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

« _____» _____ 20 ___ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02.11 – Электроэнергетика и электротехника
код – наименование направления

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЬ ЖИДКОЙ СЕРДЦЕВИНЫ КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕГОСЯ СЛИТКА

Руководитель	_____	к.т.н. , доцент	С.П. Тимофеев
	подпись, дата	ученая степень, должность	инициалы, фамилия
Выпускник	_____	ФЭ 12-07Б, 071202402	М. Е. Чувашов
	подпись, дата	номер группы, зачетной книжки	инициалы, фамилия

Красноярск 2016

Продолжение титульного листа БР по теме «Электромагнитный перемешиватель жидкой сердцевины кристаллизующегося слитка»

Нормоконтролер _____ М.В. Первухин

подпись, дата инициалы, фамилия

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
1 Обзорная часть 5
1.1 Виды воздействия на жидкую среду металла 5
1.2 Обзор публикаций по устройствам электромагнитного перемешивания 12
1.2.1 Устройство для электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины слитка в кристаллизаторе 12
1.2.2 Способ для непрерывной и полунепрерывной разливки алюминиевых сплавов и устройство для его осуществления 18
1.2.3 Установка горизонтального непрерывного литья алюминия и его сплавов 30
2 Математическое моделирование 36
2.1 Разработка конструкции МГД – перемешивателя 36
2.2 Постановка электромагнитной задачи 36
2.3 Результаты математического моделирования в программном пакете “Ansys” 38
Заключение ..... **Ошибка! Закладка не определена.**
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 44
Приложение А 47

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений развития технологии производства металлов и сплавов является применение методов силового воздействия электромагнитным полем (ЭМП) на жидкометаллические рабочие среды. К настоящему времени эти методы реализованы в целом ряде устройств (электромагнитные перемешиватели, насосы, дозаторы), принцип действия которых основан на использовании сил, возникающих при взаимодействии бегущего электромагнитного поля создаваемого электромагнитами и проводящей среды. Перемешивание расплавленного металла является непременным звеном технологического процесса в металлургии.

Первые опыты по электромагнитному перемешиванию металла при непрерывной разливке были проведены еще в 50-е годы минувшего века. В настоящее время этот метод получил широкое распространение. ЭМП используется для решения двух задач:

1. Изменение внутреннего строения заготовки (измельчение структуры, снижение степени ликвации в средней и центральной частях, уменьшение центральной пористости).

2. Улучшение поверхности заготовки (снижение числа поверхностных дефектов, количества неметаллических включений в поверхностном слое, повышение толщины наружной плотной корочки).

Механизм воздействия на металл при решении первой задачи основан на снижении перегрева, обламывании ветвей дендритов и создании циркуляции металла в жидкой сердцевине. Решение второй задачи связано с созданием потоков на поверхности металла в кристаллизаторе и с улучшением условий выделения включений.

1 Обзорная часть

1.1 Виды воздействия на жидкую среду металла

В процессе производства крупных слитков для подавления и предотвращения дефектов получили распространение многочисленные технологические приемы, воздействующие на слиток в процессе затвердевания. В основу динамических методов положен принцип принудительного физического воздействия на жидкую фазу в ходе затвердевания. Эти приемы обычно обеспечивают активное воздействие не только на тепло- и массоперенос в жидкой фазе, но также существенно изменяют характер протекания процессов в двухфазной зоне.

Методы динамического воздействия на жидкую фазу расплава при его затвердевании, нашедшие практическое применение при производстве слитков и заготовок, по характеру физического воздействия можно условно разделить на две группы: методы электромагнитного и электрофизического воздействия и методы виброимпульсных воздействий.

Метод механического перемешивания. В жидкое ядро непрерывного слитка через мениск в кристаллизаторе вводится специальное устройство (активатор), которое вследствие вязкого трения при вращении приводит к микро- и макроперемещениям, турбулизации и развитию вихрей в расплаве. При этом интенсифицируется теплообмен и возрастает теплоотдача на границе затвердевания. Для улучшения сцепления с расплавом наружная поверхность активатора может иметь винтовые канавки, а торец выполняться с зубьями.

При применении интенсивного механического перемешивания расплава в лунке, возникает наряду с измельчением зерна, огрубление дендритной ячейки. В целях дальнейшего изучения влияния механического перемешивания на структуру и механические свойства алюминиевых сплавов предприняли попытку изменить конструкцию устройства для

перемешивания расплава в лунке слитка и исследовать влияние большой и малой интенсивности перемешивания расплава на структуру и свойства слитков.

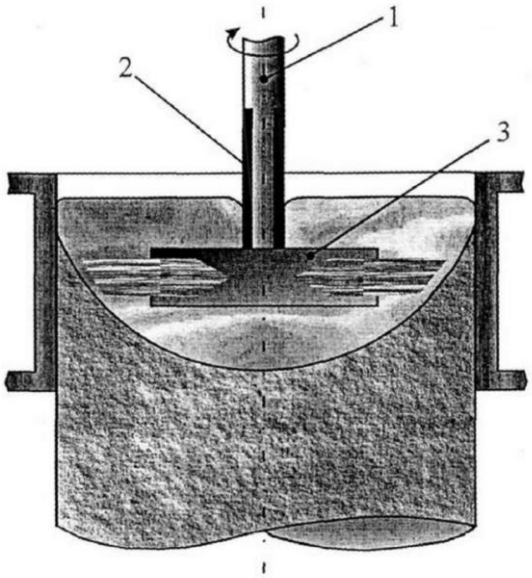


Рисунок 1.1 – Механическое перемешивание

Активатор для перемешивания расплава в лунке (рисунок 1.1) состоит из навинченного на вертикальный приводной вал 1 стержня *3*, изготовленного из титанового сплава ВТ1-0. Стержень выполнен со скошенными концами, образующими закругленные цилиндрические лопасти. На поверхность стержня напыляли слой окиси циркония толщиной 0,4 мм, предотвращающий химическое воздействие стержня с расплавом. Аналогичную роль играла корундовая втулка 2, закрепленная на вертикальном валу.

При механическом перемешивании происходит однонаправленное движение жидкого металла, что вызывает неоднородность по химическому составу и физическим свойствам в ряде случаев. При перемешивании расплава в лунке слитков с малым диаметром, с различными скоростями, пластические свойства слитков не изменяются, а свойства слитков диаметром выше 600 мм возрастают. Этот факт свидетельствует о

целесообразности применении данного способа при литье крупных слитков. Однако при этом способе перемешивания есть вероятность попадания обрывков окисной пленки в слиток, что снижает выход годного металла. В связи с этим данный способ не получил широкого применения.

Вибрационные и ультразвуковые виды перемешивания не имеют этих недостатков, однако, по сравнению с электромагнитным перемешиванием, они не обладают комплексностью воздействия на жидкий металл, т.е. не являются универсальными.

Метод электромагнитного перемешивания. Электромагнитное перемешивание получило широкое распространение для повышения качества непрерывнолитых заготовок. Эффект перемешивания в этом случае достигается посредством наложения на расплав электромагнитного поля. При этом, регулируя параметры тока, подаваемого на расположенные у поверхности заготовки катушки, можно получить различную скорость и направление движения потоков жидкой стали.

Под действием потоков металла происходит подплавление верхушек дендритов или просто их обрушение. В свою очередь, обломки дендритов, становясь дополнительными центрами кристаллизации, увеличивают зону равноосных кристаллов. Следовательно, принудительное перемешивание может остановить процесс роста зоны столбчатых кристаллов и способствовать началу образования зоны равноосных кристаллов. Помимо этого, перемешивание жидкого металла вблизи затвердевающей корочки отливаемой заготовки обеспечивает усреднение температуры и химического состава кристаллизующегося металла, что является эффективным средством снижения осевой зональной ликвации.

Турбулентное движение расплава, развивающееся при электромагнитном перемешивании, уменьшает тенденцию к осаждению на межфазной поверхности раздела уже существующих в стали оксидных включений; кроме того, отмечается их принудительная транспортировка к мениску, где они переходят в защитный шлаковый слой. Направленный

поток также обеспечивает размывание локальных объемов обогащенных ликватами зон расплава. Формирующиеся в подобных условиях сульфиды мельче и более равномерно распределены в осевой зоне кристаллизующейся заготовки.

Между тем, применение метода электромагнитного перемешивания для управления качеством крупных слитков и отливок представляется весьма проблематичным, поскольку по мере увеличения сечения заготовок существенно возрастают проблемы с обеспечением равномерного проникновения поля по всему сечению жидкой фазы.

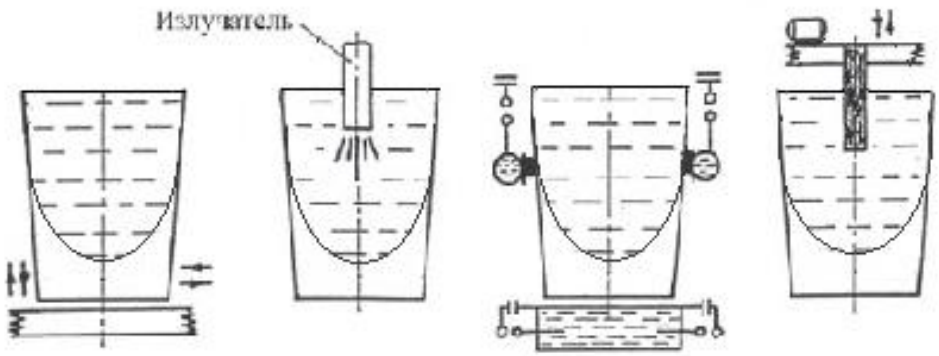
Электрофизические воздействия обладают большими потенциальными возможностями вследствие существенного влияния на структурно-чувствительные свойства, процессы кристаллизации и тепловые аспекты формирования литого металла. При наложении электростатического поля определенной напряженности удается уменьшить межфазное натяжение в расплаве, критический радиус зародыша и работу его образования, что способствует измельчению структуры слитка и повышению скорости кристаллизации. Экспериментальные исследования показали, что в заготовках, полученных в условиях электрофизического воздействия, улучшаются структура и механические свойства, сокращается газовая пористость, уменьшается содержание неметаллических включений при их более равномерном распределении.

Метод вибрационной обработки. Вибрационная обработка обеспечивает измельчение литой структуры, изменяет форму и глубину проникновения усадочной раковины, а также благоприятствует улучшению абсолютных показателей механических свойств (твердость, предел текучести и прочности, относительное удлинение и т.д.) при повышении физической и химической однородности. Достижение определенных положительных эффектов обычно связывается с проявлением в ходе вибрационной обработки различного рода физических эффектов: кавитационных явлений, волновых процессов на поверхности расплава, эффектов развития неустойчивости

термогравитационных потоков и формирования зон с направленным принудительным перемешиванием жидкой фазы, эффектом зарождения и роста в расплаве частиц твердой фазы и пр.

Как видно из рис.1.2, идея наложения на расплав виброимпульсного воздействия может быть реализована различными способами. Выбор способа наложения воздействия, видимо, во многом определяется спецификой каждого конкретного объекта, а также целями, которые решаются в ходе обработки. В общем случае виброимпульсное воздействие может прикладываться либо к изложнице, либо непосредственно вводиться в расплав с помощью специальных приспособлений.

