлением тонкостенных, крупногабаритных, сложных по конструкции, герметичных деталей, изготовленных прогрессивными методами литья. Обычно применяются сплавы АК9ч, АК9пч, АК8л и АК8МЗч. Сплавы АК7пч и АК9пч применяются для изготовления средненагруженных деталей (кронштейнов, соединительных фланцев). Из сплава АК8л изготавливают крупные, сложные по конфигурации отливки и нагруженные детали, в том числе герметичное литье [2]. Во многих случаях возможна замена паковок и штамповок из деформируемых сплавов литыми деталями из литейных алюминиевых сплавов при существенном снижении себестоимости изготовления.

Несмотря на значительный прогресс в материаловедении, силумины ещё длительное время будут занимать ведущие позиции во многих отраслях

промышленности. В первую очередь это связано с относительно низкой стоимостью силуминов и возможностью широкого использования вторичного сырья при их производстве [3].

1.2 Технологические проблемы получения алюминий-кремниевых слитков

Наиболее приоритетной и значимой целью металлургической промышленности является получение в алюминиевых сплавах необходимого сочетания физико-механических свойств таких как твердость, относительное удлинение, предел текучести, сопротивление разрыву и др.) [23], а также специальных характеристик (жаропрочность, усталостная прочность, электрическое сопротивление, коррозионная стойкость, свариваемость и др.). Перечисленные свойства определяют как возможность дальнейшего передела слитка методами пластической деформации, так и эксплуатационные качества при практическом применении конечного изделия.

Характеристики и свойства сплавов определяются в равной степени химическим составом сплава (количеством и составом легирующих компонентов) и условиями их литья и кристаллизации (интенсивность охлаждения, применения внешних воздействий в процессе литья и т.д.) [24].

Самыми значительными и распространёнными факторами, негативно влияющими на качество слитков можно назвать: химическую неоднородность слитка, вызванную ликвационными наплывами, низкие механические свойства, неравномерное кристаллическое строение и механические дефекты, такие как горячие трещины и деформация донной части слитка [1].

Для повышения эффективности литейного производства и устранения основных технологических проблем получения алюминий-кремниевых слитков большое значение имеет применение методов физического воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл, направленных на интенсификацию процессов теплообмена и массопереноса в затвердевающих сплавах [29-33].

Методы внешних воздействий, получивших наибольшее распространение, можно условно разделить на три группы:

- введение в расплав давлений и упругих колебаний (низкочастотные и высокочастотные ультразвуковые вибрации);
- перемешивание расплава электромагнитными силами, газоимпульсной обработкой, продувкой инертными газами и механическими мешалками;
- введение концентрированных источников энергии (электрических импульсов) в расплав.

Влияние перечисленных методов внешних воздействий на кристаллизационные процессы заключается в следующем [33]:

- наложение вибрации и ультразвука на движущийся поток жидкого или затвердевающего металла приводит к появлению в пограничном слое вторичных течений, интенсифицирующих процесс тепломассопереноса, повышению плотности отливки, жидкотекучести и трещиноустойчивости, снижению усадочной рыхлости;
- скорость кристаллизации изменяется при изменении температурного градиента на границе затвердевания благодаря вибрации и перемешиванию расплава;
- интенсивность процесса перераспределения примесей при кристаллизации сплавов, форма и расположение дендритов в структуре зависят от толщины диффузионного пограничного слоя, направления конвективного потока и теплоотвода во взаимосвязи с действием гравитационных или внешних сил;
- дисперсностью кристаллической структуры можно управлять, используя вибрацию; эффективность измельчения кристаллической структуры повышается при увеличении частоты и амплитуды колебаний и снижении температуры расплава;

- наложение электромагнитных полей на жидкий и кристаллизующийся металл приводит к увеличению скорости кристаллизации, зарождению и росту центров кристаллизации, увеличению коэффициента диффузии примесей, измельчению кристаллической структуры;
- существенное измельчение кристаллической структуры, снижение склонности к трещинообразованию может быть достигнуто регулированием величины и направления градиента температур перед границей затвердевания.

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод, что в основе качественного формирования микроструктуры слитка и его физико-механических свойств лежит управление тепловыми процессами в отвердевающем расплаве и гидродинамическими течениями в жидкой фазе слитка.

1.3 Обзор способов непрерывного литья алюминий-кремниевых сплавов

В условиях современной промышленности с высокими требованиями к качеству отливаемых заготовок необходимо также обеспечить высокую производительность и экономичность технологических процессов. Определяющими факторами экономической эффективности и целесообразности литейного процесса являются: объём выпускаемой продукции и её качество.

Для обеспечения потребителей высококачественной продукцией в нужном объёме применяются гранульные технологии, а также технологии непрерывного или полунепрерывного литья.

1.3.1 Непрерывное литьё алюминий-кремниевых сплавов

Непрерывное литьё – это способ литья, при котором получаемые заготовки значительно длиннее кристаллизатора. При непрерывном литье расплавленный металл трансформируется в твёрдый непрерывно, что является весьма эффективным при работе с большими объёмами металла, который кристаллизуется в простые формы для последующей обработки [10]. Технологический процесс заключается в следующем: расплав из миксера или ковша поступает в водоохлаждаемый кристаллизатор, который формирует отливку, вытягиваемую с помощью затравки и специального привода непрерывно. Основными достоинствами данного метода являются малые габаритные размеры и высокая металлоёмкость технологического оборудования.

Наиболее распространённым способом реализации процесса непрерывного литья силуминов являются машины с горизонтально расположенным кристаллизатором (рисунок 1.2).

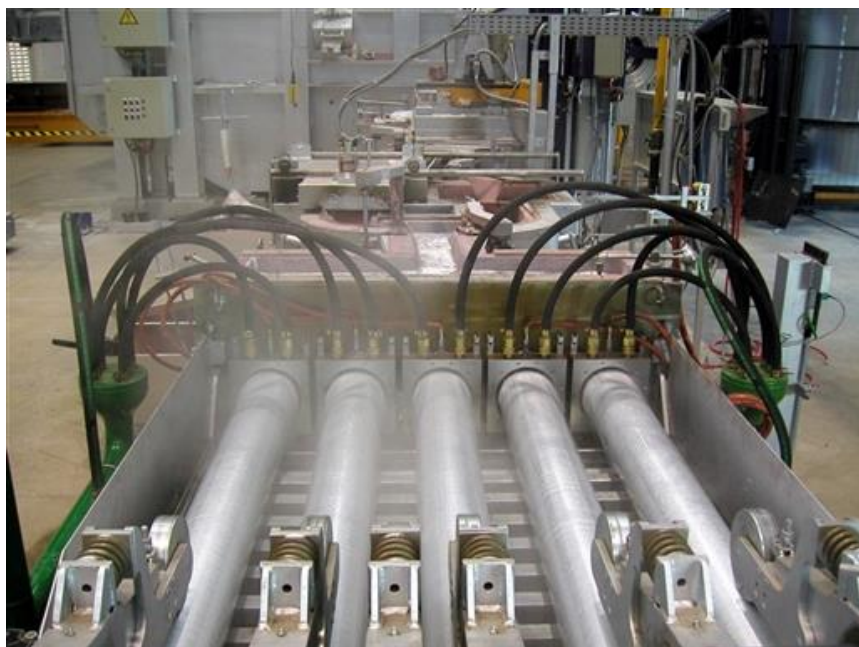


Рисунок 1.2 – Процесс горизонтального литья слитков на машине компании Hertwich Engineering производительностью 2,6 т/ч. Вид со стороны летучей пилы

На рынке представлен широкий ряд конструктивных решений, однако все они имеют общие основные элементы конструкций:

Металлоприемник – выполняет функцию приёма обработанного расплава и распределяет его по кристаллизаторам. Он футеруется высокоэффективными теплоизоляционными материалами, а регулирование расхода металла реализовано на базе лазерных детекторов. Обычно в качестве металлоприемника используются индукционные печи в соединении с кристаллизатором.

Блок кристаллизаторов – крепится к боковой стенке металлоприемника и соединяется с ним через литниковые отверстия в керамических перегородках. Обеспечиваются маслом и водоохлаждением по трубопроводам от соответствующих систем.

Вытяжной механизм – устройство, предназначенное для извлечения заготовки из кристаллизатора. Существует два типа механизмов – роликовый и рычажный. Роликовый тип выполняется в виде транспортера, состоящего из тяговых цепей, несущих стальные бруски. Роликовый тип вытяжного механизма используется в литье круглых, квадратных и прямоугольных заготовок. Механизм рычажного типа не имеет ограничений по форме слитков и может применяться в изготовлении заготовок любого профиля.

Летучая дисковая пила – устройство, предназначенное для резки слитков, движущихся со скоростью литья на мерные длины с погрешностью 0.5%. Обработанные отрезки передаются по рольгангу в накопитель для дальнейшей обработки.

Система автоматического управления работой машины позволяет управлять и регулировать в требуемых пределах все параметры процессов плавления, обработки, литья и резки слитков; визуализировать процесс для оператора и транслировать данные в систему диспетчерского управления SCADA.

Машины непрерывного горизонтального литья в основном представляют собой составную часть производственных линий, которые состоят из

плавильно-раздаточной печи, дегазаторов, фильтров, литейной машины, печи непрерывной гомогенизации, а также механизмов для контроля слитков и упаковки заготовок. Рассматриваемое оборудование способно функционировать в непрерывном режиме в течение недели, а длина слитков, получаемых в результате отливки, может достигать 1000 м.

На рисунке 1.3 представлена схема литейной части линии производства слитков из шихты, содержащей органику.

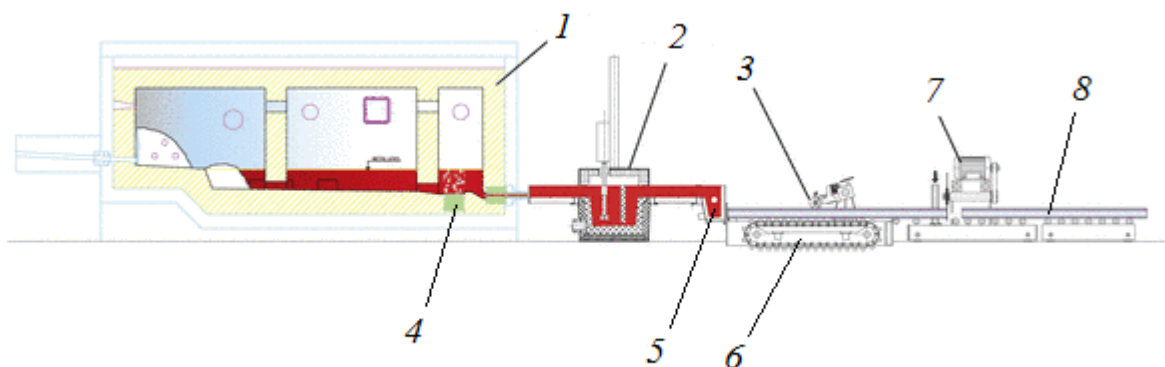


Рисунок 1.3 – Схема установки для горизонтального литья слитков компании Hertwich Engineering: 1 – трёхкамерная печь; 2 – установка для внепечной обработки расплава; 3 – прижимные ролики; 4 – пористая диафрагма в подине литейной камеры печи; 5 – металлоприемник с блоком кристаллизаторов; 6 – транспортер; 7 – летучая дисковая пила; 8 – слиток

С помощью загрузочной машины шихта, с интервалом 20-30 минут подаётся печь, конструкция которой зависит от свойств шихты. Затем расплав направляется в установку для внепечной обработки расплава, в которой осуществляется дегазация, фильтрация и модификация. После чего модифицированный жидкий металл поступает в металлоприемник с блоком кристаллизаторов, в которых собственно и осуществляется процесс литья слитков заданного сечения.

В настоящее время процесс литья на оборудовании данного типа практически полностью автоматизирован. Это позволяет значительно снизить расходы на производство слитков: при горизонтальном литье они примерно в

1,5 раза ниже по сравнению с вертикальным литьем. К другим преимуществам следует отнести:

1. Сниженные потери металла, обусловленные увеличенным до 98 % выходом годного при литье слитков.
2. Сокращенные на 40-50 % инвестиции по сравнению с вертикальным литьем.
3. Более простую и менее трудоемкую операцию замены кристаллизаторов при переходе на другой размер при литье, дающую большую гибкость при выполнении заказов.
4. Непрерывность работы с меньшим значением мгновенного расхода металла.
5. Более удобное по сравнению с вертикальным литьем размещение на литейной машине с ограниченным числом горизонтальных кристаллизаторов электромагнитных перемешивающих устройств, позволяющих отливать слитки с тиксотропной структурой.

Вышеперечисленные факты – основная причина внедрения машин горизонтального литья в алюминиевой индустрии [13]. Опыт их применения свидетельствует о том, что это оборудование идеально подходит для литья Т-образных слитков и шин из электролитного алюминия, а также шихтовых заготовок из литейных сплавов с содержанием до 11% кремния [12]. Всё большее распространение получает горизонтальное литьё в производстве кузнечных заготовок небольшого диаметра из высоколегированных сплавов [14] и слитков с тиксотропной структурой для деформации в твёрдо-жидком состоянии [15]. Методом горизонтального литья производится около 3% слитков из сплавов системы Al-Mg-Si, используемых для прессования [13]. Его применение оказывается экономически оправданным только на прессовых заводах, в литейных цехах в которых с мощностью от 4 до 20 тыс. т/год отливают слитки (преимущественно из одного сплава) с большой долей скрапа в шихте. В этом случае потери от увеличенной доли отходов в прессовом производстве, работающем с выходом годного на уровне 80%, в значительной

мере могут быть компенсированы повышенным выходом годного слитков при горизонтальном литье [13].

1.3.2 Полунеprывное литьё алюминий-кремниевых сплавов

Полунеprывное литьё – способ литья с вертикальным кристаллизатором, в котором после изготовления отливки или слитка вся система возвращается в исходное состояние и цикл повторяется [16]. При вертикальном литье производительность разливки, определяемая размерами стола и грузоподъёмностью машины, находится в диапазоне 5-55 т/ч [13].

Существует несколько типов конструкций машин для полунеprывного литья, но в состав каждой обычно входят:

1. Литейный стол, представляющий собой прочную и жесткую сварную конструкцию из стали, верхняя часть которой – система с тепловыми насадками, а в нижней расположена кассета с охлаждающей водой, в которую монтируют кристаллизаторы (рисунок 1.4) [17]. Они через сменные керамические переходные кольца с калиброванными отверстиями стыкуются с системой тепловых насадок. При переходе на литье слитков другого размера литейный стол заменяется, так как является съёмным.



Рисунок 1.4 – Литейный стол производства компании Wagstaff Inc.

2. Платформа для размещения съёмного основания с поддонами, которая перемещается вниз в процессе литья слитков и вверх при их извлечении и подготовке оборудования к следующей разливке. Она также изготавливается в виде прочной и жесткой сварной конструкции из стали. Для каждого размера слитка используется своё съёмное основание с поддонами, соответствующее литейному столу (рисунок 1.5) [17].



Рисунок 1.5 – Платформа для размещения съёмного основания с поддонами производства компании Wagstaff Inc.

