

АО АХК «Всероссийский научно–исследовательский и проектно–конструкторский  
институт металлургического машиностроения имени академика А.И. Целикова»  
ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии  
им. И.П. Бардина»

На правах рукописи

ШАХОВ СЕРГЕЙ ИОСИФОВИЧ



НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ  
И КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ СОРТОВЫХ И БЛЮМОВЫХ  
МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (Металлургия)

**Диссертация**

на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант

доктор технических наук, профессор Вдовин Константин Николаевич
--

Москва 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАТОРЫ СОРТОВЫХ И БЛЮМОВЫХ МНЛЗ.....	15
1.1. Тенденции развития конструкции кристаллизаторов.....	15
1.2. Физические методы воздействия на качество непрерывно-литых заготовок.....	26
1.3. Существующее состояние электромагнитного перемешивания .....	47
Выводы по главе 1.....	69
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОЙ СТАЛИ СОРТОВЫХ И БЛЮМОВЫХ МНЛЗ.....	71
2.1. Оценка воздействия постоянного магнитного поля и электромагнитного перемешивания на жидкий металл в кристаллизаторе МНЛЗ .....	71
2.2. Исследование электромагнитного перемешивания, встроенного в кристаллизаторы МНЛЗ.....	93
2.3. Исследование электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе наружного исполнения .....	97
2.4. Исследование двухуровневого электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания машины полунепрерывного литья заготовок.....	102
2.5. Инженерная методика расчёта электротехнических параметров статора и максимальной скорости расплава при электромагнитном перемешивании.....	105
Выводы по главе 2.....	113

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ СТАЛЬНОГО РАСПЛАВА НА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ.....	116
3.1. Моделирование электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ.....	116
3.2. Методы и результаты измерения параметров электромагнитного перемешивания на жидкометаллической модели.....	123
3.3. Моделирование электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания машины полунепрерывного литья заготовок.....	129
Выводы по главе 3.....	132
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ СОРТОВЫХ И БЛЮМОВЫХ МНЛЗ.....	133
4.1. Системы электромагнитного перемешивания, встроенные в кристаллизаторы МНЛЗ.....	133
4.2. Система электромагнитного перемешивания в кристаллизаторах МНЛЗ наружного исполнения .....	157
4.3. Система электромагнитного перемешивания в кристаллизаторах и зоне окончания затвердевания блюмовых МНЛЗ.....	163
4.4. Система электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания машины полунепрерывного литья заготовок.....	170
4.5. Усовершенствование гильзового кристаллизатора для обеспечения равномерного первичного охлаждения слитка.....	177
4.6. Общие принципы конструирования систем электромагнитного перемешивания.....	188
Выводы по главе 4.....	196

ГЛАВА 5. ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ.....	199
5.1. Электромагнитное перемешивание в кристаллизаторах радиальных МНЛЗ.....	199
5.2. Электромагнитное перемешивание в кристаллизаторах горизонтальных МНЛЗ.....	213
5.3. Электромагнитное перемешивание в кристаллизаторах и зоне окончания затвердевания блюмовых МНЛЗ.....	218
5.4. Двухуровневое электромагнитное перемешивание для машины полунепрерывного литья заготовок.....	226
5.5. Методология разработки и опробования систем электромагнитного перемешивания.....	229
Выводы по главе 5.....	234
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	237
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	241
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	284

## ВВЕДЕНИЕ

Разливка стали на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является одним из ключевых переделов в технологическом цикле сталеплавильного производства [1]. В 2019 году на МНЛЗ разлили 1804,7 млн т или 96,6 % от всей произведенной стали, в том числе в России – 59,1 млн т или 82,2 % соответственно [2]. Из-за высоких требований к надёжности работы МНЛЗ при её проектировании закладывают соответствующие повышенные коэффициенты запаса. В связи с этим основные детали и узлы МНЛЗ имеют продолжительный физический срок службы. В настоящее время в мире насчитывают более 1100 машин непрерывного и полунепрерывного (МПНЛЗ) литья заготовок, при этом – более сотни из них со сроком службы, превышающим 20 лет. Хотя многих из этих машин продолжают эксплуатировать с разной степенью успеха, их моральный износ не вызывает сомнения. Такие МНЛЗ не отвечают современным требованиям по механизации и автоматизации, по информационному и приборному оснащению, по уровню технологичности. Кроме того, последствия мирового экономического кризиса ставят новые задачи перед руководством металлургических заводов. Возникает необходимость в увеличении производительности МНЛЗ, расширении её марочного и размерного ассортиментов, снижении себестоимости, энергопотребления и экологической нагрузки на окружающую среду, а также – повышении качества выпускаемой продукции [3, 4].