Приложение виброимпульсного воздействия непосредственно к литейной форме (рис.1.2, а) представляет весьма значительный практический интерес, поскольку в этом случае оказывается возможной одновременная обработка нескольких слитков любого размера и массы. Вместе с тем, интенсивность обработки в этом случае может иметь определенные ограничения, которые связаны с устойчивостью изложниц на виброплатформе.



а б в г

Рисунок 1.2 – Основные способы виброимпульсной обработки затвердевающего металла

Метод ультразвуковой обработки. Акустические и ультразвуковые методы воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл (рис.1.2, б) получили достаточно широкое распространение в металлургии цветных и

специальных сплавов. Благодаря высокой интенсивности, ультразвуковое воздействие оказывает влияние на протекание тепломассообменных процессов в жидкостях и газах, на структуру твердых тел и процессы контактного взаимодействия. Основные положительные эффекты, достигаемые при такой обработке следует связывать с эффектом интенсивного развития процессов кавитации. Вместе с тем, нельзя не отметить, что использование ультразвуковой обработки представляется весьма проблематичным для промышленных слитков большой массы. Это объясняется тем фактом, что эффект ультразвуковой обработки расплава проявляется в весьма ограниченном объеме, прилегающем непосредственно к источнику колебаний.

Метод электрогидроимпульсной обработки. Электрогидроимпульсная обработка (рис.1.2, в) показала достаточно высокую эффективность в условиях металлургического производства. Идея этого метода заключается в наложении короткоимпульсных воздействий большой мощности на затвердевающий слиток. При этом в ходе прохождения импульса формируется широкий спектр частот колебаний. Между тем, электрогидроимпульсная обработка обладает рядом особенностей, затрудняющих эффективную техническую реализацию метода в промышленности. В первую очередь, это относится к тому факту, что амплитуда колебаний выходных звеньев обычно невелика (порядка десятых долей миллиметра), а эффект такой обработки зависит от качества контакта рабочего органа с обрабатываемой поверхностью. По существу высокий положительный эффект обработки достигается только при условии так называемого «безотрывного контактирования », выполнение которого в случае воздействия на слитки представляется крайне затруднительным. Кроме того, использование системы боковых разрядных устройств в системе «стенка изложницы - нарастающая оболочка – расплав» связано с высокими потерями механической энергии через формирующуюся оболочку и через стенку изложницы, а также с сужением спектра генерируемых частот.

Обработка расплава погружаемым колеблющимся стержнем (рис.1.2, г) с частотой 0,2-3,0 Гц обеспечивает, главным образом, интенсификацию процесса зародыша-образования. Зарождение кристаллов начинается симметрично от источника колебаний в областях, прилегающих одновременно к затвердевающей корочке и свободной поверхности расплава. Процесс носит лавинообразный характер, и мелкодисперсные кристаллы заполняют все пространство, окружающее вибрирующий стержень. По ходу обработки частицы твердой фазы оседают с малой скоростью в донную часть слитка. Исследования, выполненные на промышленных (6 т) стальных слитках, свидетельствуют о более мелкозернистой структуре слитка в равноосной зоне при уменьшении протяженности зоны столбчатых кристаллов. При этом значительного изменения распределения ликвирующих элементов в опытных слитках не наблюдали.

Принципиальная схема метода пульсационной обработки жидкой сердцевины слитка включает в себя периодическое заполнение и вытеснение металла из погружаемой в расплав огнеупорной трубы. Колебания уровня металла в трубе достигаются путем определенного изменения давления газа в ее внутренней полости. При обработке жидкой фазы слитков огнеупорную трубу располагают в центральной части прибыли. Направленное циклическое движение вытесняемой струи металла существенно изменяет направление и скорость движения потоков в жидкой ванне. Кроме того, в ходе обработки на расплав накладываются колебания достаточно высокой интенсивности, что обеспечивает развития кавитационных эффектов, которые сопутствуют ранее рассмотренным методам виброимпульсных воздействий. В отличие от всех ранее рассмотренных методов пульсационное воздействие обеспечивает управление расположением внецентренной ликвации в слитке.

В целом методы динамических воздействий обеспечивают разносторонние качественные эффекты, что делает их более предпочтительными с точки зрения кардинального повышения качества слитков и заготовок. Особенно высокая эффективность динамических

воздействий достигается в случае наложения на расплав вибрационных импульсов в совокупности с регламентированным принудительным перемешиванием.

Из анализа методов физического воздействия на жидкий металл слитка при его кристаллизации сделан вывод, что электромагнитный метод перемешивания жидкой сердцевины имеет преимущества перед другими методами воздействия. Среди электромагнитных способов, индукционный способ является более удобным и надежным по сравнению с кондукционным, так как в нем отсутствует непосредственный контакт между индуктором и слитком. Форма и длина жидкой сердцевины алюминиевых слитков существенно отличается от жидкой сердцевины при литье стальных заготовок в машинах непрерывного литья. Для осуществления перемешивания при литье алюминиевых слитков индуктор перемешивателя необходимо располагать в непосредственной близости от кристаллизатора. При этом перемешивание необходимо осуществлять при условии, что окисная пленка на поверхности расплава остается неразрывной.

1.2 Обзор публикаций по устройствам электромагнитного перемешивания

1.2.1 Устройство для электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины слитка в кристаллизаторе

Устройство содержит магнитопровод в виде ферромагнитной части кристаллизатора с многофазной обмоткой. С верхней и нижней сторон кристаллизатора расположены по две катушки, выполненные концентрическими и подключенные к разным фазам. Две катушки, расположенные по разные стороны кристаллизатора симметрично относительно аксиальной оси слитка, подключены к одной фазе встречно, а две другие подключены к другой фазе согласно. Катушки, находящиеся по

одну сторону кристаллизатора, могут быть размещены таким образом, что одна охватывает другую или одна над другой.

В основу устройства положена задача создания устройства для электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины слитка с улучшенными энергетическими и технологическими показателями, имеющего высокую надежность при работе в высокотемпературных средах, а также которое позволило бы осуществлять перемешивание расплава и в горизонтальной, и в вертикальной плоскостях одновременно.

В устройстве для электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины слитка в кристаллизаторе, содержащем магнитопровод с многофазной обмоткой, катушки которой выполнены концентрическими и питаются от разных фаз, согласно изобретению в качестве магнитопровода использована ферромагнитная часть кристаллизатора, с верхней и нижней сторон которого расположены по две катушки, причем две катушки, расположенные по разные стороны кристаллизатора симметрично относительно аксиальной оси слитка, подключены к одной фазе встречно, а две другие катушки подключены к другой фазе согласно. При этом катушки, расположенные по одну сторону кристаллизатора, могут быть размещены таким образом, что одна охватывает другую или одна над другой.

На рис. 1.3 изображено устройство для электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины слитка в кристаллизаторе, где катушки, находящиеся по одну сторону кристаллизатора, размещены таким образом, что одна охватывает другую; на рис.1.4 - то же, вид в аксонометрии с разрезом; на рис.1.5 изображено предлагаемое устройство, где катушки, находящиеся по одну сторону кристаллизатора, размещены одна над другой; на рис. 1.6 и 1.7 представлены картины электромагнитного поля для различных вариантов размещения обмоток.

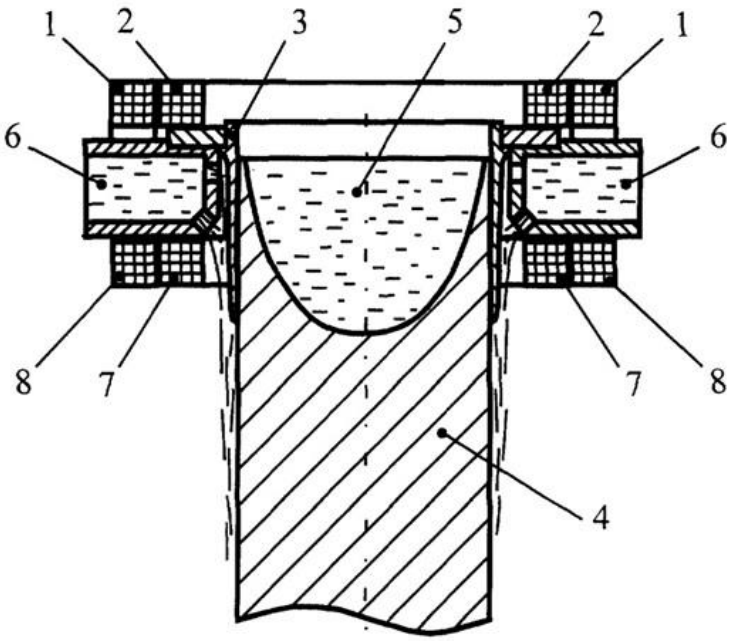


Рисунок 1.3 – Устройство для электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины слитка в кристаллизаторе (одна катушка охватывает другую)

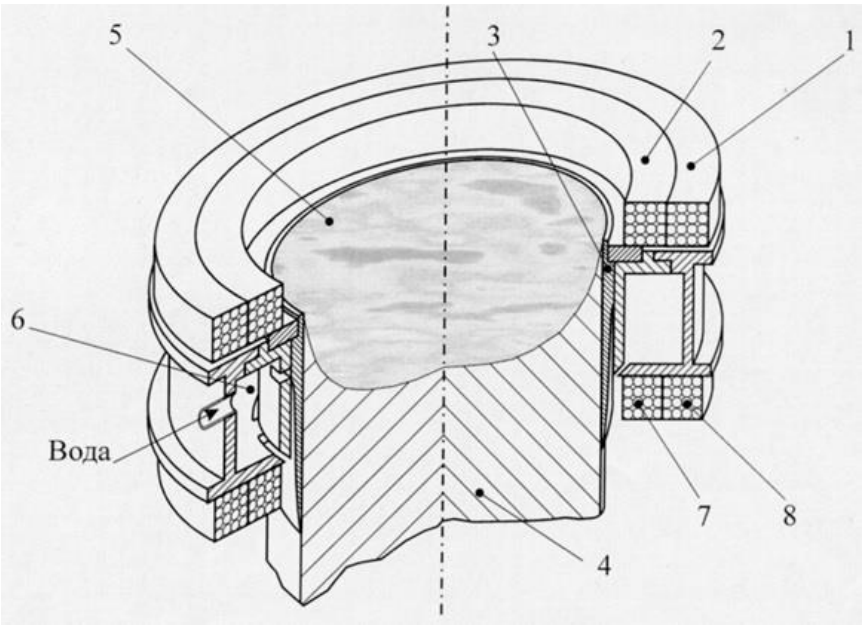


Рисунок 1.4 – Аксонометрический вид устройства

Устройство для электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины слитка в кристаллизаторе содержит катушки 1, 2, расположенные с верхней стороны кристаллизатора 3, являющегося магнитопроводом, который охватывает слиток 4 с жидкой фазой 5. К кристаллизатору 3 подведена вода 6 для охлаждения. С нижней стороны

кристаллизатора 3 расположены катушки 7, 8. При этом две катушки, расположенные по разные стороны от кристаллизатора, например 2 и 7, включены согласно, а две другие (1 и 8) включены встречно или наоборот.