3. Механизм перемещения платформы, создающий плавное без рывков её движение с заданной скоростью в достаточно широком диапазоне скоростей литья и обеспечивающий требуемую грузоподъёмность, определяемую массой отливаемых слитков, длина которых, как правило, находится в пределах 6-7 м.

4. Система автоматического управления работой машины, позволяющая на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК) поддерживать в заданных пределах все параметры процесса литья, их регистрацию, визуализацию для оператора и передачу данных в систему диспетчерского управления SCADA.

На столе литейной машины в зависимости от её грузоподъёмности может быть установлено от нескольких десятков до сотни и более кристаллизаторов.

Литейная машина размещается над приямок – бетонным колодцем, который служит для приема слитков во время литья и отвода охлаждающей воды. Литейный стол выполняют откатывающимся по рельсам для освобождения пространства над ним на время выемки слитков или чаще – поворотным (рисунок 1.6) [18].



Рисунок 1.6 – Подготовка кристаллизаторов к литью на поворотном столе литейной машины компании Wagstaff Inc.

В новых и модернизируемых цехах чаще всего применяют гидравлические машины с внутренними направляющими или тросовые машины парашютного типа без направляющих ввиду того, что использование конструкций на основе цепного, тросового и гидравлического привода с направляющими у стенок приямка связано с трудностями в эксплуатации и ремонте.

Система управления связывает в единое целое контроль всех устройств, обеспечивающих процесс литья, с поддержанием их параметров работы в заданных пределах. При этом они сообщаются оператору в виде графического интерфейса на мониторе и данных на контрольной панели, а также поступают в компьютер системы SCADA, установленный в офисе вблизи литейной машины.

Система позволяет выпускать продукцию идентичного качества во всех сменах, а анализ динамики, накапливаемой в системе SCADA информации, даёт возможность выполнения коррекции технологических параметров для повышения производительности [13].

Основными причинами, ограничивающими широкое применение литейных машин такого типа, являются: сравнительно высокая стоимость машин, поэтому в России такая конструкция используется на предприятиях, вертикально интегрированных в алюминиевой промышленности, которым доступны крупные инвестиции для развития, и необходимости создания глубоких приямков для монтажа. Это увеличивает объём и стоимость фундаментных работ, особенно в местах с повышенным уровнем грунтовых вод.

Вышеупомянутых недостатков лишены тросовые машины парашютного типа. На рисунке 1.7 изображена вертикальная тросовая машина полунепрерывного литья.

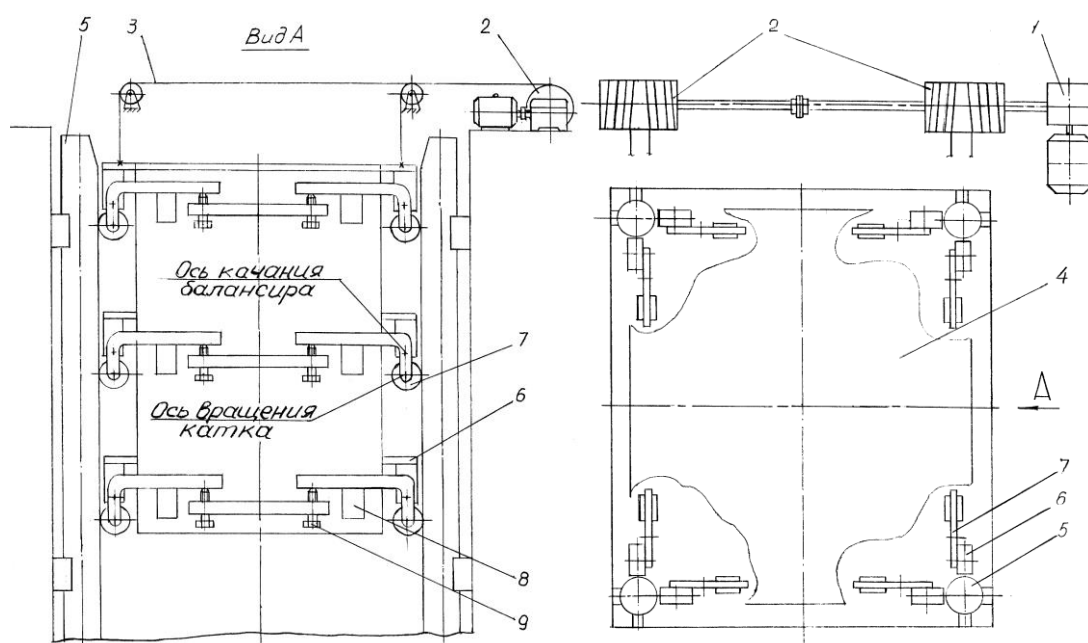


Рисунок 1.7 – вертикальная тросовая машина полунепрерывного литья.

1 – привод, 2 – барабаны, 3 – тросы, 4 – платформа, 5 – направляющие, 6 – балансиры, 7 – катки, 8 – противовесы, 9 – регулировочные винты

Литейные машины этого типа выпускаются, как правило, различными китайскими компаниями и привлекают потребителей прежде всего ценой, которая более чем в 5 раз меньше [13] по сравнению с плунжерными гидравлическими машинами. При этом установке в цехе такой тросовой машины часто рассматривается как средство для накопления инвестиций и последующего приобретения более качественного литейного оборудования.

1.3.3 Гранульная технология

Высокие скорости охлаждения при кристаллизации позволяют получать литой металл с некоторыми структурными особенностями, которые невозможно получить у сплавов, закристаллизованных традиционным методом. К таковым относятся резкое диспергирование всех структурных составляющих, эвтектических и первичных интерметаллидов, а также самого твердого раствора; образование аномально пересыщенных твердых растворов ряда переходных металлов в алюминии; образование метастабильных фаз [24].

В отечественной и зарубежной практике имеется большое разнообразие схем получения частиц быстрой и сверхбыстрой кристаллизации, основными из которых являются [25; 26]: распыление расплава газом, распыление расплава центробежными силами, намораживание расплава на подложку.

Общими недостатками рассмотренных технологий являются: большое количество технологических операций, низкая производительность, малый выход годного (не более 50 %), высокая взрывоопасность, нестабильность физико-механических свойств при дальнейшей пластической обработке сплава и другие [24].

Ввиду большой потребности в алюминиевых сплавах со специальными свойствами, проводились разработки новых эффективных методов и устройств гранулирования, в частности работы по получению высоколегированных алюминиевых сплавов методом МГД-гранулирования. В основе метода лежит

резонансный распад струи металла под действием периодических электромагнитных сил [36-40].

В зависимости от способа возбуждения электромагнитных сил в расплаве и конструктивного исполнения струйные МГД-грануляторы делятся на три группы: индукционные тигельные (рисунок 1.8 «а»), индукционные каналные (рисунок 1.8 «б») и с внешним магнитным полем (рисунок 1.8 «в»).

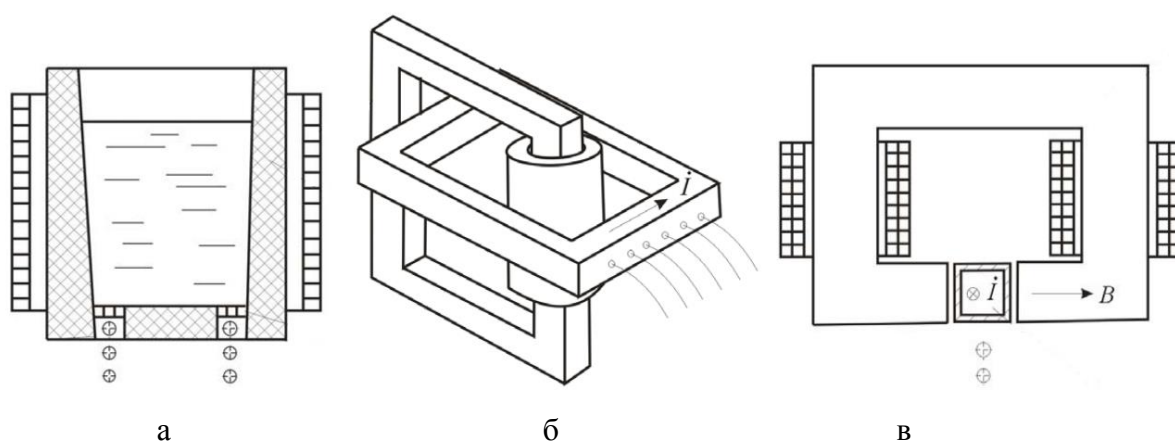


Рисунок 1.8 – МГД-грануляторы

В индукционных МГД-грануляторах как тигельного, так и каналного типов распад струи жидкого металла осуществляется за счет действия периодических усилий, возникающих при взаимодействии индуцируемого в металле тока с собственным магнитным полем индуктора [24]. В третьем типе МГД-гранулятора канал с насадками помещен в поперечное магнитное поле. Необходимые для распада струи электромагнитные силы в этом случае возникают при взаимодействии тока в канале с постоянным либо переменным магнитным полем электромагнита [24].

Основной недостаток струйных грануляторов – это эрозия насадок или засорение их окислами или другими включениями [24].

Пленочные грануляторы лишены данного недостатка, поскольку основаны на управляемом распаде свободных пленок жидкости под воздействием внешних возмущений. В пленочном МГД-грануляторе

возмущением служат периодические электромагнитные силы. Их создают, помещая радиально растекающуюся по диску пленку расплавленного металла в продольное, относительно оси диска, переменное магнитное поле. В пленке наводятся азимутальные токи, взаимодействующие с этим полем. В результате такого взаимодействия возникают электромагнитные силы, изменяющиеся с двойной по отношению к полю частотой и направленные ортогонально векторам поля и скорости.

Электромагнитные системы пленочных грануляторов бывают двух типов. Первый основан на использовании пинч-эффекта и пространственного растекания тока в струе (рисунок 1.9, а), второй тип системы – индукционная (рисунок 1.9, б).

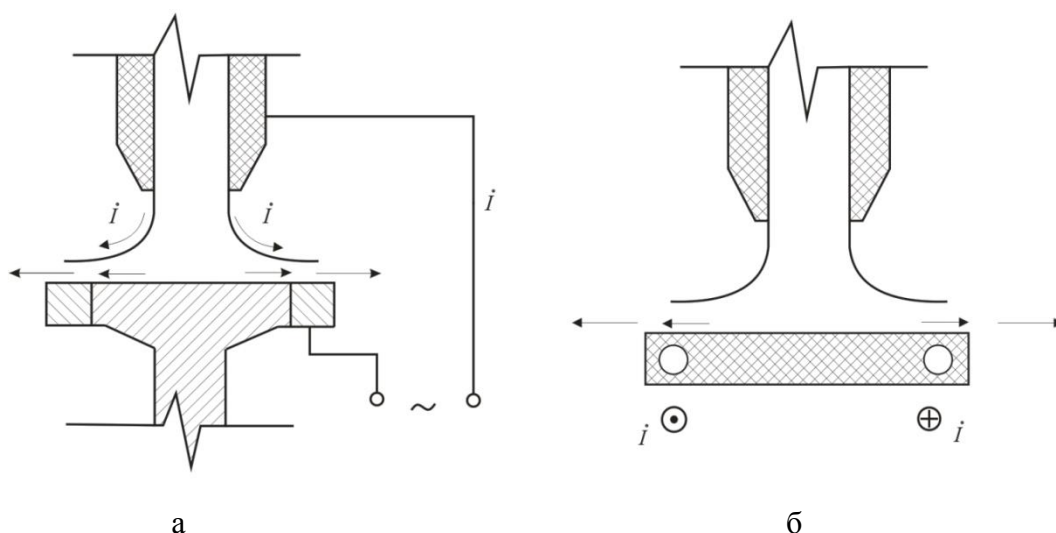


Рисунок 1.9 - Электромагнитные системы пленочных грануляторов

Достоинством рассмотренных МГД-грануляторов по сравнению с классическими грануляторами является возможность получения гранул одинаковых размеров с заданной дисперсностью на одном типе оборудования, при изменении частоты тока, стабильности и однородности свойств литых гранул [37; 40].

К основным недостаткам можно отнести: низкий выход годного в процессе получения полуфабрикатов и изделий из высоколегированных алюминиевых сплавов, большое количество технологических операций,

требующих существенные временные и материальные затраты, а также взрыво- и пожароопасность технологического процесса.

1.3.4 Сравнительный анализ способов получения слитков

Несмотря на высокое качество и специальные свойства литых металлов, получаемых с применением МГД-грануляторов, использование гранульной технологии не является целесообразным в приготовлении больших объёмов продукции ввиду наиболее очевидных недостатков, таких как: сложность и длительность процесса, вытекающая из этого высокая стоимость изготовления, а также взрыво- и пожароопасность.

Основываясь на вышесказанном можно сделать вывод о том, что для удовлетворения потребности современной промышленности в высококачественных слитках из алюминий-кремниевого сплава наиболее оптимальным способом изготовления продукции является непрерывное или полунепрерывное литьё. Важным аспектом данной технологии является возможность внедрения в процесс электромагнитного кристаллизатора.

Использование данной конструкции позволит значительно увеличить производительность, безопасность и экономичность процесса, а также устранить основные недостатки данного способа отливки, такие как, неоднородная структура слитка, ликвационные наплывы, возникновение горячих трещин и другие.

1.4 Электромагнитные кристаллизаторы

Метод непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК) был разработан и внедрён в промышленность советскими учеными З.Н. Гецелевым, Г.А. Балахонцевым, Ф.И. Квасовым и др. в 70-х гг. XX в. и является наиболее перспективным направлением, обладающим высоким потенциалом в отношении получения высоких скоростей охлаждения в относительно больших

объёмах кристаллизующегося металла и соответственно получения сплавов, по своим характеристикам не уступающим сплавам, полученным по существующим технологическим схемам.

Способ литья в электромагнитном поле даёт новые возможности управления структурой слитка, создавая регламентированное движение расплава [10], однако при этом возникают и возможности получения нежелательных типов структуры.

1.4.1 Принцип работы и конструкция ЭМК

Электромагнитный кристаллизатор (рисунок 1.10) состоит из возбуждающего переменное электромагнитное поле индуктора 1, электромагнитного экрана 2, служащего для коррекции распределения магнитного поля на поверхности жидкой зоны и регулирования интенсивности циркуляции и кольцевого охладителя 3, обеспечивающего равномерную подачу охлаждающей жидкости [11]. Для создания равномерного магнитного поля по периметру жидкой зоны и уменьшения питающего напряжения в ЭМК применяются в основном одновитковые индукторы и экраны, изготовленные из медной прямоугольной трубки или медной шины.

Основными параметрами ЭМК, определяющими характеристики процесса литья и структуру получаемых слитков, являются: воздушный зазор между индуктором, экраном и слитком; отношение высоты индуктора к его диаметру и расположение пояса охлаждения относительно индуктора [41].