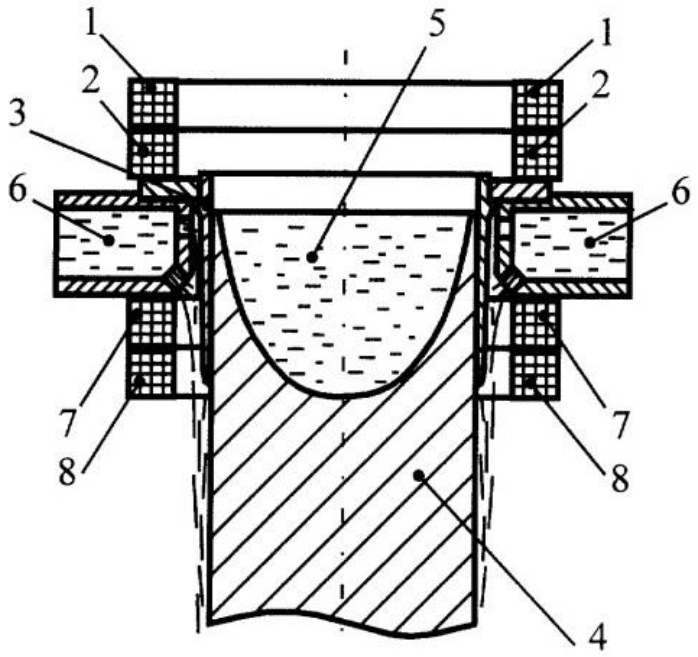


Рисунок 1.5 – Устройство для электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины слитка в кристаллизаторе (катушка размещена одна над другой)

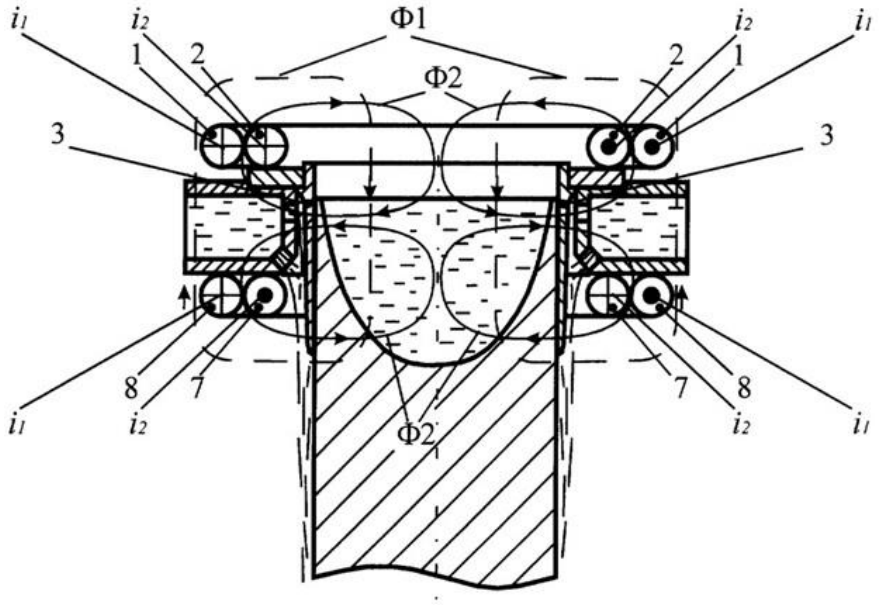


Рисунок 1.6 – Принцип работы устройства (одна катушка охватывает другую)

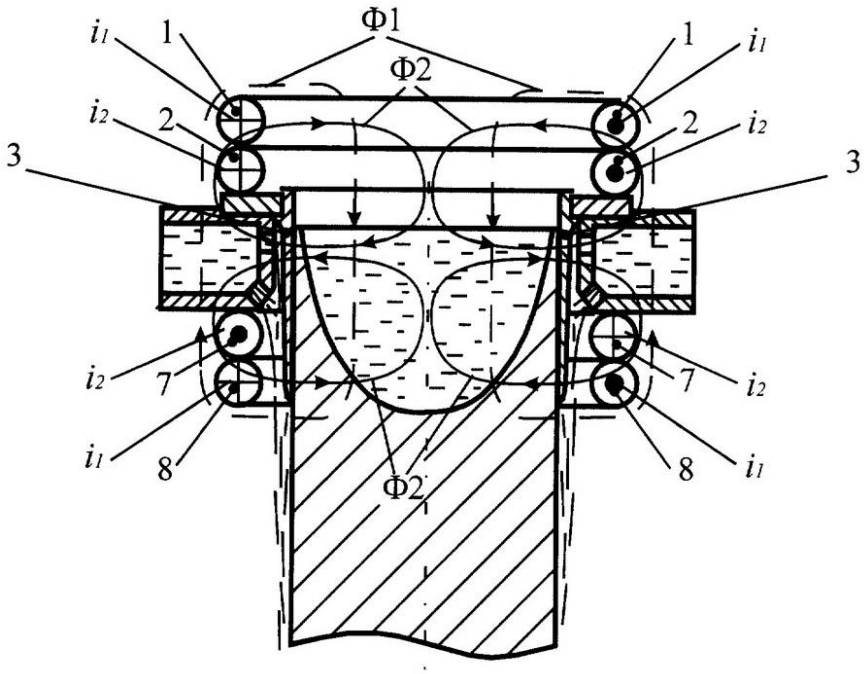


Рисунок 1.7 – Принцип работы устройства (катушка размещена одна над другой)

Устройство работает следующим образом:

При подключении обмотки устройства к двухфазному напряжению со сдвигом фаз 90 электрических градусов в катушках 1 и 8 протекает электрический ток i_1, а в катушках 2 и 7 протекает ток i_2 (рис.6). Катушки, по которым протекает ток i_1, создают магнитный поток $Ф_1$ показанный на рис.6 пунктирными линиями. Катушки с током i_2 создают магнитный поток $Ф_2$ показанный на рис.6 сплошными линиями. В результате наложения магнитных потоков $Ф_1$ и $Ф_2$, которые в области жидкой фазы кристаллизующегося слитка смещены в пространстве на угол 90° или близкий к нему, и учитывая то, что фазовый сдвиг магнитных потоков $Ф_1$ и $Ф_2$ равен 90 электрических градусов, в области жидкой фазы слитка образуются вращающиеся магнитные поля, ось вращения одного из которых находится в левой полуплоскости слитка, а другая - в правой полуплоскости. Аналогично образуются магнитные потоки в варианте расположения катушек одна над другой при подключении катушек 1 и 8 к одной фазе, 2 и 7 к другой (рис. 1.7).

Под действием вращающихся магнитных полей в жидкой фазе кристаллизующегося слитка индуктируются вихревые токи, которые, взаимодействуя с первичным магнитным полем, вызывают усилия в жидком металле, приводящие последний в многопрофильное вращательное движение. Разностороннее вращательное движение жидкого металла в слитке может осуществляться непрерывно, или периодически в одном и том же направлении, или периодически в прямом и обратном направлениях за счет изменения направления вращения электромагнитного поля. Такое движение жидкого металла позволяет эффективно воздействовать на дендритную структуру кристаллизующегося слитка или заготовки, что способствует изменению зерна последнего и увеличению выхода годного. Кроме того, улучшенный тепломассообмен между низкотемпературной зоной, расположенной у стенок кристаллизатора, и высокотемпературной осевой зоной слитка ускоряет процесс кристаллизации и затвердевания и, как следствие, увеличивает скорость вытягивания слитка или заготовок.

Достоинства:

– простота конструктивного исполнения устройства при работе в агрессивной высокотемпературной среде, которая образуется в зоне литья и охлаждения слитка, обеспечивает его высокую надежность и долговечность;

– устройство обладает высокой ремонтопригодностью, не требующей демонтажа основных узлов литейной машины, просто в обслуживании;

– комплексное многопрофильное перемешивание расплава в горизонтальной и вертикальной плоскостях одновременно обеспечивает однородность структуры слитка или заготовки по химическому составу и физическим свойствам;

– при установке устройства на действующее литейное оборудование не требуется капитальная переделка последнего;

– интенсивное охлаждение жидкой фазы при кристаллизации достигается за счет сужения переходной зоны между расплавом и фронтом кристаллизации.

1.2.2 Способ для непрерывной и полунепрерывной разливки алюминиевых сплавов и устройство для его осуществления

Устройство для непрерывной или полунепрерывной разливки алюминиевых сплавов, содержащее кристаллизатор, открытый на обоих концах в направлении разливки, средства для подачи расплава в кристаллизатор, по меньшей мере, два электромагнитных индуктора, выполненные с возможностью индуцирования перемешивающего движения в расплаве, причем указанные индукторы установлены преимущественно симметрично друг к другу относительно вертикальной плоскости симметрии слитка, отличающееся тем, что каждый индуктор выполнен с возможностью создания, по меньшей мере, двух электромагнитных полей на различных частотах, бегущих в противоположных направлениях вдоль направления вытягивания слитка, а зона действия полей охватывает всю жидкую сердцевину.

В основу настоящего изобретения положена задача гибкого управления скоростью перемешивания, структурой потоков и турбулизированностью по всему объему жидкой сердцевины кристаллизующегося алюминиевого сляба.

В операциях непрерывной разливки стали устоялась практика перемешивания жидкой стали в области кристаллизатора устройства непрерывной разливки стали и области жидкой сердцевины стального слитка с помощью прикладываемого извне низкочастотного электромагнитного поля переменного тока. В настоящее время, согласно патенту FR 03 12555 (RU2357833 и FR 02 12706 (RU 2325245), для литья стальных слитков - слябов, используют одну или более пару индукторов, расположенных в различных зонах по всей длине жидкой сердцевины стального слитка,

достигающей в длину нескольких метров, где каждый индуктор может индуцировать переменное электромагнитное поле на разной частоте, в соответствии с необходимым воздействием на металл. При этом, достигается выравнивание химического состава по всему объему жидкого металла и увеличение теплообмена в области кристаллизации, что приводит к образованию более качественной и однородной структуры получаемого слитка. Также, для обеспечения стабильности свободной поверхности расплава, обычно именуемой мениском, используются индукторы, создающие постоянное или переменное магнитное поле в области разливочного стакана. Однако, при непрерывном литье стального слитка, глубина жидкой сердцевины D много больше ширины слитка A и может составляет для слитков сечением 2000 мм x 600 мм более 10 метров. Кроме того, при организации перемешивающего воздействия в жидкой сердцевине стального слитка, в основном, стараются организовать вращательное движение жидкого металла вокруг направления вытягивания слитка или в плоскости перпендикулярной направлению вытягивания, что обусловлено в основном значительным превышением глубины жидкой сердцевиной D над шириной слитка A, а также изогнутой по радиусу формой слитка, из-за чего организация симметричной циркуляции металла по схеме «двойная петля» крайне затруднительна.

Использование переменного магнитного поля одной частоты, не позволяет гибко управлять структурой потоков в жидкой сердцевине. То есть, конечно, возможно управление направлением вращения вихрей за счет реверса направления движения магнитного поля, либо смещение месторасположения основных вихрей за счет величины магнитного поля и его частоты, однако в целом, на сегодняшний день для слябов не предложены способы и устройства способные организовать гибкое управление структурой гидродинамического поля таким образом, что бы скользящее магнитное поле одной частоты, действующее вдоль всей области жидкой сердцевины D, создавало бы принципиально различные течения в жидкой

сердцевине, например, могло создать течение не только в форме одинарной, двойной петли или одного вихря, но и создавать большую совокупность сильно турбулизованных течений с гибким управлением количеством вихрей и их месторасположением .

Кроме недостатка в ограниченности управления структурой и турбулизированностью потоков, переменное магнитное поле одной частоты, обычно создается с целью эффективного создания основных потоков в расплаве жидкой сердцевины и не учитывает возможность механического резонанса колебаний жидкости.

Тем не менее, известно, что если прикладывать к телу или объему жидкости усилия на частоте собственных колебаний, то колебания в теле или объеме жидкости сильно увеличиваются и механическая система становиться особенно восприимчива к воздействию силы на такой частоте. При этом для объема жидкости, находящегося под действием силы, воздействующей с резонансной частотой, характерно не только то, что скорость течений в объеме жидкости увеличивается с минимальными затратами энергии, но и то что возрастает пульсационная составляющая колебаний, которая приводит к увеличению колебаний турбулентных пульсаций и как следствие к возрастанию доли турбулентного движения.

Однако, при использовании многочастотного электромагнитного поля возможно организовать эффективное перемешивание во всех жидких сердцевинах всех слоев слитка. Существенной проблемой литья крупногабаритных алюминиевых слитков является проблема различия структуры слитка в начале и конце слитка, возникающая главным образом из-за того, что условия кристаллизации в начале процесса литья, когда поддон находиться в кристаллизаторе и начинает двигаться вниз и в конце процесса литья, когда процесс литья можно считать установившимся, слишком различны.

Действительно, в начале процесса литья, толщина твердой корочки металла с боковой поверхности слитка небольшая и жидкая сердцевина

отделена от поддона небольшой толщиной твердого металла, что предопределяет особенный тепловой режим кристаллизации в этот период, где теплоотвод через поддон может превалировать либо быть сравнимым с теплопередачей через боковые поверхности слитка. Напротив, в ходе дальнейшего процесса литья форма жидкой сердцевины удлиняется, толщина твердого алюминия между жидкой сердцевиной и поддоном увеличивается, что приводит к превалированию теплоотвода через боковые стенки слитка над теплоотводом через низ слитка.

Задачей заявляемого технического решения является возможность гибкого управления скоростью перемешивания, структурой потоков и турбулизированностью по всему объему жидкой сердцевины кристаллизующегося алюминиевого сляба.

Поставленная техническая задача решается тем, что устройство для непрерывной или полунепрерывной разливки алюминиевых сплавов, содержащее кристаллизатор, открытый на обоих концах в направлении разливки, средства для подачи расплава в кристаллизатор, по меньшей мере, два электромагнитных индуктора, выполненные с возможностью индуцирования перемешивающего движения в расплаве, причем указанные индукторы установлены преимущественно симметрично друг к другу относительно вертикальной плоскости симметрии слитка, в котором каждый индуктор выполнен с возможностью создания, по меньшей мере, двух электромагнитных полей, бегущих в противоположных направлениях вдоль направления вытягивания слитка, а зона действия полей охватывает всю жидкую сердцевину.

Кроме того, индуктор выполнен с возможностью генерирования, по меньшей мере, частоты одного из указанных бегущих электромагнитных полей, близкой или совпадающей с собственной резонансной частотой механических колебаний объема жидкой сердцевины. Кроме того, индуктор выполнен с возможностью создания, по меньшей мере, бегущего электромагнитного поля с возрастанием по глубине жидкой сердцевины D по

мере удаления от кристаллизатора к дну сердцевины. Индуктор выполнен с возможностью генерирования, по меньшей мере, одного электромагнитного поля с убывающей частотой по глубине жидкой сердцевины D по мере удаления от кристаллизатора к дну сердцевины. Частота генерируемых индукторами электромагнитных полей не превышает 6 Гц. Направления движения бегущих электромагнитных полей, индуцированных одним индуктором, совпадают. Индукторы генерируют бегущие электромагнитные поля, которые симметричны относительно оси слитка.

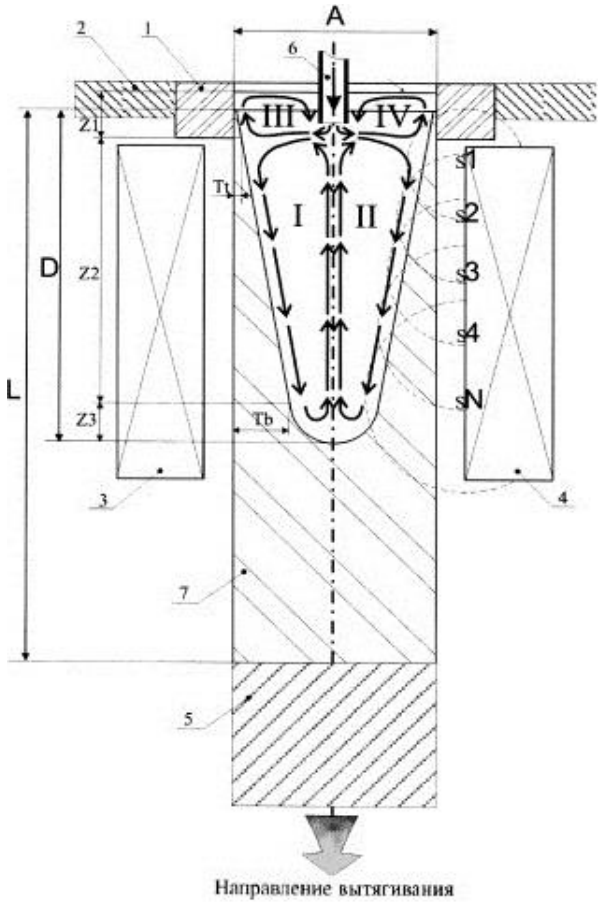


Рисунок 1.8 – Устройство для непрерывной и полунепрерывной разливки сплавов

Устройство для непрерывной или полунепрерывной разливки алюминиевых сплавов (рис. 1.8) содержит кристаллизатор 1, открытый на обоих концах в направлении разливки, средство для подачи расплава в кристаллизатор 6, по меньшей мере, два электромагнитных индуктора 3,4, выполненные с возможностью индуцирования перемешивающего движения

в расплаве, причем указанные индукторы 3,4 установлены преимущественно симметрично друг к другу относительно вертикальной плоскости симметрии слитка, для регулирования положения индукторов 3 и 4 установка снабжена устройством, позволяющим перемещать их и позиционировать относительно слитка и кристаллизатора в любом допустимом положении, каждый индуктор 3 и 4 выполнен с возможностью создания, по меньшей мере, двух электромагнитных полей, бегущих в противоположных направлениях вдоль направления вытягивания слитка, зона действия полей охватывает всю жидкую сердцевину, поддон 5 и слиток 7, литейный стол 2.

На рис. 1.9 показаны дополнительно установленные индукторы 8, 9.

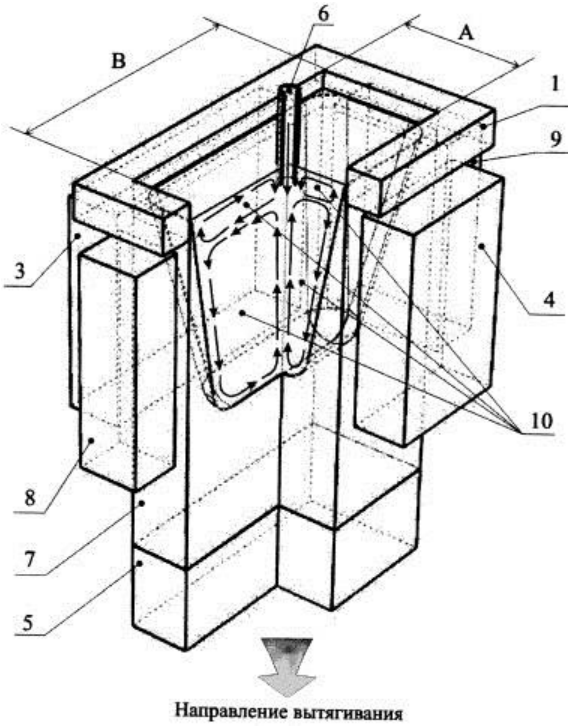


Рисунок 1.9 – Установка индукторов в трёхмерном пространстве

Расплавленный металл, согласно рис.1.8 и рис.1.9, подают в зону жидкого расплава в, по меньшей мере, один кристаллизатор 1, который открыт на обоих концах в направлении разливки, через как минимум одно средство 6, погруженное в расплав, либо, по меньшей мере, одну струю металла. В процессе опускания поддона 5 и охлаждения расплавленного металла путем теплопередачи через стенки кристаллизатора, боковые стенки

слитка 7 и материал поддона, происходит кристаллизация слитка с образованием его формы и формирование его жидкой сердцевины. Поддон 5, снабжен, по меньшей мере, одним источником пульсирующего и бегущего магнитного поля, который размещен в нем или непосредственно под ним (не показан), благодаря чему, на начальном этапе процесса литья и формирования слитка происходит перемешивание жидкой сердцевины. Поддон 5 установлен и прикреплен к платформе, которая движется вниз под действием механизма ее опускания, например гидроцилиндром, либо приводиться в движение вниз под действием электромагнитных сил, например под действием, бегущего электромагнитного поля. На противоположных сторонах отливаемого слитка 7 установлена, по меньшей мере, одна пара индукторов переменного электромагнитного поля 3 и 4 (8 и 9), которые установлены преимущественно симметрично относительно вертикальной плоскости симметрии на противоположных сторонах слитка и перемешивают жидкую сердцевину согласно траекториям 10 (рис.1.9).

Индукторы переменного электромагнитного поля 3 и 4, а также индуктор, установленный в поддоне 5, в контексте настоящего изобретения, представляют собой совокупность элементарных источников переменного магнитного поля и конструктивно могут быть выполнены как линейные индукционные машины, либо как совокупность перемещающихся или вращающихся постоянных магнитов. В процессе литья слитка, вначале процесса, используют переменное поле создаваемое индуктором, установленном в поддоне или под поддоном 5 согласно рис. 1.10. Это переменное поле обеспечивает эффективное перемешивание металла в формирующейся жидкой сердцевине на начальном этапе литья.

При этом, используя различный порядок включения источников переменного электромагнитного поля в индукторе - S_l, S_2...S_n, организуются требуемые бегущие и пульсирующие магнитные поля

На рис. 1.10 изображено воздействие индуктора установленного в поддоне на жидкую сердцевину в процессе литья на начальном этапе

формирования слитка. Бегущее электромагнитное поле генерируется последовательным включением источников магнитного поля S_1, S_2...S_n. Также, показано позонное включение боковых индукторов, начиная с зоны— Zone 1 до Zone N, по мере увеличения слитка.