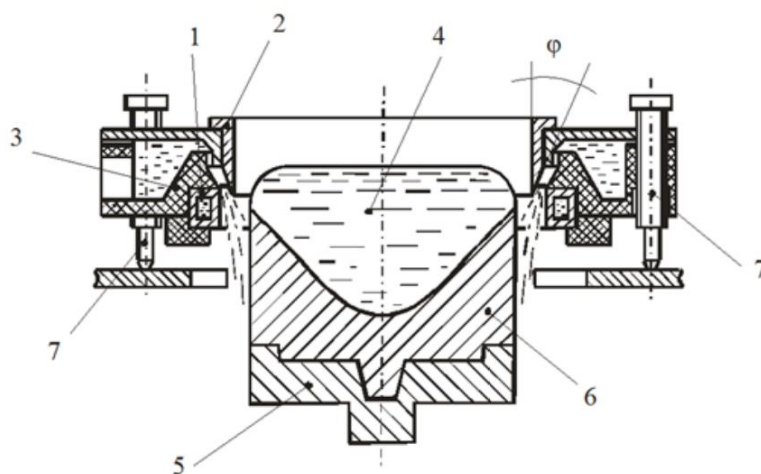


Рисунок 1.10 – эскиз электромагнитного кристаллизатора

Принцип действия ЭМК (рисунок 1.10) состоит в следующем: жидкий металл, подаваемый из миксера через литейную оснастку в ЭМК, попадает в пульсирующее электромагнитное поле, создаваемое индуктором 1. Под действием электромагнитных сил жидкий металл, находящийся под некоторым гидростатическим давлением, сжимается в радиальном направлении и приобретает в поперечном сечении форму индуктора [10].

Процесс литья в ЭМК сводится к формированию жидкой фазы 4, имеющей в поперечном сечении форму слитка. Жидкометаллическая масса удерживается от растекания электромагнитным полем, интенсивность которого регулируется экраном 2. Электромагнитный экран устанавливается на регулирующих опорах 7 таким образом, что его можно перемещать в вертикальном направлении с целью выбора условий процесса литья. Формируемый магнитным полем столб жидкого металла опирается на токопроводящее основание 5, представляющее собой металлическую затравку, переходящую в процессе литья в кристаллизующийся слиток.

Для обеспечения устойчивого процесса литья и получения слитка заданной геометрии необходимо, чтобы распределение электромагнитных сил по высоте жидкой зоны приближалось к линейному закону распределения гидростатического давления [10].

Для охлаждения слитка используют один или несколько поясов охлаждения, расположенных на разных вертикальных уровнях (рисунок 1.10). Верхний пояс обеспечивает начальное образование корочки и полное затвердевание слитка. Нижний пояс усиливает охлаждение слитка. Количество охлаждающей жидкости зависит от сплава, размеров и скорости вытягивания слитка. Под действием охлаждающей воды, поступающей на боковую поверхность слитка, жидкометаллическая масса непрерывно затвердевает, превращаясь в слиток 6, и отводится вниз. Подача охлаждающей жидкости на поверхность слитка может осуществляться под острым углом или под углом, близким к прямому.

Граница раздела твердой и жидкой областей образует фронт кристаллизации. Фронт кристаллизации на периферии слитка находится на некотором расстоянии от пояса охлаждения. Для уменьшения энергетических затрат и устойчивого процесса литья граница жидкой зоны должна находиться в зоне наибольшей интенсивности магнитного поля, т.е. примерно на уровне средней линии индуктора.

Рассмотренная конструкция ЭМК разработана для промышленного получения слитков больших диаметров (100–500 мм). Применение ЭМК для получения слитков малого поперечного сечения (диаметром до 25 мм) требует изменения конструкции кристаллизатора с учетом, появляющихся в связи с этим особенностей.

При литье слитков малого поперечного сечения в ЭМК, размеры слитка соизмеримы со струей металла подаваемого из раздаточного устройства. Поэтому, ярко выраженной области мениска, как в случае отливки крупных слитков, не наблюдается. В связи с этим отпадает необходимость в таком элементе кристаллизатора как электромагнитный экран. Жидкий металл над индуктором удерживается от растекания элементами литейной оснастки [10]. Конструктивное исполнение схематично показано на рисунке 1.11.

Процесс литья заключается в следующем: жидкий металл (1) посредством литейной оснастки (2) подается в одновитковый индуктор (3). Под действием

электромагнитного поля, создаваемого индуктором, в жидком металле наводятся вихревые токи, которые при взаимодействии с пульсирующим магнитным полем индуктора приводят к возникновению объемных сил, удерживающих жидкий металл в индукторе от растекания. Формируемый магнитным полем столб жидкого металла в начальный момент литья опирается на токопроводящее основание, переходящее в процессе литья в кристаллизующийся слиток (4). Для охлаждения слитка используют кольцевой охладитель (5). Под действием охлаждающей воды, которая поступает на боковую поверхность слитка, жидкометаллическая масса непрерывно затвердевает и отводится вниз [24].

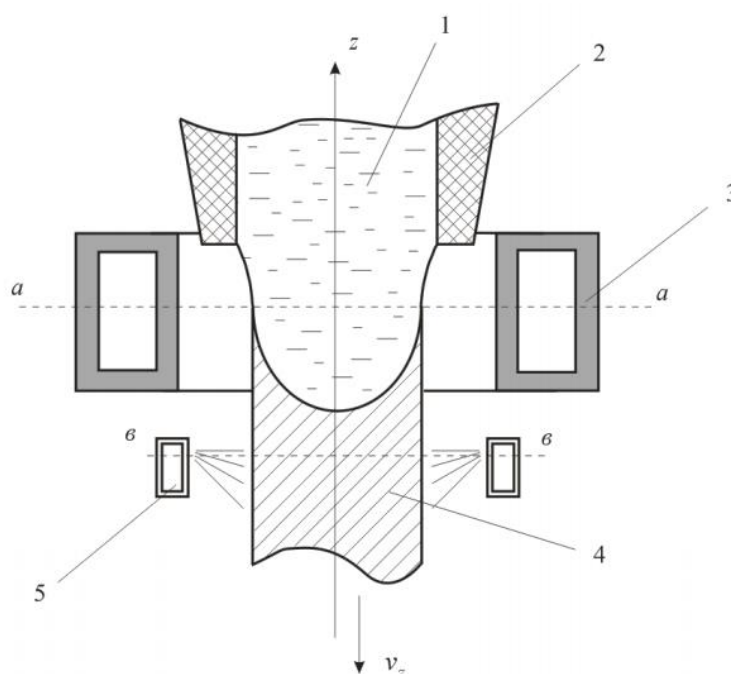


Рисунок 1.11 – эскиз ЭМК для литья слитков малого поперечного сечения

Технология литья в ЭМК позволяет получать алюминиевые слитки различной формы: круглые сплошные и полые слитки различных размеров, а так же плоские слитки.

Основные преимущества метода литья в ЭМК достигаются в результате отсутствия на любой стадии процесса физического контакта между формообразователем и слитком, благоприятного воздействия на формирование структуры слитка массообменных и тепловых процессов в жидкой фазе (лунке) слитка и улучшения условий охлаждения.

Отсутствие контакта с формообразователем исключает образование ликвационных наплывов и механических дефектов, а наличие жидкой зоны над кристаллизующейся частью слитка предотвращает возможность образования неслитин. По этим причинам слиток имеет гладкую и блестящую поверхность.

Структура слитка, в особенности его периферийной области, характеризуется однородностью химического состава, тонким и равномерным кристаллическим строением, высокими механическими свойствами, особенно пластическими.

Химическая неоднородность проявляется в поверхностном слое на глубине, не превышающей долей миллиметра. Улучшаются структура и свойства, хотя и менее значительно, и в центральной части слитка. Высокое качество структуры слитков явилось следствием повышения скорости кристаллизации, изменения формы и уменьшения глубины лунки и улучшения питания кристаллизующихся объёмов слитка.

К достоинствам данного метода литья, обусловленным указанными особенностями процесса, следует также отнести возможность повышения скорости литья на 15-30%, уменьшение расхода охлаждающей среды в 1,5-2,0 раза, улучшение условий труда вследствие ликвидации операций смазывания кристаллизаторов и уплотнения зазора между затравкой и кристаллизатором шнуровым асбестом.

Высокие технико-экономические показатели при литье слитков алюминиевых сплавов в ЭМК достигнуты, прежде всего, благодаря ликвидации механической обработки слитков при производстве большинства видов полуфабрикатов и сплавов. Существенным является также повышение технологических свойств металла в процессе деформации слитка.

1.4.2 Основные закономерности формирования слитка при литье в ЭМК

К особенностям формирования слитков относятся:

1. наличие над лункой слитка регулируемой по высоте обособленной жидкой зоны;
2. бесконтактное формообразование;
3. максимально возможное с точки зрения тепловых характеристик системы приближение пояса охлаждения на поверхности слитка к фронту кристаллизации и обеспечение непрерывного снижения температуры по всему объёму слитка;
4. принудительная циркуляция расплава в лунке, инициируемая воздействием электромагнитного поля.

Вместо первичного охлаждения слитка через стенки кристаллизатора и зазор между кристаллизатором и слитком при литье в ЭМК осуществляется непосредственное охлаждение слитка водой, чем обеспечивается достижение предельной интенсивности теплоотвода. При этом коэффициент теплопередачи изменяется в пределах 3500-6000 Вт/(м²·°С). В начальный период литья толщина твердой корочки на порядок больше, чем при литье в кристаллизатор скольжения.

Условия формирования и охлаждения слитков при литье в ЭМК влияют на глубину лунки, её форму и величину переходной зоны. Эти условия приводят к изменению процесса затвердевания слитков (особенно в периферийной зоне) и устранению выхода кристаллизации на мениск расплава, происходящего на участке контакта жидкого металла со стенкой кристаллизатора.

Отсутствие кристаллизатора скольжения в схеме процесса приводит к исключению воздействия на наружную корочку кристаллизующегося металла, устранению вторичного разогрева и вытекания маточного раствора в зазор с образованием ликватов. Схема охлаждения при литье в ЭМК обеспечивает интенсивное и монотонное снижение температуры металла.

Затвердевание поверхности идёт в результате продвижения фронта кристаллизации при непосредственном охлаждении слитка водой.

Формирование слитка электромагнитным полем сопровождается непрерывным движением металла в лунке. Траектория движения расплава лежит в меридиональной плоскости и носит одноконтурный характер. При некоторых условиях циркуляция неблагоприятно отражается на структуре слитка.

Для структуры слитков, отливаемых в ЭМК, характерны:

1. измельчение зерна по всему сечению слитка для сплавов, затвердевающих в широком температурном интервале;
2. отсутствие на поверхности слитков ликвационного слоя;
3. образование периферийных зон столбчатых кристаллов, одна из которых располагается непосредственно на поверхности, вторая – на некотором удалении от неё со встречным направлением роста кристаллов в виде «ёлочки».

Обе эти зоны не носят постоянного характера. Они проявляются ярче, слабее или отсутствуют совсем в зависимости от сплавов, типоразмеров слитков или режимов литья.

На основе улучшения структурных характеристик достигаются более высокие прочностные и пластические свойства слитков, отлитых в ЭМК. Их уровень находится в зависимости от режимов литья.

Характер ликвации при литье в ЭМК в основном подчиняется тем же закономерностям, что и при литье в кристаллизатор скольжения. При исследовании химической неоднородности отмечается лучшая равномерность в распределении компонентов сплава по сечению слитков, отлитых в ЭМК.

Дефекты, выявленные в процессе использования ЭМК классифицируют по принадлежностям к факторам, определяющим природу их возникновения, и делят на три группы [42].

Первая группа, состоящая из дефектов геометрии слитков (овальности, пережимов, уступов, волнистости), связана с механическими и электротехническими параметрами процесса.

Во второй группе дефектов объединены различного рода точечные и штриховые выступы и раковины, плены и пузыри.

Третья группа дефектов – это поверхностные складки, образование которых более вероятно при понижении температуры расплава, малых скоростей литья, неравномерности охлаждения и подачи расплава в кристаллизатор, повышении интенсивности циркуляции, ведущих к усилению теплообменных процессов.

Из дефектов структуры необходимо отметить возможность проявления пятнистости и полосчатости, образование которых связано с движением расплава в лунке.

Пятнистость является продуктом интенсивной объёмной кристаллизации. Полосчатость проявляется в виде чередования структуры крупного и мелкого зерна, что является следствием периодического воздействия движения металла на поверхность кристаллизации, с одной стороны, разрушением переходной области и, с другой – наоборот, притоком большого количества зародышеобразований [11].

1.4.3 Выбор технологических параметров литья в ЭМК

К основным технологическим параметрам, характерным для литья в ЭМК, относятся частота тока и высота жидкой зоны, геометрия экрана и его положение относительно индуктора.

Частота тока оказывает влияние на стабильность формирования жидкой зоны, структуру слитка и расход энергии. С увеличением частоты тока жидкая зона становится более устойчивой к внешним возмущениям, уменьшаются интенсивность циркуляции и глубина основного контура, охватываемого циркуляцией. Движение металла упорядочивается в большей степени, наблюдается тенденция к повышению однородности структуры. Из условий стабильности процесса литья и минимизации энергетических затрат рекомендуемая наименьшая частота составляет 500 Гц. Учитывая реальные

возможности при выборе частотных преобразователей и положительный опыт многолетней практики литья в ЭМК, достаточно обосновано применяется частота 2400 Гц. При необходимости получения слитков, к однородности структуры которых предъявляются высокие требования, частоту тока повышают до 10000 Гц.

Высота жидкой зоны оказывает существенное влияние на процесс кристаллизации слитка. Колебания высоты жидкой зоны приводят к изменениям размеров слитка. С её увеличением повышается интенсивность циркуляции металла в лунке, что вызывает измельчение зерна, но может привести к неравномерности (разнозернистости) структуры слитка. Минимальная высота жидкой зоны составляет 20-25 мм, максимальная – 40-50 мм.

От геометрических параметров и положения экрана относительно индуктора зависят распределение магнитного поля по высоте жидкой зоны и интенсивность циркуляции металла в лунке. Введение экрана внутрь индуктора на определенную высоту (до 1/4 высоты индуктора) способствует уменьшению циркуляции (так же как и увеличение поперечных размеров экрана).

При литье в ЭМК скорость литья увеличивается на 10-20 %, а температура расплава – на 10-15 °С по сравнению с литьём в кристаллизатор скольжения [11].

1.4.4 Направления совершенствования конструкции

Опираясь на накопленный опыт и полученные в проведённых исследованиях результаты можно определить наиболее значимые перспективы развития и совершенствования метода литья в электромагнитный кристаллизатор. К таковым можно отнести внедрение технологии многоручьевого литья в ЭМК. Большую роль в повышении производства играет разработка систем питания и индукторов для многоручьевых установок, удовлетворяющих требованиям литья в ЭМК по надежности и мощности.

Одними из важнейших аспектов развития многоручьевой технологии литья является повышение устойчивости формирования слитков при многоручьевом литье.

Модернизация технологии производства достаточно сложных в изготовлении ЭМК позволит динамичнее расширять парк аппаратуры для литья, а возможность получения слитков в условиях высоких скоростей охлаждения позволит значительно повысить производительность литейных комплексов.

Увеличение объёмов производства и номенклатуры слитков должно сопровождаться дальнейшими исследованиями процесса формирования структуры, влияния условий охлаждения и перемешивания расплава на внутреннее строение слитка. Отсюда вытекает необходимость освоения эффективных методов управления движением расплава, возникающим под действием массовых сил электромагнитного происхождения, и управления охлаждением слитков. Важной задачей является стабилизация размеров слитка на основе совершенствования оснастки, литейных машин и синтеза системы автоматического управления размерами слитка [42].