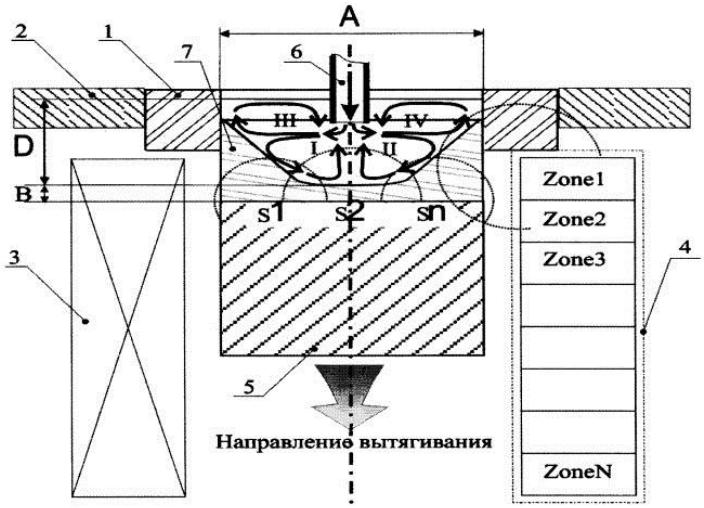


Рисунок 1.10 – Установка с дополнительным индуктором в поддоне

На рис. 1.11 показана в качестве примера, возможная схема установки индукторов относительно нескольких слитков, отливаемых одновременно.

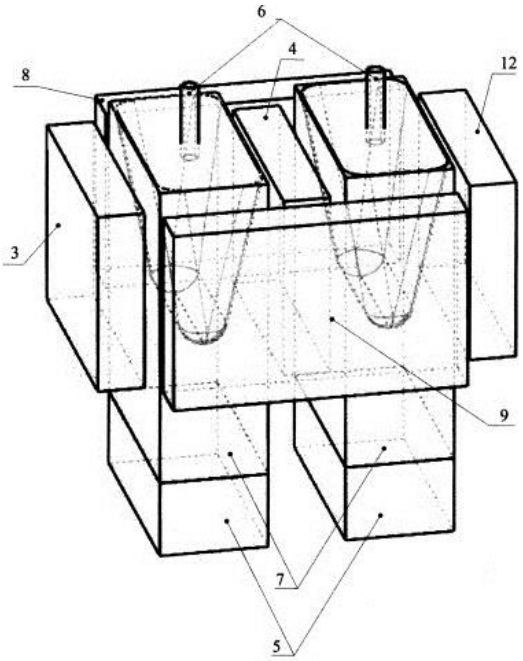


Рисунок 1.11 – Схема установки индукторов относительно нескольких слитков

На рис. 1.12 схематично показано расположение интегральных сил F_1 и F_2 в жидкой сердцевине, которые генерируют на различной частоте бегущие электромагнитные поля Field l и Field 2 соответственно.

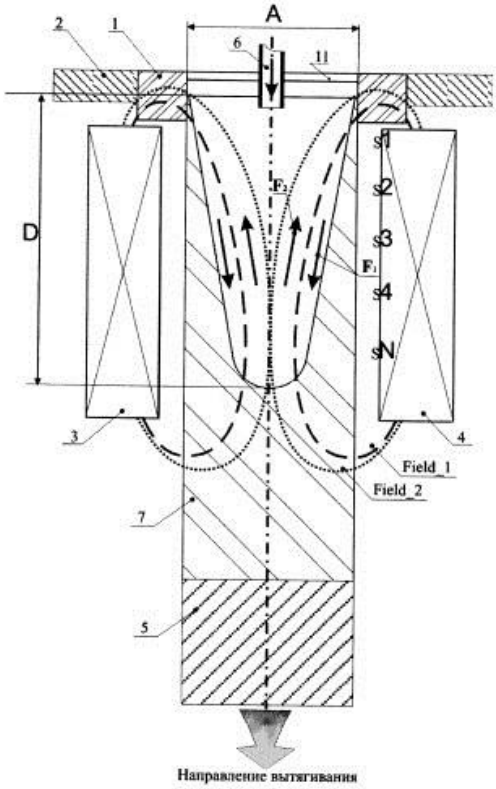


Рисунок 1.12 – Схема расположения интегральных сил в жидкой сердцевине

По мере формирования слитка, включается как минимум одна пара индукторов 3 и 4, которые создают переменное бегущее (скользящее) магнитное поле вдоль направления вытягивания слитка. Генерируемое индукторами магнитное поле действует на жидкую сердцевину по всей ее высоте D. При этом, индукторы 3 и 4, согласно рис. 1.10, могут включаться по зонам - Zone 1, Zone 2... Zone N, или быть выполнены из частей и включаться по мере литья слитка и увеличения жидкой сердцевины.

В результате воздействия переменного электромагнитного поля в расплавленном металле возникают вихревые токи и как следствие поле сил Ампера, которые приводят в движение жидкий металл.

Электромагнитное поле, генерируемое каждым индуктором, обладает следующими особенностями (признаками), которые реализуются одновременно или раздельно:

1) Магнитуда индукции магнитного поля возрастает по глубине жидкой сердцевины D по мере удаления от кристаллизатора к дну сердцевины. Зависимость возрастания магнитной индукции от расстояния может быть пропорциональной, степенной или экспоненциальной;

2) В составе поля присутствует, по меньшей мере, одна частота;

3) В составе поля присутствует, по меньшей мере, одна собственная резонансная частота колебаний жидкой сердцевины слитка или близкая к ней;

4) В составе поля присутствует, по меньшей мере, одна собственная резонансная частота колебаний, присущая границе кристаллизации или близкая к ней;

5) В составе поля присутствует, по меньшей мере, одна собственная резонансная частота колебаний, присущая твердому слитку или близкая к ней;

6) Частота колебаний электромагнитного поля убывает по глубине жидкой сердцевины D по мере удаления от кристаллизатора к дну сердцевины. Зависимость возрастания магнитной индукции от расстояния может быть линейной, степенной или экспоненциальной.

Реализация указанных выше особенностей электромагнитного поля может быть достигнута следующими допустимыми техническими решениями:

1) Использованием двух- или многофазной линейной индукционной машины, обмотки которой подключены к двух или многофазному одночастотному источнику питания, таким образом, что на одном конце машины генерируется переменное электромагнитное поле меньшей величины, чем на другом конце и генерируемое поле возрастает от одного конца машины к другому.

2) Использованием двух или многофазной линейной индукционной машины, обмотки которой подключены к двух или многофазному многочастотному источнику питания, таким образом, что по мере удаления катушек от кристаллизатора вниз вдоль слитка, частота пульсации тока или напряжения в них уменьшается.

3) Использованием двух- или многофазной линейной индукционной машины, заведомо выполненной конструктивно несимметричной, таким образом, что при подключении катушек к двух или многофазному одночастотному источнику питания, вдоль машины генерируется возрастающее от одного края к другому электромагнитное поле. Простейшими примерами такого заведомо не симметричного индуктора может являться индуктор, у которого, по мере удаления катушек от кристаллизатора вниз вдоль слитка, количество витков в катушках возрастает либо увеличивается полюсный шаг.

4) Вращением постоянных магнитов расположенных в ряд вдоль слитка. При этом величина магнитного поля постоянных магнитов увеличивается от кристаллизатора по мере удаления от кристаллизатора к дну сердцевины. Также, одновременно или раздельно с этим, частота вращения постоянных магнитов может уменьшаться от кристаллизатора по мере удаления от кристаллизатора к дну сердцевины.

Создание и управление вихревой структурой потоков за счет использования как минимум двух бегущих полей, возможно, с использованием двух принципов указанных ниже.

Согласно первому способу - «принципу противоположных полей» используется наложение как минимум двух противоположно бегущих электромагнитных полей генерируемых одним индуктором на разной частоте, за счет чего образуются вихревые гидродинамические течения. Благодаря различной частоте каждого поля, глубина проникновения каждого поля различна, что позволяет получить результирующую силу для каждого поля расположенную на различном расстоянии от границы кристаллизации,

но при этом располагающейся на одном горизонтальном уровне жидкой сердцевины.

Таким образом, возможно получение как минимум одной пары сил от как минимум двух разночастотных полей, что позволяет создавать в расплаве вихревое движение.

Конфигурация потоков расплавленного металла в жидкой сердцевине, при естественной конвекции, для большинства типов отливаемых алюминиевых прямоугольных слитков, обычно устанавливаться в режим «одинарной петли» или «двойной петли» с наличием в вертикальной плоскости симметрии слитка двух основных вихрей I и II (рис. 1.8), образующих основную «одинарную петлю» и двух второстепенных верхних вихрей - III и IV (рис. 1.8), которые в совокупности с «одинарной петлей» образуют циркуляцию расплава по схеме «двойной петли». В зависимости от глубины погружения средства разливки металла и скорости его подачи, возможно установление режима циркуляции металла как в режиме «двойной петли», так и в режиме «одинарной петли». Однако, несмотря на различное количество вихрей в обеих схемах циркуляции, основную роль в тепломассообмене играют два нижних вихря образующих «одинарную петлю».

Благодаря наложению, по меньшей мере двух взаимно противоположных бегущих полей создаваемым одним индуктором на различных частотах - Field l и Field 2 (рис. 1.12), в различных слоях по вертикали создаются различные силы F_1 и F_2, которые создают вращающий момент и способствуют вертикальному расщеплению по меньшей мере двух основных вихрей I и II (рис. 1.8) и увеличению количества вихрей по ширине слитка. В случае увеличения количества разночастотных бегущих полей количество вихрей увеличивается соответственно.

Предлагаемое устройство имеет следующие преимущества перед известными:

– перемешивание расплава по всему объему жидкой сердцевины симметричной структурой потоков относительно вертикальной плоскости симметрии слитка, что обеспечивает симметричные условия кристаллизации и отсутствие механических деформаций слитка вызванных асимметрией температурных напряжений в слитке;

– возможность организовать различные по количеству контуров и структуре циркуляционные потоки в жидкой сердцевине за счет многочастотного электромагнитного поля и использования резонансных частот, что позволяет гибко управлять турбулентным движением в жидкой сердцевине.

– простота конструктивного решения, обеспечивающая возможность перемешивания жидкой сердцевины при различной толщине слитка за счет увеличения или уменьшения расстояния между индукторами находящихся по обе стороны от плоскости симметрии слитка;

– снижение энергоемкости перемешивания за счет использования резонансных частот.

Способ для непрерывной и полунепрерывной разливки алюминиевых сплавов и устройство для его осуществления может быть использован для улучшения технологических характеристик получаемого слитка алюминия и ускорения процесса затвердевания расплава путем интенсивного перемешивания расплава во всем объеме жидкой сердцевины и осуществления непрерывной и полунепрерывной разливки алюминиевых сплавов.

1.2.3 Установка горизонтального непрерывного литья алюминия и его сплавов

Технология непрерывного литья применяется, как правило, в производстве слитков сплавов железа Fe, алюминия Al или меди Cu, с высокой выработкой и качеством. Измельчение структуры слитка может

быть улучшено от принудительного перемещения жидкого металла, во время его затвердевания, от воздействия электромагнитного перемешивания. Движение жидкого металла гарантирует устранение нежелательных (в основном для пластической деформации слитка) столбчатых макрозерен из структуры слитка, при одновременном повышении количества благоприятных равноосных макрозерен.

Другим методом измельчения структуры является использование традиционной инокуляции, заключающейся во введении в ванну металла специальных веществ, называемых инокулянты (модификаторы). Модификаторы увеличивают плотность зерна за счет создания новых частиц в следствии замедления скорости роста зерен, уменьшения поверхностного натяжения на межфазной границе жидкость - ядра, уменьшения угла контакта между ядром и основанием и увеличения плотности оснований гетерогенной нуклеации. Эффективность этого типа прививки существенно зависит от кристаллографической матча между базой и ядром привитых металла. Поэтому активные основания к гетерогенной нуклеации для алюминия и частиц, которые имеют с высокой температурой плавления, т.е. боридов титана, карбидов титана, нитриды и бориды алюминия.

Но этот эффективный метод инокуляции, по сравнению с инокуляцией с использованием электромагнитного поля имеет три недостатка: инокулянты уменьшают степень чистоты и электропроводности чистого алюминия, и к тому же являются причиной образования трещин при прокатке слитков. Поэтому, в целях реализации инокуляции с использованием электромагнитного поля, конструкция водоохлаждаемого кристаллизатора для непрерывного литья включает в себя использование электромагнитного перемешивателя.

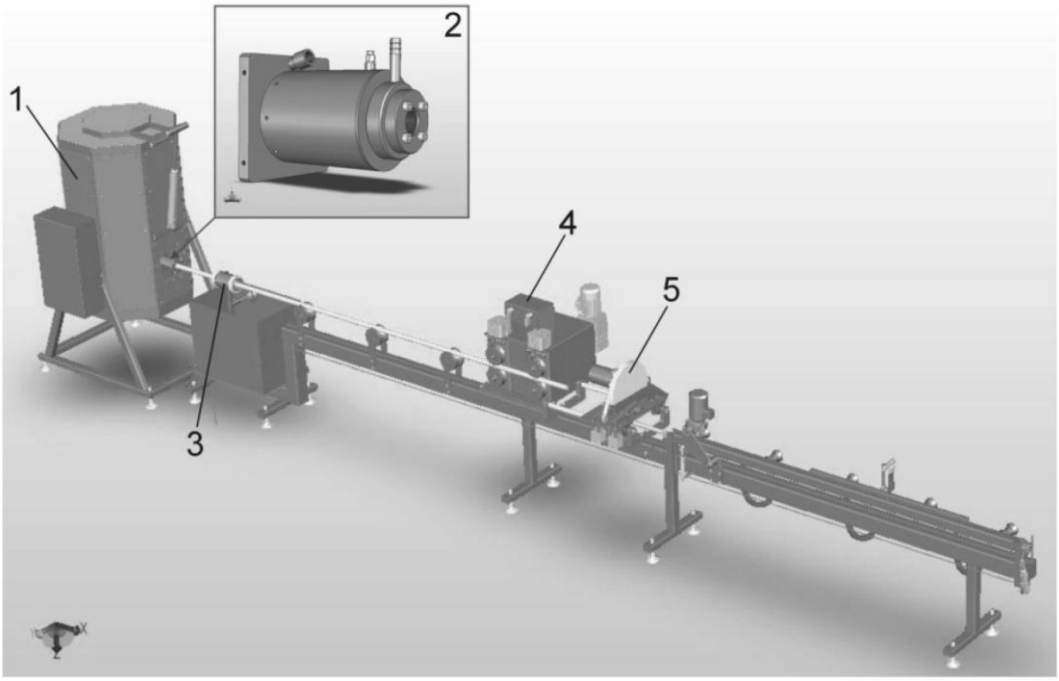


Рисунок 1.13 – Конструкция установки горизонтального непрерывного литья: 1 - индукционная печь (промковш), 2 - кристаллизатор с водяным охлаждением, 3 - система обратного охлаждения, 4 - система непрерывного волочения, 5 - система резки слитка

На рис. 1.13 представлена схема установки горизонтального непрерывного литья, которая была сконструирована в кафедре Силезского Технического Университета. Основными частями сделанного стенда являются: индукционная печь, которая также является промковшом с емкостью до 60 кг, кристаллизатор с водяным охлаждением, скорость потока которого составляет от 0,1 до 10 л / мин, система обратного охлаждения, система непрерывного волочения и резки слитка, которая реализует способ движения слитка в заданное время и скорость, от 100 до 500 мм / мин.

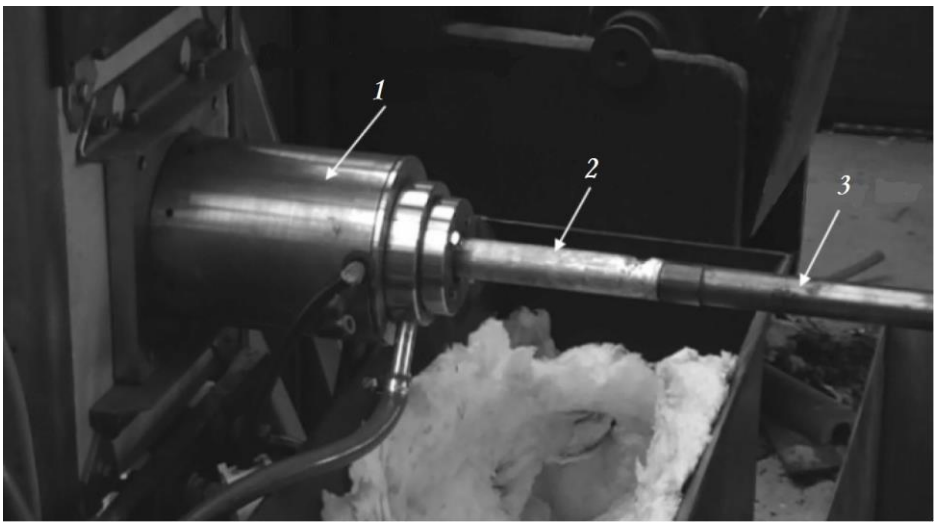


Рисунок 1.14 – Процесс горизонтального непрерывного литья алюминия: 1 – кристаллизатор, 2 – алюминиевый слиток, 3 – затравка

На рис. 1.14 представлен пример процесса непрерывного литья алюминия на описанном стенде.

Важным элементом представленной установки, который значительно влияет на структуру слитка непрерывного литья, является электромагнитный перемешиватель, который помещают в кристаллизатор (рис. 1.15).

Он даёт возможность отливать цилиндрические слитки диаметром от 20 до 40 мм и благодаря ему получается высокое качество поверхности слитка (рис. 1.16). Принцип работы перемешивателя основан на конструкции индукционной катушки, которая создает горизонтальное электромагнитное поле. Эффективность влияния электромагнитного поля на интенсивность перемешивания жидкого металла зависит главным образом от величины магнитной индукции внутри катушки. Значение магнитной индукции зависит от силы тока, который подают на индукционную катушку. Кроме того, есть возможность увеличения силы, которая создает движение жидкого металла, за счет увеличения частоты тока, подаваемого на индукционную катушку.

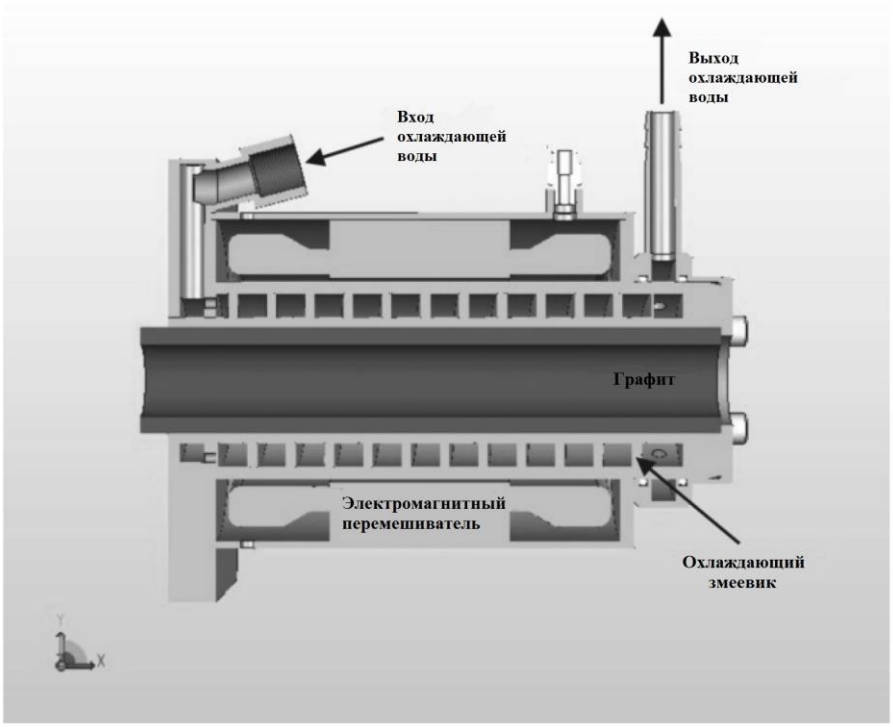


Рисунок 1.15 – Водоохлаждаемый кристаллизатор с электромагнитным перемешивателем в разрезе

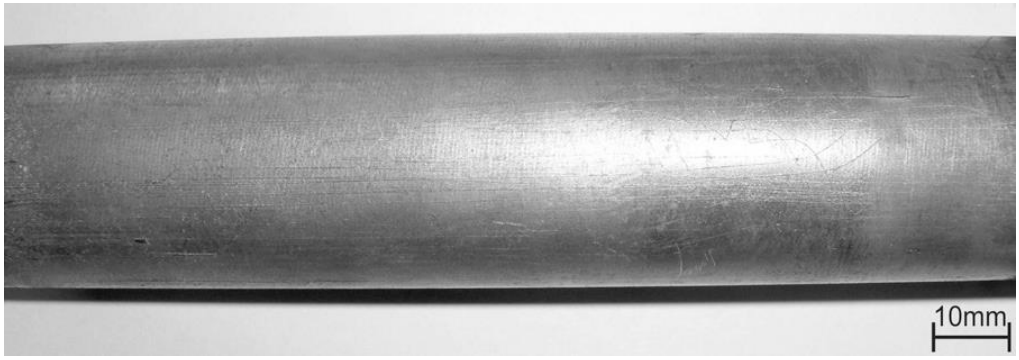


Рисунок 1.16 – Поверхность слитка, полученного в данной установке

На рис. 1.17 представлен пример макроструктур слитков чистого алюминия, соответственно в начальном состоянии, после традиционной инокуляции с добавками титана и бора и после инокуляции с использованием электромагнитного перемешивания. На основании полученных результатов было подтверждено, что измельчение первичной структуры чистого алюминия и сплава AlSi2, полученное с использованием электромагнитного

перемешивания получилось лучше, чем в исходном состоянии, и сравнимо с результатами традиционной инокуляции.