2 Математическое моделирование электромагнитных процессов кристаллизующегося в магнитном поле слитка.

2.1 Описание объекта исследования

Построение математических моделей слитка формирующегося в электромагнитном поле, требует четкого представления о физических процессах, протекающих в системе «индуктор-слиток» при формировании слитка и их взаимного влияния друг на друга.

Принцип формирования слитка в электромагнитном поле описан в пункте 1.4.1. На рисунке 2.1 представлен эскиз системы «индуктор-слиток» для литья слитков малого поперечного сечения. Рассматриваемая система содержит элементы: жидкий металл 1; литейную оснастку 2; индуктор кристаллизатора 3; отвердевший слиток 4; охладитель 5; двухфазную область 6.

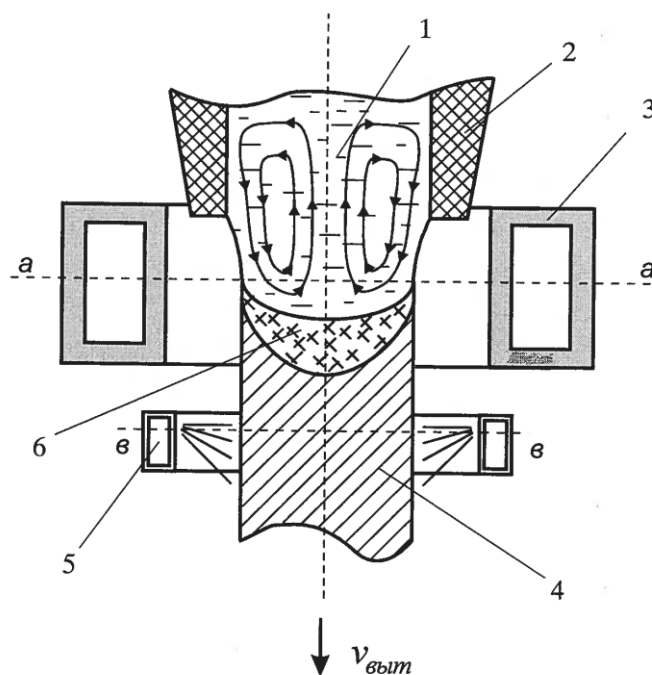


Рисунок 2.1 – эскиз системы «индуктор-слиток»

Под действием электромагнитного поля, создаваемого индуктором, в жидком металле наводятся вихревые токи, которые при взаимодействии с пульсирующим магнитным полем индуктора приводит к возникновению объемных электродинамических сил, удерживающих жидкий металл в индукторе от растекания:

$$\mathbf{f}_{\text{эо}} = \boldsymbol{\delta} \times \mathbf{B}, \quad (2.1)$$

где $\boldsymbol{\delta}$ – вектор плотности полного тока;

$\mathbf{B}$ – вектор магнитной индукции.

Направление этих сил перпендикулярно векторам плотности тока $\boldsymbol{\delta}$ и магнитной индукции $\mathbf{B}$.

Среднюю за период электродинамическую силу, действующую на жидкую фазу слитка, можно представить в виде двух составляющих Н/м³:

$$\mathbf{f}_{\text{эо}} = -\nabla \left(\frac{B^2}{4\mu} \right) + \frac{1}{2\mu} (\mathbf{B} \nabla) \mathbf{B}. \quad (2.2)$$

Первое слагаемое в уравнении (2.2) представляет постоянную во времени составляющую электродинамической силы, создающую гидравлический напор. Второе слагаемое определяет знакопеременную составляющую силы, вызывающую в металле механические колебания.

2.2 Постановка задачи математического моделирования

Система уравнений, описывающих в общем виде электромагнитные процессы в слитке формируемым магнитным полем, состоит из уравнения векторного потенциала и уравнения непрерывности:

$$\nabla(\nabla\mathbf{A}) - \nabla^2\mathbf{A} = -\mu_a\boldsymbol{\delta} - \varepsilon_a\mu_a \frac{\partial^2\mathbf{A}}{\partial t^2} - \varepsilon_a\mu_a \nabla \frac{\partial\varphi}{\partial t}; \quad (2.3)$$

$$\nabla\boldsymbol{\delta} = -\frac{\partial\boldsymbol{\sigma}}{\partial t}, \quad (2.4)$$

где $\mathbf{A}$ – векторный потенциал;

$\boldsymbol{\delta}$ – вектор плотности полного тока; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость; ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость; φ – скалярный потенциал неподвижных зарядов; $\boldsymbol{\sigma}$ – плотность сторонних зарядов.

Пренебрегая токами смещения, а так же накладывая на уравнение (2.3) кулоновскую калибровку ($\nabla\mathbf{A} = 0$) и учитывая отсутствие в расчетной области свободных электрических зарядов ($\sigma = 0$ и $\varphi = 0$), уравнения (2.3) и (2.4) можно записать в следующем виде:

$$\nabla^2\mathbf{A} = -\mu_a\boldsymbol{\delta}; \quad (2.5)$$

$$\nabla\boldsymbol{\delta} = 0. \quad (2.6)$$

Вектор плотности тока, входящий в выражения (2.5) и (2.6) имеет вид:

$$\boldsymbol{\delta} = \gamma \left(-\frac{\mathbf{A}}{\partial t} + \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) \right), \quad (2.7)$$

где γ – удельная электрическая проводимость.

В данной работе выполняется расчет интегральных и дифференциальных электромагнитных параметров системы «индуктор-слиток» кристаллизатора. При этом задача сводится к решению уравнений электромагнитного поля в двухмерной постановке.

2.3 Математическая модель электромагнитных процессов в системе «индуктор–слиток»

Расчетная модель системы «индуктор-слиток» электромагнитного кристаллизатора представлена на рисунке 2.3. Расчетная модель состоит из индуктора 1, жидкой фазы слитка 2 и твердого слитка 3.

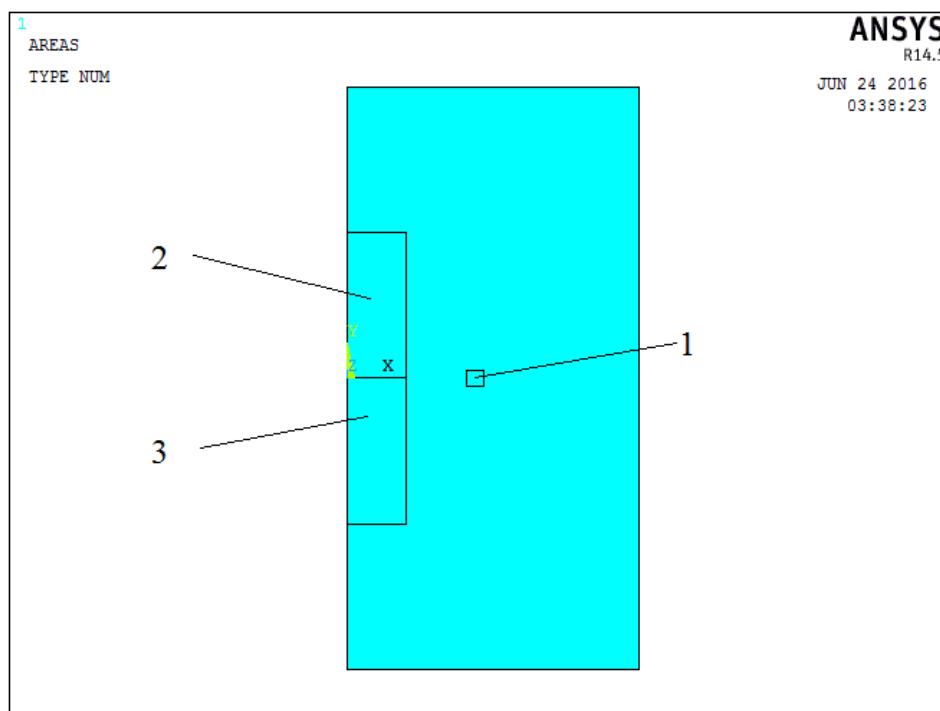


Рисунок 2.3 – Расчётная модель электромагнитных процессов в системе «индуктор-слиток» электромагнитного кристаллизатора

При построении расчетной модели приняты следующие допущения:

1. Жидкая и твердая фаза слитка моделируется средой имеющей электрическую проводимость жидкого и твердого алюминия соответственно.

2. Влиянием токоподводов индуктора пренебрегаем. В связи с этим задачу можно решать в осесимметричной постановке: $\dot{\mathbf{A}} = \bar{e}_r \dot{A}_r + \bar{e}_z \dot{A}_z$

С учетом принятых допущений, уравнения (2.5) - (2.7) можно записать в комплексном виде:

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{A}} = -\mu_a \dot{\mathbf{\delta}}; \quad (2.8)$$

$$\nabla \dot{\mathbf{\delta}} = 0. \quad (2.9)$$

Комплексная плотность тока будет иметь вид:

$$\dot{\mathbf{\delta}} = -j\omega \dot{\mathbf{A}}, \quad (2.10)$$

где $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота электромагнитного поля.

Чтобы электромагнитное поле в расчетной области определялось однозначно, дополним уравнения (2.8) – (2.10) граничными условиями.

Считая, что расчетную область окружает среда с идеальными магнитными свойствами ($\mu = \infty$), на поверхности ограничивающей расчетную область будут выполняться условия:

- для касательной составляющей векторного потенциала

$$\frac{\partial \dot{\mathbf{A}}_\tau}{\partial n} = 0; \quad (2.11)$$

- для нормальной составляющей векторного потенциала

$$\dot{\mathbf{A}}_n = 0, \quad (2.12)$$

где n – нормаль к поверхности расчетной области.

Исходными данными для расчета являются геометрические размеры системы «индуктор-слиток», электрофизические свойства материалов расчетной области, значения частоты питающего напряжения и силы тока

протекающего в индукторе. В качестве источника электромагнитного поля задается плотность тока в индукторе $\vec{J}$.

Для решения системы (2.8) - (2.12) в работе используется метод конечных элементов, реализованный в коммерческом программном продукте ANSYS v.14.5. Для электромагнитного 2-D расчета использовался элемент Solid 53 предназначенный для расчета двухмерного электромагнитного поля относительно магнитного векторного потенциала в осесимметричной постановке, записанного в кулоновской калибровке. При расчете использована декартова система координат. Конечно-элементная сетка имеет следующие параметры: число элементов $N_{эл}=47982$; количество узлов $N_y=15942$.

Для построения плоской сетки были выделены следующие области (рисунок 2.4): 1- жидкий металл; 2 - закристаллизованный слиток; 3 - индуктор; 4 - расчетный объем.

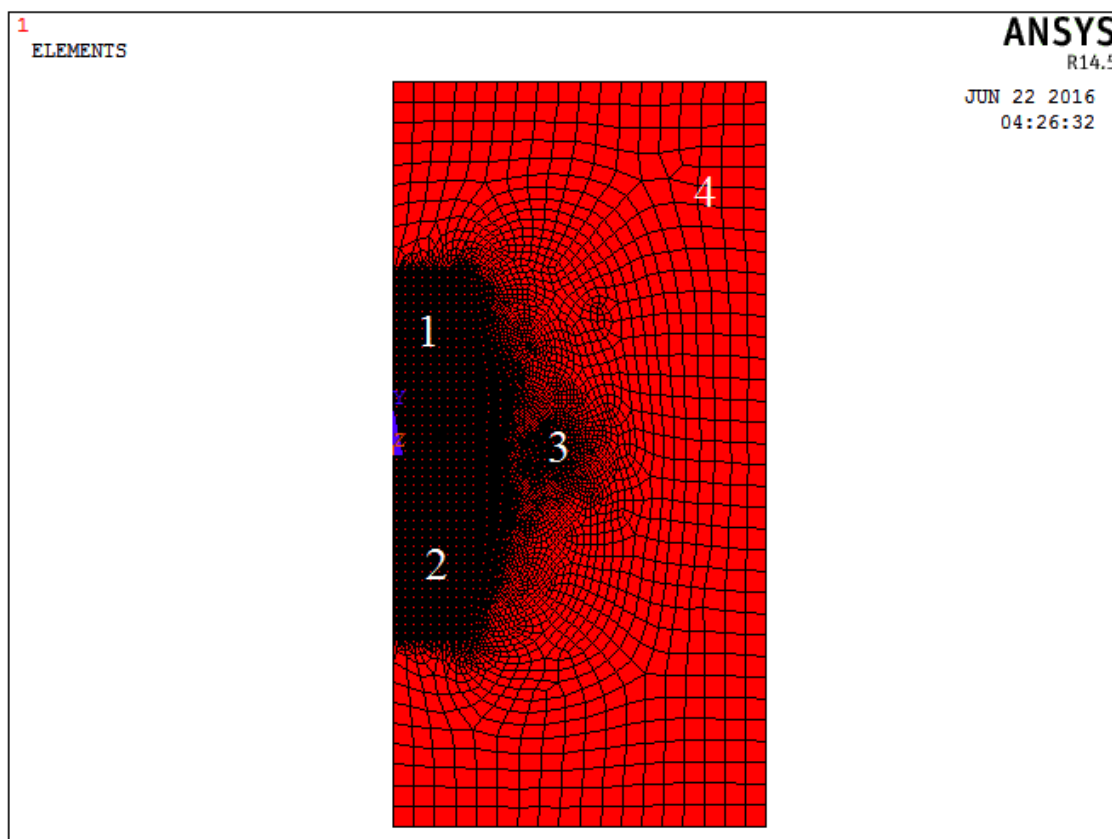


Рисунок 2.4 – Расчётная область электромагнитной задачи

На основании принятых исходных данных для расчета, определяется гидростатическое давление столба жидкого металла в области фронта кристаллизации. На следующем этапе расчета задается токовая нагрузка индуктора и проводится расчет электромагнитного поля системы «индуктор-слиток», позволяющий определить электромагнитное давление, действующее на жидкую фазу слитка. Для формирования слитка заданного диаметра необходимо, чтобы электромагнитное давление с определенной степенью погрешности было равно гидростатическому давлению, действующему на слиток. Если электромагнитное давление оказывается больше или меньше гидростатического, то значение тока индуктора корректируется соответственно в сторону уменьшения или увеличения с заданным шагом Δj , и расчет электромагнитного поля повторяется. Цикл повторяется до тех пор, пока не будет выполнено условие равенства электромагнитного и гидростатического давления.

$$p_{эм} = p_z (1 \pm \varepsilon_p), \quad (2.13)$$

где ε_p – отклонение по давлению.

Таким образом, определяется токовая нагрузка соответствующая диаметру отливаемого слитка и высоте жидкой фазы слитка, и энергетических характеристики системы «индуктор-слиток» соответствующие реальным условиям процесса литья.

В результате расчета получено распределение магнитного векторного потенциала в расчетной области.

2.4 Анализ результатов математического моделирования

2.4.1 Интегральные и дифференциальные электромагнитные параметры системы «индуктор-слиток»

Исходные данные (геометрические размеры и физические свойства материалов расчетной модели) для электромагнитных расчетов сведены в таблицы 3.1 и 3.2, а также указаны в приложении А. В таблицах 3.1 и 3.2, звездочкой «*» отмечены используемые по умолчанию значения параметров, при которых проводился расчет представленных в текущем разделе зависимостей.