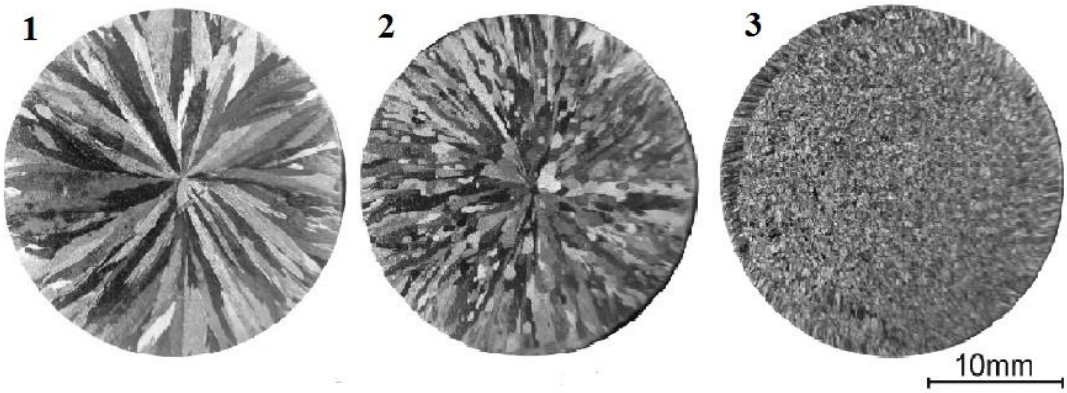


Рисунок 1.17 – Макроструктуры слитков чистого алюминия: 1 – в начальном состоянии, 2 – после модификации добавками титана и бора (AlTi5B1), 3 – после электромагнитного перемешивания (f = 100 Гц)

В заключение можно сказать, что представленная установка горизонтального непрерывного литья позволяет получать слитки чистого алюминия и его сплава AlSi2 с высоким качеством, характеризующимся улучшенным измельчением первичной структуры. Полученное измельчение первичной структуры, имеющее важное значение для следующей пластической деформации слитков. Электромагнитное перемешивание создает термическую и механическую эрозию фронта кристаллизации, что гарантирует измельчение первичной структуры чистого алюминия и сплава AlSi2, без необходимости применения инокулянтов - титана и бора.

2 Математическое моделирование

2.2 Постановка электромагнитной задачи

В качестве исходных данных для расчета задаются геометрические параметры элементов конструкции электромагнитного перемешивателя жидкой сердцевины слитка, электрические параметры питающей схемы.

При построении математической модели приняты следующие допущения:

1) Электромагнитное поле в расчетной области изменяется по гармоническому закону.

2) Геометрия жидкой сердцевины в металле задается исходя из теплового расчета кристаллизующегося слитка.

3) Влиянием движения металла в жидкой фазе слитка и поступательным движением слитка на электромагнитное поле пренебрегаем.

Исследуемая модель позволяет выявить интенсивность воздействия электромагнитных сил индуктора на кристаллизуемый слиток, определить выделение тепловой мощности, в зависимости от изменений электрических параметров и элементов геометрии индуктора.

Уравнения, описывающие электромагнитные процессы записываются в комплексной форме и имеют вид:

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{A}} = -\mu_a \dot{\boldsymbol{\delta}}, \tag{1}$$

$$\nabla \dot{\boldsymbol{\delta}} = 0, \tag{2}$$

$$\dot{\boldsymbol{\delta}} = -\gamma j \omega \dot{\mathbf{A}}. \tag{3}$$

где $\dot{\mathbf{A}}$ - векторный магнитный потенциал, Вб/м;

μ_a - абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м;

$\dot{\boldsymbol{\delta}}$ - комплексный вектор плотности тока, А/м^2;

γ - удельная электрическая проводимость;

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

Уравнения Максвелла в комплексной форме описывают значения магнитной индукции и напряженности электрического и магнитных полей:

$$\dot{\mathbf{B}} = \nabla \dot{\mathbf{A}}, \tag{4}$$

$$\dot{\mathbf{E}} = -j\omega \dot{\mathbf{A}}, \tag{5}$$

$$\dot{\mathbf{H}} = \frac{\dot{\mathbf{B}}}{\mu_a}, \tag{6}$$

$$\dot{\boldsymbol{\delta}} = \gamma \dot{\mathbf{E}}. \tag{7}$$

При постановке граничных условий считаем, что расчетную область окружает среда с идеальными магнитными свойствами. На поверхности, ограничивающими расчетную область выполняются условия:

– для касательной составляющей векторного потенциала:

$$\frac{\partial \dot{\mathbf{A}}_\tau}{\partial n} = 0, \tag{8}$$

– для нормальной составляющей векторного потенциала:

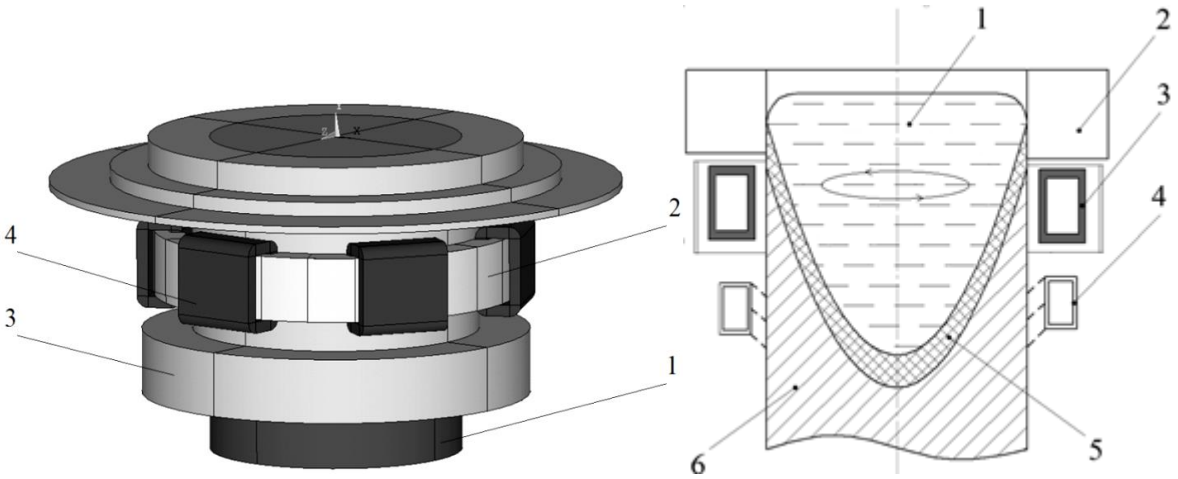
$$\dot{\mathbf{A}}_n = 0. \tag{9}$$

Уравнения (1) – (9) полностью описывают электромагнитные процессы, протекающие в кристаллизаторе.

2.3 Результаты математического моделирования в программном пакете “Ansys”

Задачей моделирования является выявление картины электромагнитного поля в процессе кристаллизации слитка, определение оптимальных энергетических и конструктивных параметров системы.

На рис. 2.1, *а* представлен общий вид модели электромагнитного перемешивателя. Основными элементами ее конструкции являются отливаемый слиток 1, магнитопровод 2, корпус кристаллизатора 3, катушки 4.



а б

Рисунок 2.1 – Общий вид модели электромагнитного перемешивателя (*а*) и схема перемешивания жидкой сердцевины электромагнитным полем (*б*)

В качестве материала магнитопровода используются листы электротехнической стали, собранные в пакеты с пазами со стороны слитка. Конструкция включает в себя шесть катушек, намотанных на ярмо. Катушки, изготовленные из медной проволоки, располагаются на незначительном удалении от слитка, в целях достижения максимального КПД установки.

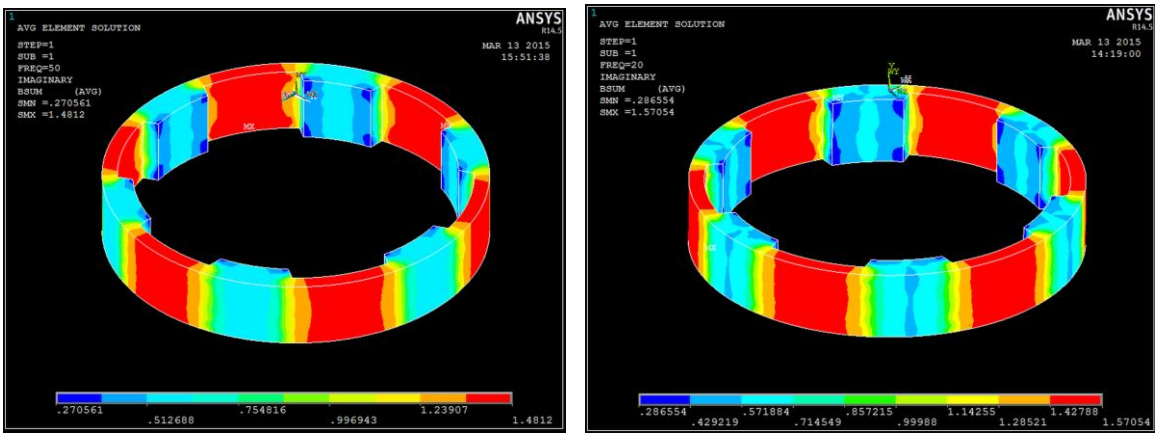
Корпус кристаллизатора скольжения выполнен из немагнитной стали, позволяющей уменьшить экранирование электромагнитного поля. Поддон участвует в формировании донной части слитка и служит опорой для нижней части твердой сердцевины в процессе литья.

На рис. 2.1, *б* изображена схема перемешивания жидкой сердцевины слитка электромагнитным полем. Процесс литья сводится к формированию жидкой зоны с заданной высотой, имеющей в поперечном сечении форму слитка. Жидкий металл 1, находящийся в электромагнитном поле индуктора 3, испытывает силовое воздействие, возникающее в результате взаимодействия вихревых токов, наведенных в расплаве. Жидкая сердцевина перемешивается электромагнитными силами, которые возбуждаются в ее поверхностном слое под воздействием индуктора. Интенсивность электромагнитного поля регулируется экраном 2. Электромагнитный экран ослабляет электромагнитное поле в верхней области жидкой зоны, смещая жидкий металл под действием гидростатического давления в сторону индуктора. Под действием охлаждающей воды, поступающей на боковую поверхность слитка из охладителя 4, жидкая масса непрерывно затвердевает, превращаясь в слиток. Граница раздела твердой и жидкой фаз образует фронт кристаллизации 5. Твердая зона слитка 6 вытягивается вниз.

Проведено исследование электромагнитных процессов в кристаллизаторе, с различными геометрическими параметрами магнитопровода и катушек. Результаты, полученные при помощи математического моделирования позволили выбрать оптимальные энергетические показатели, требуемые для осуществления технологического процесса. Расчет производился при частотах тока f = 20 и f = 50 Гц, а также дополнительно для частот f = 10 и f = 5 Гц. Фазовый сдвиг между токами обмоток осуществляется с шагом в 60°.

На рис. 2.2, *а* показана картина распределения магнитной индукции по магнитопроводу при частоте тока 50 Гц. Показатели магнитной индукции

варьируются от 0,270 до 1,481 Тл. Ее максимальные значения приходятся на область расположения катушек в пазах магнитопровода.