Частота питающего напряжения является одним из наиболее важных параметров процесса литья в ЭМК, влияющих на устойчивость формирования жидкой зоны и структуру слитка, активную мощность, потребляемую при литье, и возможность рационального выбора электрооборудования. Для слитков диаметром 150 – 200 мм, нижний предел частоты питающего напряжения составляет 500 Гц.

Таблица 3.1 – Геометрические размеры системы «индуктор-слиток»

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Значение
Диаметр слитка	$d_{сл}$	мм	65
			70*
			75
Диаметр индуктора	d_u	мм	140
Высота индуктора	h_u	мм	10*
			20
			30
Высота жидкой фазы слитка	$h_{жф}$	мм	150
			175*
			200

Таблица 3.2 – Электромагнитные параметры системы «индуктор-слиток»

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Значение
Ток индуктора	I_u	А	2000
			3000*
			4000
Частота питающего напряжения	f	кГц	20
			44*
			66

В настоящее время нет жестких требований к выбору частоты тока при литье в ЭМК слитков того или иного диаметра. Характер и интенсивность циркуляции металла при различных частотах в каждом конкретном случае могут оказаться предпочтительными для требуемой структуры в зависимости от сплава и размера слитка. В ряде случаев эта причина может оказаться решающей при выборе частоты питающего напряжения.

Диапазон частот, для которого проведен расчет (20 – 60 кГц), ограничен с нижней стороны возможностью устойчивого формирования слитка, с верхней стороны энергетической эффективностью процесса.

Результатом решения уравнений (2.8) – (2.12) является распределение напряженностей электрического и магнитного полей в расчетной области. На рисунке 2.5 приведены кривые, характеризующие затухание магнитного и электрического полей по радиусу жидкой фазы слитка. На рисунке H , E и r – текущие значения напряженности магнитного и электрического полей и радиуса слитка; H_0 и E_0 – напряженности магнитного и электрического полей на поверхности слитка, R_0 – радиус слитка; Δ – глубина проникновения электромагнитного поля в слиток. Характер изменения напряженности электрического и магнитного поля отличается: на оси слитка $E=0$, а $H \neq 0$.

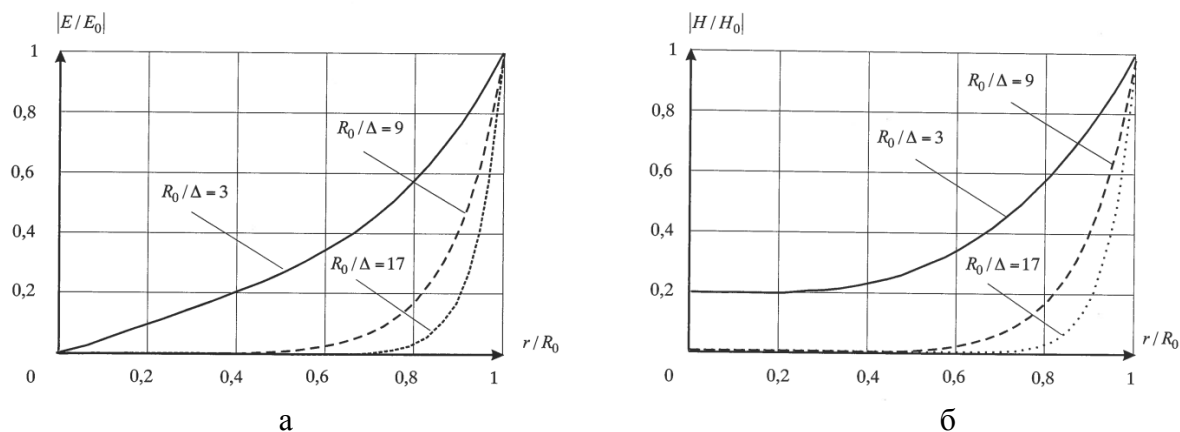


Рисунок 2.5 – затухание электрического (а) и магнитного (б) поля в жидкой фазе слитка

Картина распределения магнитной индукции в сечении двумерной расчетной области жидкой фазы слитка представлена на рисунке 2.6.

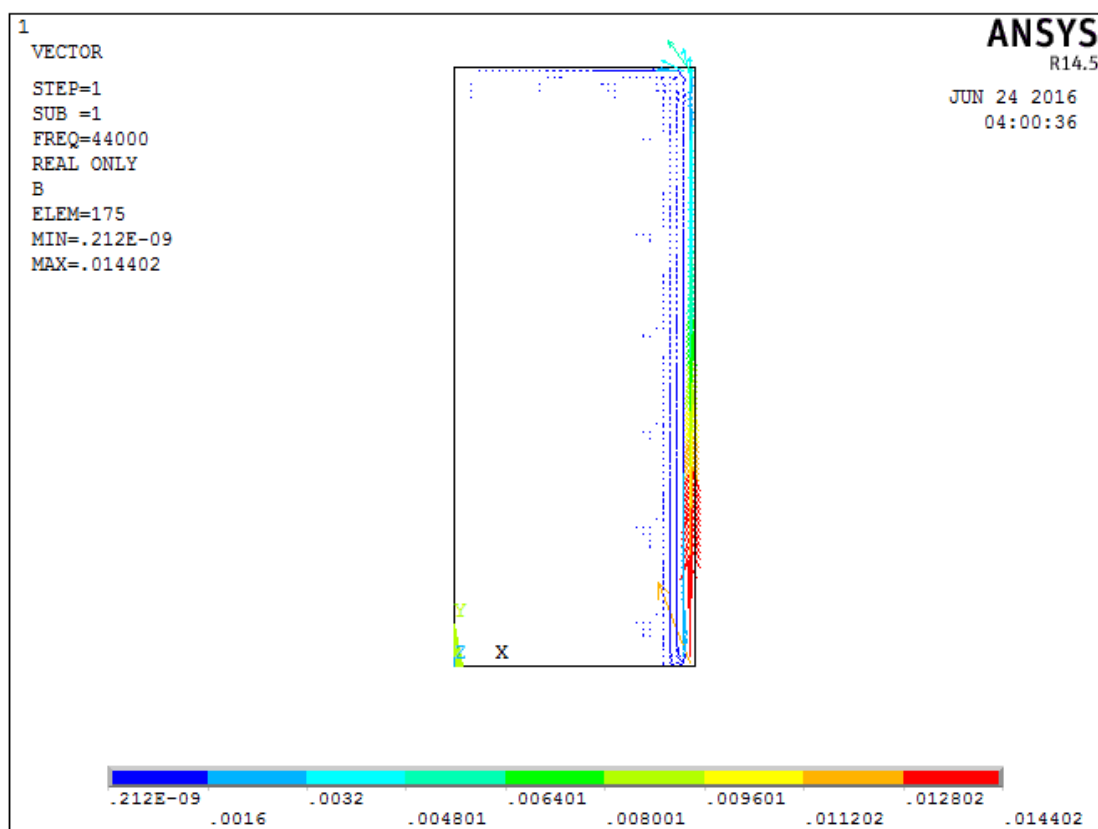


Рисунок 2.6 – картина распределения магнитного поля в расчётной области жидкой фазы слитка

2.4.2 Энергетические характеристики системы «индуктор-слиток»

Система «индуктор-слиток» имеет индуктивный характер нагрузки и обладает низким естественным коэффициентом мощности, который для рассматриваемой конструкции не превышает 0,05. Наибольшее влияние на естественный коэффициент мощности оказывает величина воздушного зазора между индуктором кристаллизатора и слитком, а так же частота питающего напряжения.

С уменьшением зазора между индуктором и слитком, а так же при уменьшении частоты питающего напряжения изменяется в соответствии с графиком (рисунок 2.7).

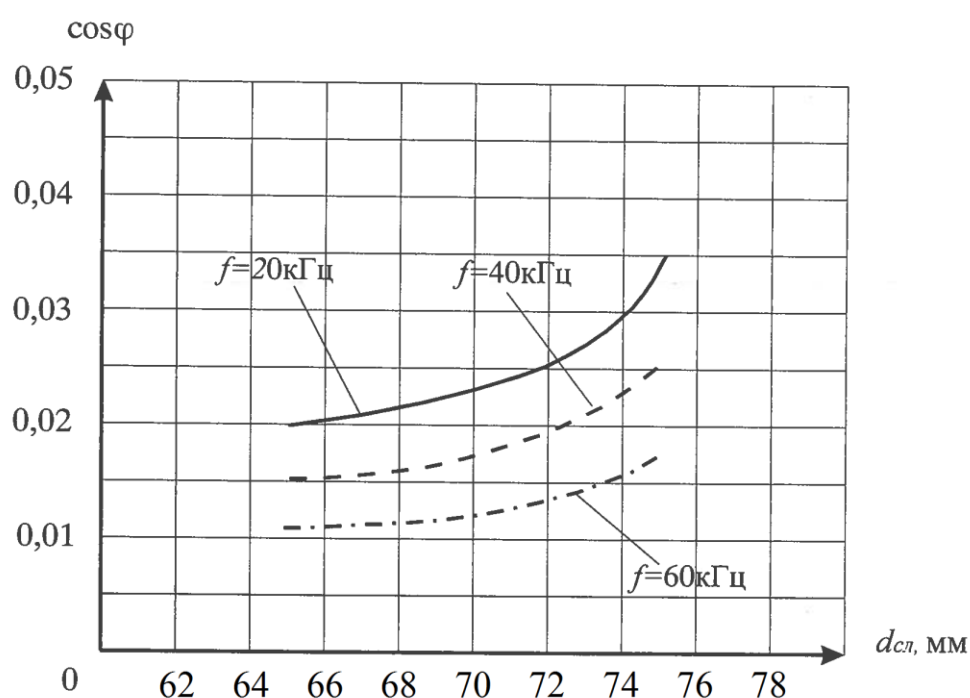


Рисунок 2.7 – Зависимость коэффициента мощности системы «индуктор-слиток» от диаметра слитка

Коэффициент полезного действия рассматриваемой системы «индуктор-слиток» не превышает 50 %. Изменение КПД при уменьшении воздушного зазора между индуктором и слитком, а так же при увеличении высоты

индуктора происходит в соответствии с графиком на рисунке 2.8. В рассматриваемом диапазоне частот питающего напряжения КПД системы существенно не меняется.

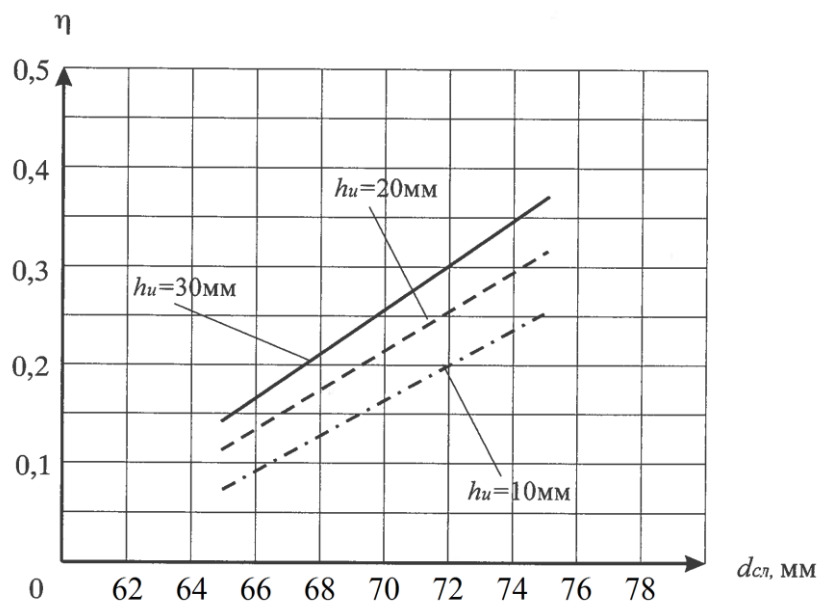


Рисунок 2.8 – Зависимость КПД системы «индуктор-слиток» от диаметра слитка

Высота индуктора должна обеспечивать стабильность формирования слитка, и возможность его эффективного охлаждения при минимуме потребляемой мощности. Рассмотрим влияние высоты индуктора на энергетические характеристики системы (рисунок 2.9).

На рисунке 2.9 показаны графики изменения абсолютных значений активной мощности в индукторе и слитке при увеличении высоты индуктора.

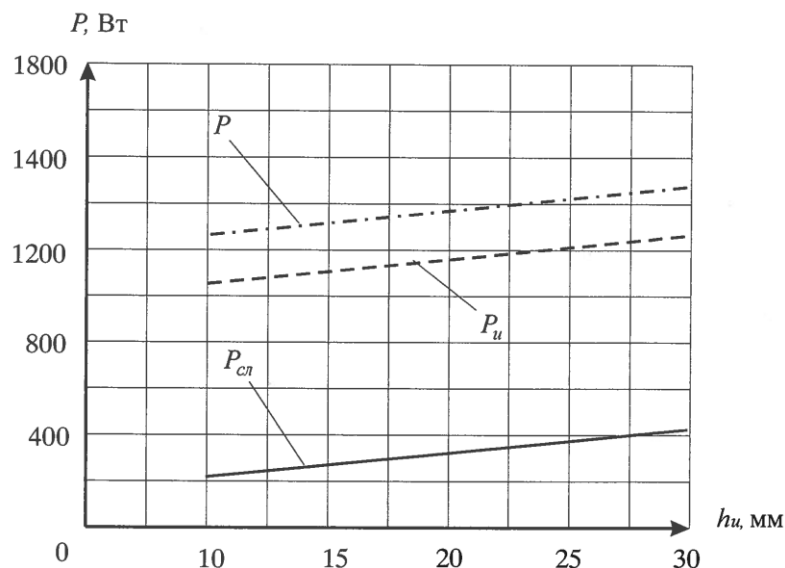


Рисунок 2.9 – зависимость активной мощности системы «индуктор-слиток», индуктора и слитка от высоты индуктора

С увеличением высоты индуктора уменьшается его сопротивление. Кроме того, плотность тока в области кристаллизации слитка снижается, и для поддержания диаметра слитка заданного размера, необходимо увеличение тока индуктора. При этом происходит незначительное увеличение потерь мощности в индукторе и увеличение мощности выделяющейся в слитке.

2.4.3 Силовые характеристики системы «индуктор-слиток»

Процессы, протекающие при формировании слитка в электромагнитном поле, определяются плотностью потока энергии на поверхности слитка, обеспечивающего удержание и перемешивание жидкой фазы слитка за счет электродинамических сил и нагрев слитка за счет внутренних источников тепла.

Под действием электромагнитного поля в слитке возникают вихревые токи, плотность которых определяется из выражения, $\frac{A}{M^2}$:

$$\dot{\delta} = \gamma \dot{\mathbf{E}}. \quad (2.14)$$

При взаимодействии магнитного поля с индуцированными в слитке токами в каждом элементарном объеме жидкого металла возникает электромагнитная сила, средняя за период объемная плотность которой определяется из выражения $\frac{H}{M^3}$:

$$\mathbf{f}_{\text{эм}} = \text{Re} \frac{1}{2} \left(\dot{\delta}^* \times \dot{\mathbf{B}} \right) = \mathbf{f}_{\text{эм}}^r + \mathbf{f}_{\text{эм}}^z. \quad (2.15)$$

Удержание металла от растекания обеспечивается радиальной составляющей этой силы $\frac{H}{M^3}$:

$$\mathbf{f}_{\text{эм}}^r = \text{Re} \frac{1}{2} \left(\dot{\delta}_\varphi^* \times \dot{\mathbf{B}}_z \right). \quad (2.16)$$

Характер распределения электромагнитных сил и плотности тока в слитке показан на рисунках 2.10 и 2.11 соответственно.

Электромагнитное давление $\frac{H}{M^2}$, создаваемое этой силой, можно записать как

$$p_{\text{эм}} = \int_0^r \mathbf{f}_{\text{эм}}^r dr. \quad (2.17)$$

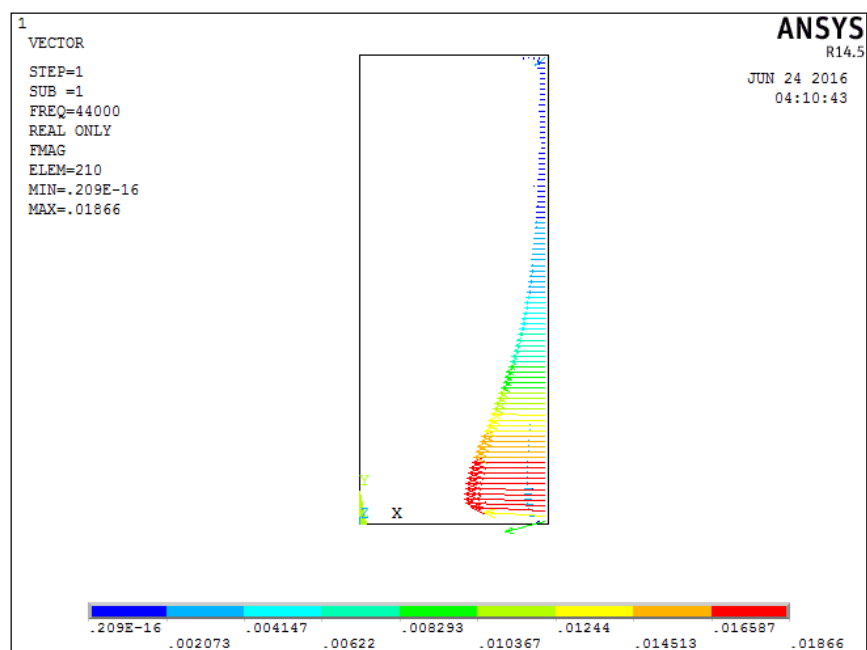


Рисунок 2.10 – Распределение электромагнитных сил в слитке

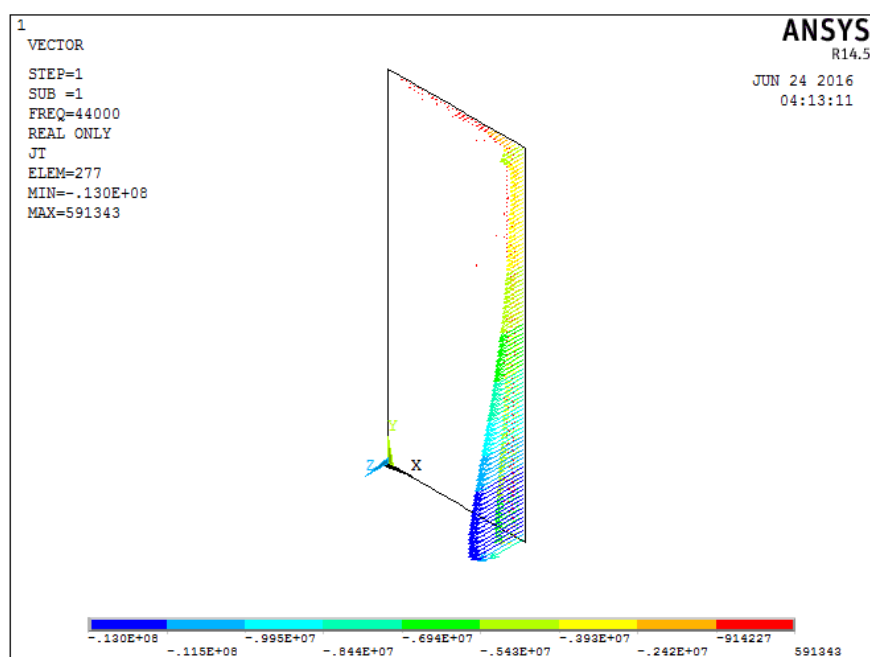


Рисунок 2.11 – Распределение плотности тока в слитке

Условием существования установившейся формы поверхности жидкого металла, является условие баланса гидростатического давления, давления сил поверхностного натяжения и электромагнитных сил:

$$\rho g h_{жф} = \frac{\sigma_n}{r_{сл}} + p_{эм}, \quad (2.18)$$

где ρ – плотность жидкого алюминия;

g – ускорение свободного падения;

$h_{жф}$ – высота столба жидкого металла,

σ_n – коэффициент поверхностного натяжения;

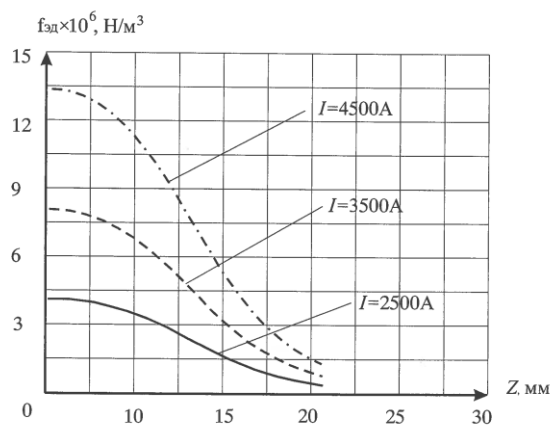
$r_{сл}$ – радиус слитка.

Устойчивость формирования слитка подразумевает выполнение равенства (2.18), которое может быть достигнуто различным сочетанием электромагнитных параметров и геометрических размеров системы «индуктор-слиток». Построенные математические модели позволяют установить взаимосвязь этих параметров и степень вклада каждого из них в процесс формирования слитка.

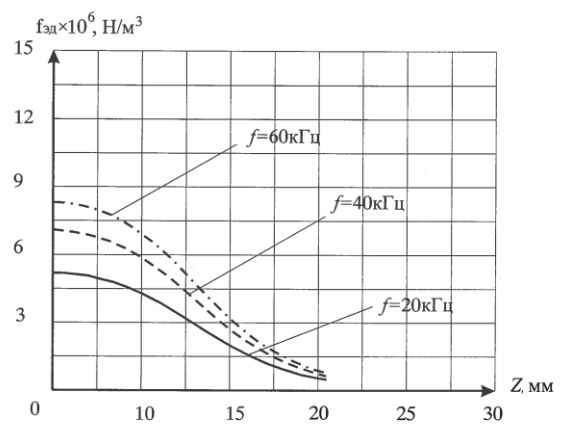
Величина и характер распределения электромагнитных сил по поверхности слитка зависят от как от электрических (ток индуктора, частота питающего напряжения) так и геометрических (величина зазора между индуктором и слитком, высота индуктора) параметров системы «индуктор-слиток».

На рисунке 2.12 а и б представлены распределения электромагнитных сил по поверхности слитка соответственно при различных токах индуктора и частоте питающего напряжения. На рисунке Z – текущее расстояние от фронта кристаллизации до рассматриваемой точки.

Как видно из представленных графиков, величина электромагнитных сил на поверхности слитка пропорциональна току индуктора в квадрате I_u^2 , и прямо пропорциональна частоте питающего напряжения f .



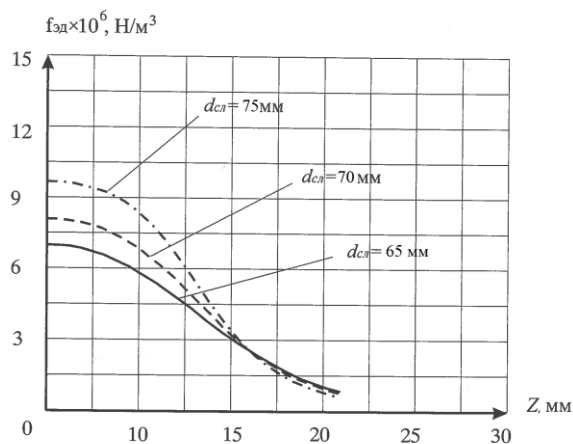
а



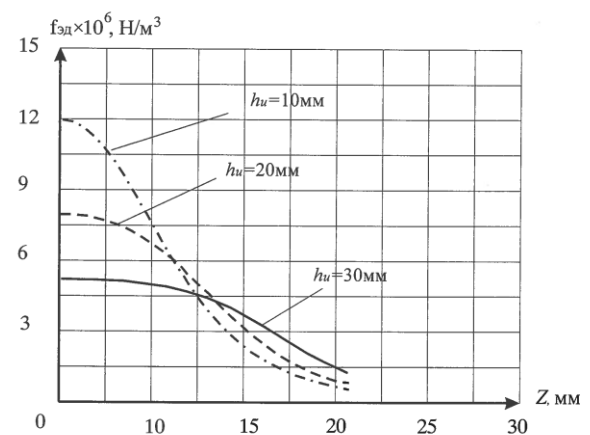
б

Рисунок 2.12 - Распределение электродинамической силы на поверхности слитка при разных токах в индукторе (а) и частотах питающего напряжения (б)

Соотношение геометрических размеров системы «индуктор-слиток» так же оказывает влияние на характер распределения электромагнитных сил на поверхности слитка. На рисунке 2.13 представлены картины распределения электромагнитной силы по поверхности слитка при различных зазорах между слитком и индуктором (рисунок 2.13 а) и разной высоте индуктора (рисунок 2.13 б).



а



б

Рисунок 2.13 – Распределение электродинамической силы на поверхности слитка при разных диаметрах слитка (а) и высотах индуктора (б)

С увеличением зазора между индуктором и слитком величина электромагнитной силы на поверхности слитка уменьшается (рисунок 2.13 а), но в то же время характер распределения силы становится более равномерным.

Увеличение высоты индуктора, так же приводит к уменьшению величины электромагнитной силы и делает ее распределение по поверхности слитка более равномерным (рисунок 2.13, б).

Гидростатическое давление у фронта кристаллизации напрямую зависит от высоты жидкой фазы слитка (рисунок 2.14).

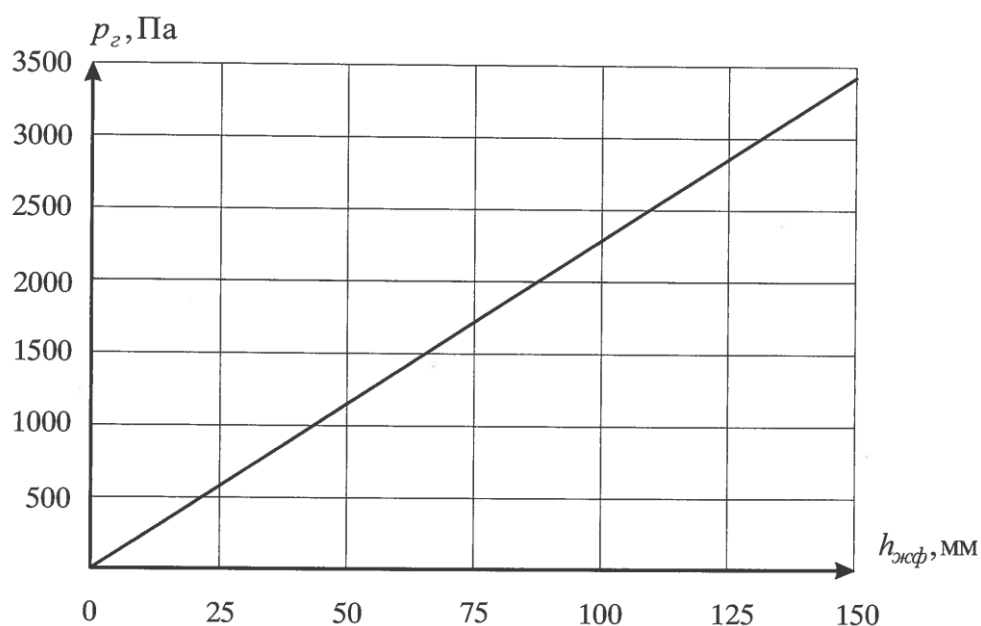


Рисунок 2.14 – Зависимость гидростатического давления от высоты жидкой фазы

Электромагнитное давление при заданных геометрических размерах системы «индуктор-слиток» будет определяться силой тока в индукторе и частотой питающего напряжения. Электромагнитное и гидростатическое давление имеют максимальное значение у фронта кристаллизации и убывают по мере удаления от него. Однако характер их распределения по поверхности слитка разный.

На рисунке 2.15 показано распределение гидростатического и электромагнитного давлений при различных зазорах между индуктором и

слитком (рисунок 2.15, а) и разной высоте индуктора (рисунок 2.15, б). Расчет электромагнитного давления, представленного на этих зависимостях, осуществлялся подбором токовой нагрузки индуктора, в соответствии с выражением (2.18). На уровне фронта кристаллизации электромагнитное и гидростатическое давления уравниваются друг друга. По мере удаления от фронта кристаллизации, гидростатическое давление снижается по линейному закону. Затухание электромагнитного давления по мере удаления от индуктора имеет более сложную зависимость.

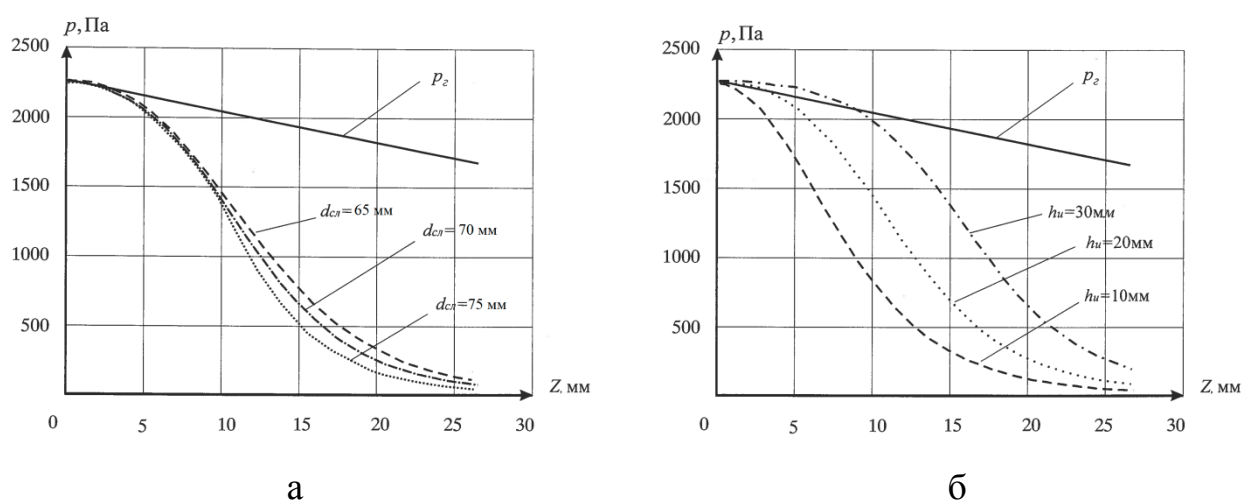


Рисунок 2.15 – зависимость гидростатического и электродинамического давления на поверхности слитка от индуктора при разных диаметрах слитка (а) и высотах индуктора (б)

Как видно из графиков (рисунок 2.15, б), с увеличением высоты индуктора, увеличивается область, в которой электромагнитное давление распределяется равномерно и практически совпадает с распределением гидростатического давления. В месте с тем, увеличение высоты индуктора, ведет к увеличению затрат энергии на формирование слитка.