а б

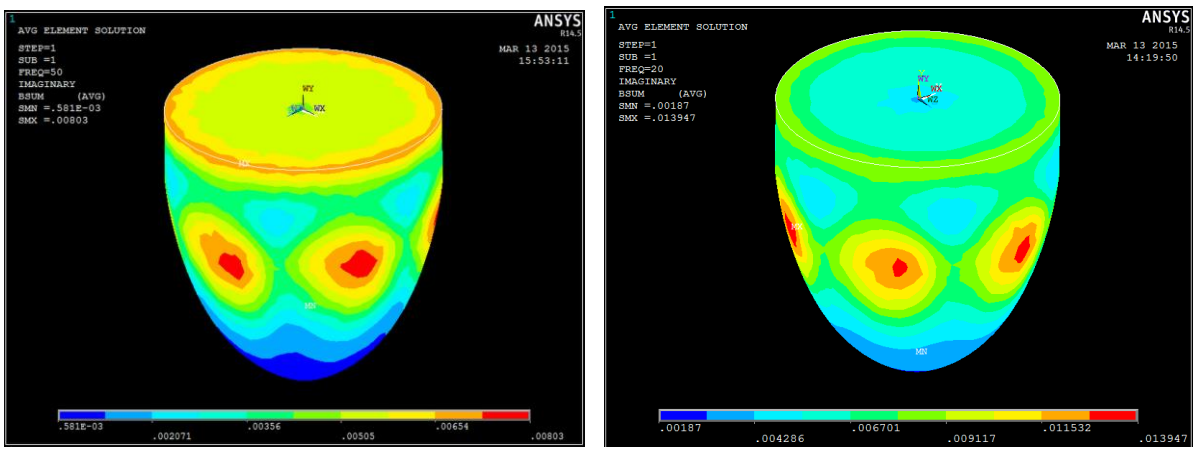
Рисунок 2.2 – Картина распределения магнитной индукции по магнитопроводу при частоте 50 Гц (*а*) и 20 Гц (*б*)

На рис. 2.2, *б* представлены значения магнитной индукции при частоте 20 Гц. Величина магнитной индукции изменяется в диапазоне от 0,286 до 1,570 Тл. Изменения в полученных значениях связаны с увеличением глубины проникновения тока в металл при понижении питающей частоты.

На рис 2.3, *а* показана картина распределения магнитной индукции в жидкой сердцевине слитка при частоте тока 50 Гц. Показатели магнитной индукции в слитке варьируются от $0{,}58 \cdot 10^{-3}$ до $8{,}03 \cdot 10^{-3}$ Тл. Максимальные значения приходятся в областях, напротив расположения катушек.

На рис. 2.3, *б* представлены показатели магнитной индукции при частоте 20 Гц. Величина магнитной индукции изменяется от 0,00185 до 0,01390 Тл.

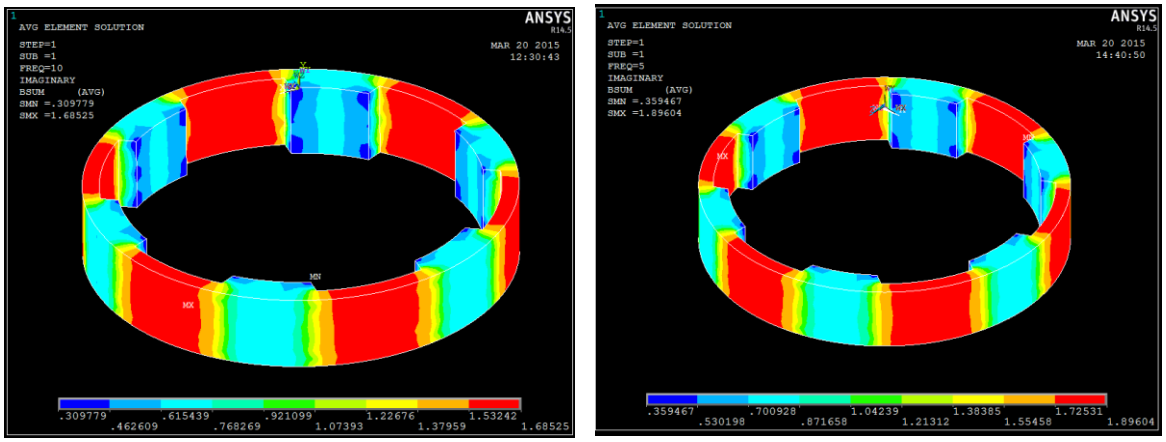
Значения полной мощности при частоте тока f = 20 и f = 50 составили 0,7009 кВт и 1,586 кВт соответственно.



а б

Рисунок 2.3 – Картина распределения магнитной индукции в жидкой сердцевине слитка при частоте 50 Гц (*а*) и 20 Гц (*б*)

Кроме этого были проанализированы частоты f = 10 и f = 5 Гц. На рис. 2.4, *а* показана картина распределения магнитной индукции по магнитопроводу при частоте тока 10 Гц. Показатели магнитной индукции варьируются от 0,309 до 1,685 Тл.

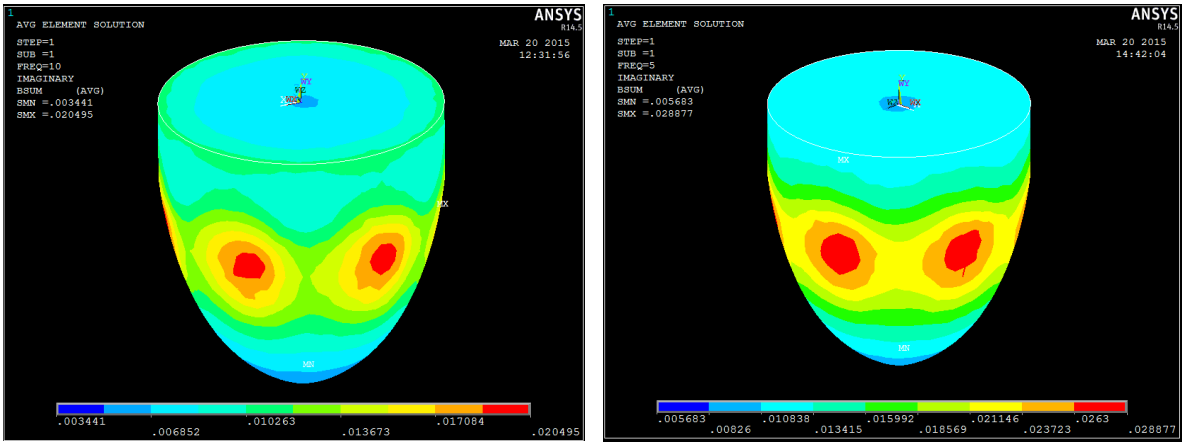


а б

Рисунок 2.4 – Картина распределения магнитной индукции по магнитопроводу при частоте 10 Гц (*а*) и 5 Гц (*б*)

На рис. 2.4, *б* представлены значения магнитной индукции при частоте 5 Гц. Величина магнитной индукции изменяется в диапазоне от 0,359 до 1,896 Тл.

На рис. 2.5, *а* показана картина распределения магнитной индукции в жидкой сердцевине слитка при частоте тока 10 Гц. Показатели магнитной индукции в слитке варьируются от 0,0034 до 0,0204 Тл.



а б

Рисунок 2.5 – Картина распределения магнитной индукции в жидкой сердцевине слитка при частоте 10 Гц (*а*) и 5 Гц (*б*)

На рис. 2.5, *б* представлены показатели магнитной индукции при частоте 5 Гц. Величина магнитной индукции изменяется от 0,0056 до 0,0288 Тл.

Из рассмотренного диапазона частот наиболее оптимальным принят вариант при частоте 10 Гц. При данной частоте обеспечиваются приемлемый показатель магнитной индукции в слитке, а также достаточная глубина проникновения тока в жидкую сердцевину слитка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы были рассмотрены различные технологии в области электромагнитного перемешивания кристаллизующегося слитка, проведен анализ физических воздействий на жидкую сердцевину кристаллизующегося слитка, а также была разработана математическая модель в программном пакете “Ansys”.

Разработанная математическая модель с высокой степенью достоверности описывает электромагнитные процессы, протекающие в кристаллизаторе. Она позволяет находить распределения электромагнитных сил в жидкой сердцевине слитка. Выявлены зависимости распределения магнитной индукции, электромагнитных сил и глубины проникновения тока в металл.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор / Гецелев З.Н., Балахонцев Г.А., Квасов Ф.И., Черепок Г.В., Варга И.И., Мартынов Г.И. М.: Металлургия, 1983.152с.

2. Христинич Р.М. Индукционные устройства для технологического воздействия на жидкие металлы: Дис. док. техн. наук: 05.09.03 / Р.М. Христинич. - Красноярск, 2000. - 504 с.

3. Пат. 2 237 542 Российская Федерация, МПК B22D 11/049, МПК B22D 11/115. Устройство для электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины слитка в кристаллизаторе / Тимофеев В.Н., Тимофеев С.П., Бояков С.А., Христинич Р.М., заявл. 08.01.2003; опубл. 10.10.2004.

4. Пат. 2 457 064 Российская Федерация, МПК B22D 11/049, МПК B22D 27/02. Способ для непрерывной и полунепрерывной разливки алюминиевых сплавов и устройство для его осуществления / Головенко Е.А., Павлов Е.А., Тимофеев В.Н., заявл. 03.03.2011; опубл. 27.07.2012.

5. Гельфгат, Ю.М. Жидкий металл под действием электромагнитных сил / Ю.М. Гельфгат, О.А. Лиелаусис, Э.В. Щербинин. - Рига: Зинатне., - 1976. -232 с.

6. Каменская, Н.П. Применение электромагнитного перемешивания при непрерывной разливке стали / Н.П. Каменская, О.Д. Колесников, И.Н.Шифрин // Обз. Инф. Вып. 2: Черметинформация. Сер. Сталеплав. - М.: - С 27.

7. Бондарев, Б.И. Модифицирование алюминиевых деформируемых сплавов / Б.И.Бондарев, В.И. Напалков, В.И. Тарарышкин. - М.: Металлургия., -1979.-224 с.

8. Галевский,Г.В. Металлургия вторичного алюминия: Учеб. для вузов / Г.В. Галевский, Н.М. Кулагин, М.Я. Минцис. - Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН., 1998. - 289 с.

9. ANSYS: справочник пользователя / Басов К.А – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с

10. ANSYS для инженеров / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк, 2003

11. Основы анализа конструкций в ANSYS: Учебное пособие / Конюхов А.В. - Казань: Изд-во КГУ, 2001. - 102 с.

12. The Stand of Horizontal Continuous Casting of Al and its Alloys / T. Wróbel, J. Szajnar, D. Bartocha, M. Stawarz – Silesian University of Technology, Foundry Department Engineering, заявл. 24.05.2013; опубл. 29.05.2013.

13. Шмидт, П.Г. Влияние механического перемешивания жидкой стали на процесс кристаллизации непрерывного слитка / П.Г. Шмидт // Известия вузов. Черн. Металлургия. - 1997. - № 4. – 38 с.

14. Самойлович, Ю.А. Системный анализ кристаллизации слитка / Ю.А.Самойлович. - Киев: Наукова думна., -1983. - 248 с.

15. Герман, Э. Непрерывное литье / Э. Герман. - М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии., - 1961. - 814 с.