При формировании слитка важное значение имеют высота столба жидкого металла над индуктором и силы поверхностного натяжения, особенно при формировании слитков малого диаметра. На рисунке 2.16, а приведены кривые показывающие взаимосвязь диаметра слитка и силы тока в индукторе

картины распределения напряженностей электрического и магнитного полей в слитке и определены параметры схемы замещения системы «индуктор-слиток»; проведен расчет энергетических и силовых характеристик электромагнитного кристаллизатора в зависимости от его геометрических размеров, при разных значениях тока в индукторе и частоты питающего напряжения.

3 Экспериментальная электротехнологическая установка с электромагнитным кристаллизатором для получения непрерывнолитых слитков

3.1 Общее описание установки

Экспериментальная электротехнологическая установка для получения непрерывнолитых слитков из алюминиевых сплавов на основе электромагнитного кристаллизатора, представленная на рисунке 3.1, состоит из следующих основных элементов: индукционная тигельная печь (1), миксер сопротивления емкостью 50 кг (2) и литейная машина с электромагнитным кристаллизатором (3). Кроме перечисленных элементов, установка включает источник питания, а также блок согласования печи и блок согласования кристаллизатора.

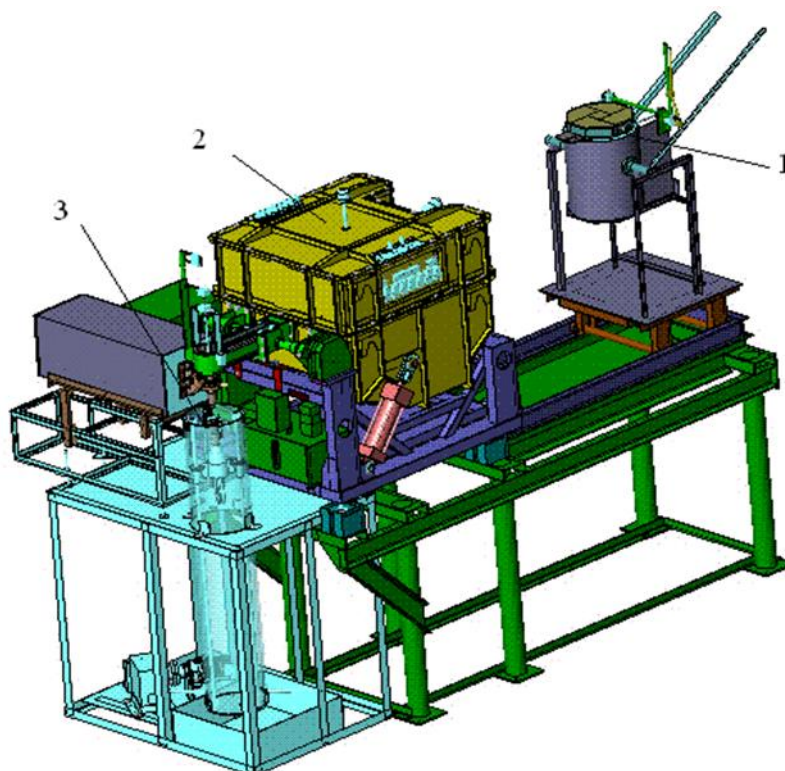


Рисунок 3.1 – Плавильно-литейный комплекс

В настоящее время на металлургических предприятиях для процессов полунепрерывного литья применяют литейные машины: с цепным, тросовым и гидравлическим приводами. При создании экспериментальной установки выбор был сделан в пользу машины тросового типа как наиболее простой в изготовлении и при этом обеспечивающей достаточную плавность хода для получения литья хорошего качества.

Литейная машина представляет собой шахту, выполненную из трубы диаметром 0,3 м и высотой 1,75 м. Внутри трубы закреплены 4 направляющие, служащие для перемещения в трубе литейного стола. Литейная машина и все ее узлы монтируются на общей раме, служащей одновременно площадкой обслуживания установки. Управление передвижением литейного стола с заданной скоростью осуществляется посредством троса, который через систему блоков соединен с приводом. Привод состоит из двигателя постоянного тока УВ – 061 – М64У4 (номинальное напряжение 220 В, номинальный ток 25 А) и редуктора. Особенность привода тросовых литейных машин – бесступенчатое электрическое регулирование рабочих скоростей с помощью двигателя постоянного тока, т. е. изменением числа оборотов электродвигателя. Регулирование частоты вращения двигателя осуществляется в пределах до 1100 об/мин, что с учетом конструкции редуктора обеспечивает линейную скорость вытягивания слитков до 150 мм/с.

Для уменьшения тепловых потерь от расплава по пути к кристаллизатору литейная машина располагается максимально близко к печи. При рабочем ходе машина обеспечивает бесступенчатое регулирование скорости литья, а при ускоренном ходе – быстрый подъем и опускание литейного стола. Конечное ограничение передвижения литейного стола осуществляется посредством концевых выключателей.

Для приготовления и выдержки расплава в установке использована индукционная тигельная печь (рисунок 3.2), предназначенная для приготовления расплавов веществ с температурой плавления до 1500 °С. Печь

состоит из электропроводящего графитового тигля и индуктора, размещенных в футерованном каркасе.



Рисунок 3.2 – Индукционная тигельная печь

Нагрев расплавляемого материала в печи осуществляется косвенно, т. е. индукционным способом нагревается тигель, от которого и происходит нагрев металла до температуры плавления и перегрева. Тигель марки ТГА – 100 емкостью 5 л выполнен из графито-шамотного композиционного материала. Индуктор печи выполнен из медной трубки диаметром 0,012 м, 13 витков которой равномерно навито на тигельную емкость в один слой.

Опрокидывание печи осуществляется вручную, без применения электрического привода.

Индуктор питается переменным током повышенной частоты от преобразователя частоты. В процессе нагрева трубка охлаждается водой с расходом 35 л/мин с температурой 20 °С.

Для питания печи использована разрешенная к промышленному применению частота 66 кГц, являющаяся ближайшей к оптимальной частоте

для размеров и материала тигля. В качестве источника питания использован полупроводниковый преобразователь частоты УВГ2-25–44/66. На выходе преобразователя создается напряжение 300 В и ток до 50 А. Выходную частоту можно регулировать в пределах от 39,6 до 72,6 кГц при работе от внутреннего задающего источника частоты и в диапазоне от 22 до 440 кГц при использовании внешнего задающего источника частоты (генератора сигналов низкочастотного ГЗ-112). Конструктивно преобразователь частоты выполнен с четырехступенчатым увеличением мощности от 5 Вт в пульте управления, 20 Вт и 300 Вт – на предварительных ступенях усиления мощности для последующего увеличения мощности на 600 транзисторах типа КТ 926. Такая схема включения позволяет многократно повысить надежность преобразователя частоты в процессе работы, перегрузок и аварийных отключений от нагрузочного контура. Транзисторы включены параллельно по схеме с общим эмиттером и питаются от промежуточного звена постоянного тока – трехфазного диодного полупроводникового выпрямителя по схеме Ларионова. Выпрямитель питается через два понижающих трехфазных трансформатора, включенных по схеме треугольник – треугольник.

Для согласования параметров индуктора тигельной печи с параметрами источника питания использован блок, состоящий из понижающего трансформатора и батареи конденсаторов для компенсации реактивной мощности. Обмотка трансформатора и токоподводы изготовлены с использованием высокочастотного кабеля с распределенной плотностью тока по сечению. Сердечник понижающего трансформатора изготовлен в виде тороидального кольца из ферромагнитного диэлектрика марки НН 700.

Электромагнитный кристаллизатор (рисунок 3.3), представляет собой медный водоохлаждаемый одновитковый (как показано на рисунке) или многовитковый индуктор с внутренним диаметром 140 мм и высотой 10 мм.



Рисунок 3.3 – Индуктор электромагнитного кристаллизатора

Из печи в электромагнитный кристаллизатор сплав подается посредством литейной оснастки (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Литейная оснастка

Индуктивный характер нагрузки с малым коэффициентом мощности позволяет при выборе электрической схемы и оборудования питающего электромагнитный кристаллизатор ориентироваться на электрооборудование для питания установок индукционного нагрева.

Для отработки технологии непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор разработана электрическая схема питания кристаллизатора, состоящая из высокочастотного транзисторного генератора ВГТ2-25/66 и последовательно-параллельного силового контура нагрузкой которого является электромагнитный кристаллизатор.

Питание электромагнитного кристаллизатора осуществляется током повышенной частоты. В качестве источника питания используется транзисторный генератор ВГТ2-25/66 номинальной мощностью 25 кВт. На вход генератора подается трехфазное синусоидальное напряжение 380 В частотой 50 Гц. На выходе генератора напряжение составляет 600 В. Диапазон изменения частоты на выходе генератора составляет 50–100 кГц.

Транзисторный преобразователь частоты ВГТ2-25/66 с промежуточным звеном постоянного тока состоит из выпрямителя, фильтра и резонансного инвертора напряжения. Инвертор генератора (рис. 3.5) собран по мостовой схеме, выполненной на силовых биполярных транзисторах S1–S4 (IRFPE50). Конденсаторы C1–C4 образуют искусственную точку, дающую напряжение на каждом плече моста 250 В.

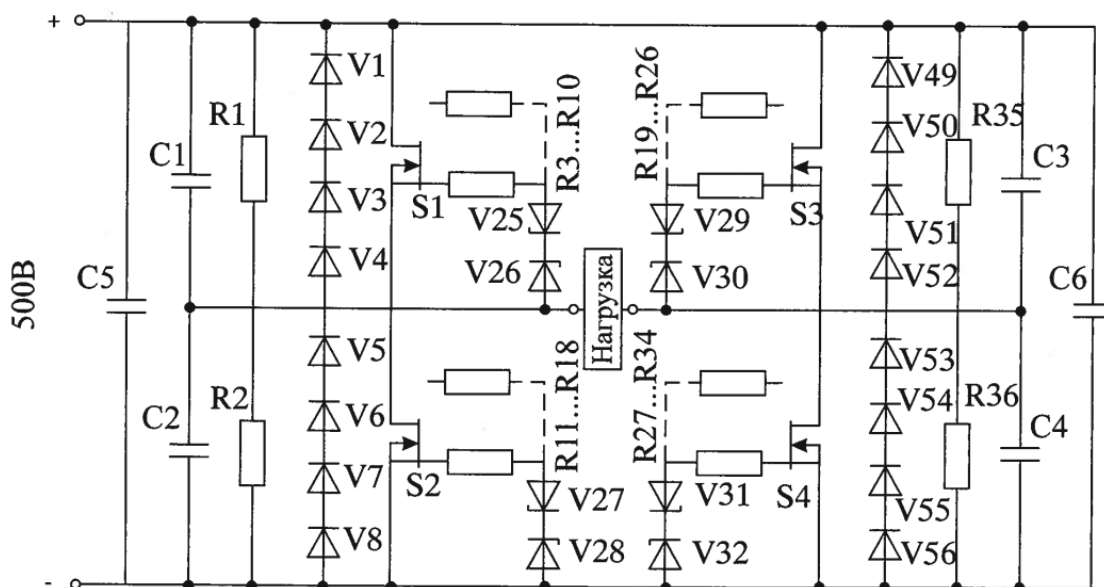


Рисунок 3.5 – Электрическая схема инвертора

Из-за неизбежной разницы в технических параметрах конденсаторов, включенных в различные плечи моста, параллельно конденсаторам включаются резисторы R1, R2, R35, R36. Для отвода некомпенсированной реактивной мощности из цепи нагрузки параллельно транзисторам включены ветви обратных диодов V1–V8, V49–V56 (КД213А). Через обратные диоды происходит циркуляция избытка реактивной мощности между активно-индуктивной нагрузкой и конденсаторами фильтра C5 и C6. Базовая цепь транзистора содержит стабилитроны V25–V32 (2С516Б) для поддержания импульсов управляющего напряжения в допустимых пределах.

Нагрузочная цепь рассматриваемого генератора может быть выполнена в двух вариантах:

1. Согласующий контур может быть последовательным, состоящим из конденсаторной батареи и индуктора (или индуктора с трансформатором). Такой вариант целесообразен при добротности индуктора $Q \leq 3$, так как напряжение на индукторе (первичной обмотке трансформатора) и компенсирующей батарее конденсаторов в режиме, близком к резонансу,

возрастет в Q раз по сравнению с напряжением, приложенным к согласующему контуру.

2. Контур может быть выполнен сочетанием последовательного и параллельного контуров (последовательно-параллельный контур). Последовательный контур должен состоять из конденсаторной батареи суммарной емкостью $0,1 \text{ мкФ}$ и плавно изменяющейся индуктивности 64 мкГн . В этом случае параллельный контур должен состоять из индуктора и компенсирующей конденсаторной батареи.

В установке для согласования параметров индуктора с параметрами источника питания использован последовательно-параллельный контур (рисунок 3.6), состоящий из водоохлаждаемого дросселя $L1$, последовательной батареи конденсаторов $K78-2-1000В$ ($C1 - C64$), общей емкостью $150,9 \text{ нФ}$, параллельной батареи конденсаторов $K78-21А-500В$ ($C65-C67$), общей емкостью $4,1 \text{ мкФ}$, и согласующего трансформатора $TC1$ ($T1$) с шестью отпайками для регулирования напряжения на нагрузке. Ввиду того, что в параллельном контуре протекают большие токи, порядка $1-2 \text{ кА}$, токоведущие элементы охлаждаются водой.

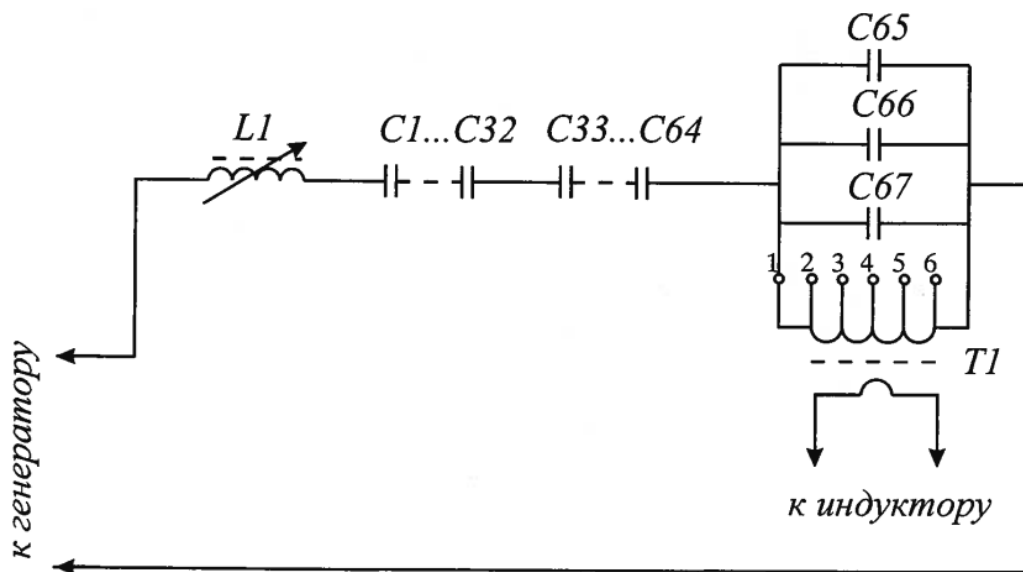


Рисунок 3.6 – Электрическая схема последовательно-параллельного контура

Для надежной работы генератора обеспечена гальваническая развязка индуктора и генератора не менее чем на 1,5 кВ действующего значения напряжения, которая осуществлена с помощью трансформатора.

Для измерения электрических параметров в режиме настройки и работы были использованы милливольтметр ВЗ-38, трансформатор тока высокочастотный и встроенные амперметр и вольтметр преобразователя частоты и внешнего источника постоянного тока.

Опираясь на результаты математического моделирования при создании экспериментальной электротехнологической установки с электромагнитным кристаллизатором, были заложены следующие параметры:

– тип кристаллизатора	электромагнитный
– диаметр отливаемых слитков, мм.....	70
– максимальная потребляемая активная мощность, кВт.....	51
– максимальная производительность, кг/ч.....	7
– напряжение питания, В.....	220/380
– количество фаз питающего напряжения.....	3
– частота питающего напряжения кристаллизатора, кГц.....	20 – 60
– частота питающего напряжения плавильной печи, кГц.....	60
– скорость перемещения литейной машины, м/с:	
опускание.....	0,005 – 0,020
подъем.....	0,1
максимальный расход охлаждающей воды, м ³ /ч.....	2

3.2 Технологические параметры процесса получения слитков из сплава АК18

Для получения алюминиевых слитков требуемого качества необходимо создать определенные условия, которые можно представить в качестве технологических параметров процесса литья. К основным параметрам относятся: скорость вытягивания слитка, температура литья, напряжение на

индукторе, ток в индукторе, частота питающего индуктор напряжения, диаметр слитка, расход охлаждающей воды (интенсивность охлаждения), высота жидкой фазы.

Скорость литья влияет на качество слитка, а также на производительность процесса, определяемого как количество массы металла, отлитого в единицу времени. При этом скорость литья должна быть меньше, чем критическая, при которой нарушается формирования слитка и возникает структурная неоднородность по сечению слитка и дефекты на его поверхности.

Величина критической скорости литья слитков зависит от химического состава отливаемого сплава, формы и размера поперечного сечения слитка. Чем больше расплав содержит легирующих элементов, тем в большей мере приходится ограничивать скорость литья. При выборе скорости литья на первый план выступают качественные характеристики: высота, плотность, равномерность структуры и механические свойства по сечению слитка.

Температура литья влияет на форму, величину зерна и внутреннее строение слитка. Так как диаметр слитка, и соответственно, расход металла и размеры литейной оснастки малы, то во избежание замерзания расплава, особенно в начальной стадии литья, необходим перегрев металла.

Напряжение на индукторе при заданных высоте столба жидкой фазы и размерах индуктора определяется диаметром слитка и частотой тока. Напряжение контролируется и поддерживается постоянным или регулируется системой автоматического регулирования размеров слитка. Высота жидкой зоны существенно влияет на процесс кристаллизации. Колебания высоты жидкой зоны приводят к изменению размеров слитка.

Расход охлаждающей жидкости существенно влияет на устойчивость процесса литья и структуру слитка. Расположение пояса охлаждения и расход охлаждающей воды должны быть такими, чтобы фронт кристаллизации находился на уровне середины высоты индуктора, где величина электромагнитного усилия максимальна.

Значения технологических параметров приведены в приложении Б.

В результате проведенных исследований разработана промышленная технология производства слитков из сплава АК18, которая включает получение непрерывного литого слитка диаметром 70 мм в электромагнитном поле.

Разработанная и представленная в третьем разделе экспериментальная электротехнологическая установка представляет собой плавно-литейный агрегат, формирование слитка в котором осуществляется в электромагнитном кристаллизаторе. Установка позволяет получать алюминиевые слитки диаметром 70 мм методом непрерывного литья.

Определены параметры согласующего контура электромагнитного кристаллизатора и построены его рабочие характеристики, позволяющие настроить установку в рабочий режим для слитков диаметром 5–15 мм и диапазоне частот питающего напряжения 20–60 кГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе поставлена и решена актуальная научно-техническая проблема в области электротехнологии, заключающаяся в математическом моделировании электромагнитных процессов в системе «индуктор-слиток».

Исходя из проведённых исследований, получены следующие выводы и результаты:

1. Обозначены основные технологические проблемы получения высоколегированных слитков из алюминия, такие как химическая неоднородность слитка, низкие механические свойства и механические дефекты.

2. Проведён обзор существующих технологических схем получения слитков из высоколегированных алюминий-кремниевых сплавов, из которого следует, что наиболее производительным способом отливки является метод полунепрерывного литья.

3. Обоснованы преимущества внедрения электромагнитного кристаллизатора в литейный комплекс, которые заключаются в повышении скорости охлаждения, улучшении структуры и свойств слитка, а также повышении технологических свойств металла при деформации слитка.

4. Построена математическая модель системы «индуктор-слиток» для расчёта и анализа электромагнитных процессов. В результате моделирования были рассчитаны интегральные и дифференциальные параметры системы.

5. Проведён анализ результатов математического моделирования, основываясь на котором построены графики КПД, активной мощности и других параметров в зависимости от конструкции системы.

6. На основе результатов математического моделирования было проведено экспериментальное исследование литья алюминиевых слитков. Допустимые расхождения результатов теоретического и экспериментального исследований показывают адекватность построенных моделей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Aluminum-Silicon Alloys [корпоративный сайт]. URL: <http://www.totalmateria.com> (дата обращения: 15.01.2016).
2. Белов Н.А., Савченко С.В., Хван А.В. Фазовый состав и структура силуминов: Справочное издание. – М.: •МИСИС•, 2007. – 283 с.
3. Арзамасов Б.Н. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. Б.Н.Арзамасов, И.И.Сидорин, Г.Ф.Косолапов и др.; Под общ. ред. Б.Н.Арзамасова. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Машиностроение, 1986. - 384 с.
4. Кудряшов В.Г., Смоленцев В.И. Вязкость разрушения алюминиевых сплавов. – М.: Metallurgia, 1976. – 293 с.
5. Алюминий. Свойства и физическое металловедение: Справ. изд./Алиева С.Г., Альтман М.Б. и др. – М.: Metallurgia, 1984. – 582 с.
6. Золоторевский В.С., Белов Н.А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. – М.: •МИСИС•, 2005. – 271 с.
7. Плавка и литье алюминиевых сплавов: Справ. руководство / Под ред. В.И. Добаткина. – М.: Metallurgia, 1983. – 352 с.
8. Силумины. Атлас микроструктур и фактограмм промышленных сплавов: Справ. изд./ Пригунова А.Г., Белов Н.А., Таран Ю.Н. и др. – М.: •МИСИС•, 1996. – 175 с.
9. Аникина, В. И. Структура и свойства алюминиево-магниевого сплавов : монография / В. И. Аникина, Т. Р. Гильманшина, В. Н. Баранов. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. – 112 с.
10. МГД технологии в металлургии. Интенсивный курс Специализация IV. Бааке Э., Барглик Д., Луи С. [и др.]. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 250 с.

11. 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.
12. Комплекс современного оборудования для производства алюминиевых слитков / Ф. Нидермайер // Цветные металлы. - 2008. - № 1. - С. 79-86 .
13. Слитки из алюминиевых сплавов с магнием и кремнием для прессования. Основы производства [Электронный ресурс] / Г. С. Макаров. - Электрон. текстовые дан. (130,50 Кб.). - Москва : Интернет Инжиниринг, 2011. - 528 с.
14. Blum S. // Aluminium Times. 2004. April/May. P. 26-27.
15. Kraly A., Hartlieb E., Jansen O. et al. // Aluminium World. 2003. V. 3. № 1. P. 69-72.
16. Б. С. Чуркин [и др.] ; под ред. Б. С. Чуркина ; Рос. гос. проф.-пед. ун-т. - Екатеринбург : РГППУ, 2010. - 730 с.
17. Wagstaff [корпоративный сайт]. URL: <http://www.wagstaff.com> (дата обращения: 15.01.2016).
18. Customized solutions for the global aluminum industry // Newscast. Spokane: Wagstaff, 2008, iss. 60. P.1.
19. Применение алюминиевых сплавов: Справ. изд. / Альтман М.Б., Арбузов Ю.П. и др. – М.: Metallurgia, 1985 – 344 с.
20. ГОСТ 1583–93. Сплавы алюминиевые литейные. – М.: Изд–во стандартов, 1993.
21. Литейное производство [корпоративный сайт]. URL: <http://www.alp-tula.ru/> (дата обращения: 23.04.2016).
22. Промышленные алюминиевые сплавы: Справ. изд: / Алиева С.Г., Альтман М.Б. и др. – М.: Metallurgia, 1984. – 528 с.
23. Избранные труды В.И. Добаткина / под ред. Н.Ф. Аношкина, В.И. Елагина, М.З. Ерманок, Т.М. Швецова. – М.: Цветметинформация, 1971. – 126 с.

24. Современные электротехнологии для производства высококачественных алюминиевых сплавов: монография / М.В. Первухин, В.Н. Тимофеев. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 155 с.
25. Бондарев, Б. И. Технология производства быстрозакристаллизованных алюминиевых сплавов / Б. И. Бондарев, Ю. В. Шмаков. – М. : ВИЛС, 1997. – 23 с.
26. Добаткин, В. И. Быстрозакристаллизованные алюминиевые сплавы / В. И. Добаткин, В. И. Елагин, В. М. Федоров. – М. : ВИЛС, 1995. – 341 с.
27. Елагин, В. И. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами / В. И. Елагин. – М. : Metallurgia, 1975. – 248 с.
28. Добаткин, В. И. Гранулируемые алюминиевые сплавы / В. И. Добаткин, В. И. Елагин. – М. : Metallurgia, 1981. – 175 с.
29. Баландин, Г. Ф. Теория формирования отливки: Основы тепловой теории. Затвердевание и охлаждение отливки : учебник для вузов / Г. Ф. Баландин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. – 360 с. : ил.
30. Баландин, Г. Ф. Формирование кристаллического строения отливок / Г. Ф. Баландин. – М. : Машиностроение, 1973. – 287 с.
31. Борисов, В. Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка / В. Т. Борисов. – М. : Metallurgia, 1987. – С. 222.
32. Добаткин, В. И. О метастабильных диаграммах состояния металлических систем / В. И. Добаткин, Ю. Г. Гольдер, В. В. Белоцерковцев // Metallurgia и металловедение цветных сплавов. – М. : Наука, 1982 . – С. 53–60.
33. Специальные способы литья : справ. / В. А. Ефимов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1991. – 436 с. : ил.

34. Blackburn J.M. // Труды 1-й международной конференции «Литьё алюминия». Москва, 27–30 марта 2007: АЛЮСИЛ МВиТ, 2007: [Электронный ресурс].
35. Пат. 2187407 Российская Федерация, В22D11/00. Вертикальная тросовая машина полунепрерывного литья / Фурман М.Г.; Бабаев Н.А.; Попов В.С.; Трошенков С.А.; Макарова В.А.; заявитель и патентообладатель ОАО "Белокалитвинское металлургическое производственное объединение" № 2000113022/02; заявл. 24.05.00; опубл. 20.08.02.
36. Голиков, И. Н. Дендритная ликвация в сталях и сплавах / И. Н. Голиков, С. Б. Масленков. – М. : Металлургия, 1977. – 223 с.
37. Колесниченко, А. Ф. Технологические МГД-устройства и процессы / А. Ф. Колесниченко. – Киев : Наукова думка, 1980. – 192 с.
38. Гориславец, Ю. М. Расчет магнитного давления в индукционных МГД-грануляторах тигельного типа / Ю. М. Гориславец, Н. Х. Эркенов // Техническая электродинамика. – 1988. – № 3. – С. 9–15.
39. Гориславец, Ю. М. Магнитное давление в жидком металле индукционных МГД-грануляторов канального типа / Ю. М. Гориславец, Н. Х. Эркенов // Техническая электродинамика. – 1988. – № 6. – С. 21–27.
40. Колесниченко, А. Ф. Капиллярные МГД-течения со свободными границами / А. Ф. Колесниченко, И. В. Казачков, В. О. Водянюк, Н. В. Лысак. – Киев : Наукова думка, 1988. – 176 с.
41. Гецелев, З. Н. Удерживание замкнутой конфигурации жидкости электромагнитным полем / З. Н. Гецелев, Г. И. Мартынов // Магнитная гидродинамика. – 1979. – № 1. – С. 97–104.
42. Непрерывное литьё в электромагнитный кристаллизатор / Гецелев З.Н., Балахонцев Г.А., Квасов Ф.И. и др. М.: Металлургия, 1983, 152 с.

43. Паршин, А. М. Источники питания электротехнологических установок: учеб. пособие / А. М. Паршин, М. В. Первухин, В. Н. Тимофеев. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – 108 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 - Значения физических свойств алюминия и воздуха

Физическая величина	Обозначение	Единица измерения	Значение
Вязкость алюминия	ν_{Al}	$Па \cdot с$	$2,9 \times 10^{-3}$
Вязкость воздуха	$\nu_{в}$	$Па \cdot с$	1×10^{-5}
Плотность жидкого алюминия	$\rho_{Alж}$	$кг/м^3$	2370
Плотность твердого алюминия	$\rho_{Alт}$	$кг/м^3$	2720
Плотность воздуха	$\rho_{в}$	$кг/м^3$	1
Теплоемкость алюминия	c_{Al}	$Дж/(кг \cdot K)$	1290
Теплоемкость воздуха	$c_{в}$	$Дж/(кг \cdot K)$	1000
Электросопротивление алюминия - при температуре 20 °С - при температуре 750 °С	ρ_1 ρ_2	$Ом \cdot м$	$0,027 \times 10^{-6}$ $0,22 \times 10^{-6}$
Коэффициент поверхностного натяжения алюминия	σ_n	$Н/м$	0,9
Температура солидуса	$T_{сол}$	K	932
Температура ликвидуса	$T_{лик}$	K	934
Скрытая теплота плавления	L	$Дж/кг$	390000
Коэффициент теплопроводности алюминия	λ_{Al}	$Вт/(м \cdot K)$	104