Успешное решение этих задач возможно двумя способами: замена существующей МНЛЗ на новую или её модернизация, в том числе – поэтапная. Примечательно то, что 50–55 % всех существующих МНЛЗ соорудили, либо реконструировали именно в последние 10–15 лет, что свидетельствует о непрерывном научно–техническом прогрессе в технологии и оборудовании для непрерывной разливки. Очевидно, что первый способ связан с существенными капитальными затратами на выделение дополнительных площадей для строительства МНЛЗ, на строительство фундаментов, на изготовление оборудования МНЛЗ, на создание или модернизацию инфраструктуры (энергетика,

снабжение водой, сжатым воздухом и т.д.), решение логистических задач и пр. В то же время второй способ отличается существенно меньшими капитальными затратами, и он более гибок, так как позволяет вести работы поэтапно и, в конечном итоге, позволяет достичь необходимого результата [5].

Выбор того или иного способа решения следует определять путём скрупулезного анализа капитальных затрат и степени надёжности работы как новой, так и реконструируемой МНЛЗ. Во ВНИИМЕТМАШ накоплен опыт реконструкции действующих МНЛЗ [6-8], при этом объём и содержание этих работ предопределяют теми задачами, которые ставит заказчик. А именно:

- увеличение производительности машины непрерывного литья заготовок;
- расширение марочной и размерной номенклатур выпускаемой продукции;
- улучшение условий эксплуатации МНЛЗ;
- повышение качества производимых заготовок.

В зависимости от уровня поставленных заказчиками или руководством завода задач и степени износа существующего оборудования модернизации подлежат различные участки МНЛЗ.

В представленной работе в основном исследовали проблему и задачи модернизации оборудования участка формирования непрерывно-литых заготовок (НЛЗ).

Разливка жидкой стали на МНЛЗ имеет свою специфику, предопределяющую качество макроструктуры и поверхности производимых заготовок и зависящую, прежде всего, от технологических параметров и конструкции используемого оборудования. Кроме того, существует целая группа дефектов непрерывно-литых заготовок (центральная пористость, подсадочная ликвация, развитая дендритная структура слитка и др.), которые невозможно исключить даже, применяя передовое, современное оборудование МНЛЗ и рациональную технологию непрерывной разливки. Для предотвращения или подавления развития указанных выше дефектов применяют различные способы внешнего физического воздействия на кристаллизующиеся заготовки. Одним из наиболее эффективных и технологичных способов воздействия является

применение электромагнитного перемешивания (ЭМП) жидкого расплава заготовок. На российских металлургических заводах системы электромагнитного перемешивания при непрерывной разливке стали, в основном, представлены оборудованием иностранного производства. Обладая рядом преимуществ, данные системы имеют существенные недостатки технологического и конструктивного характера.

Также следует отметить, что применяемые в настоящее время в большинстве случаев на МНЛЗ гильзовые кристаллизаторы при производстве сортовых, круглых и блюмовых заготовок имеют значительный конструктивный недостаток, заключающийся в том, что для центрирования рубашек охлаждения относительно гильзы используют вкрученные в рубашку болты, которые необходимо отводить от гильзы с учетом её температурного расширения. Вследствие этого кольцевой зазор между гильзой и рубашкой, по которому проходит охлаждающая гильзу вода, может иметь существенные отклонения от заданных значений, что приводит к нарушению поверхности гильзы и искажению её формы, что вызывает разнотолщинность корки слитка на выходе из кристаллизатора. В случае круглых заготовок это приводит к овальности и возникновению продольных трещин, в случае квадратных – к ромбичности и околоугловым продольным трещинам.

Вышеуказанными обстоятельствами обусловлена актуальность настоящей диссертационной работы, в которой представлены пути разработки научных основ совершенствования систем ЭМП и кристаллизаторов сортовых и блюмовых МНЛЗ, конструкции которых превосходят мировые аналоги по интенсивности перемешивания, равномерности первичного охлаждения, электропотреблению, габаритам, массе оборудования и ремонтпригодности.

**Целью данной работы** является разработка научных основ совершенствования систем электромагнитного перемешивания и кристаллизаторов сортовых и блюмовых МНЛЗ.

Для достижения поставленной цели в работе решали основные задачи:

1. Провести анализ действующих систем электромагнитного перемешивания и конструкций кристаллизаторов зарубежных производителей, применяемых в настоящее время на российских металлургических заводах.

2. Разработать теоретические методы совершенствования систем электромагнитного перемешивания жидкой стали в сортовых и блюмовых МНЛЗ.

3. Разработать методы физического моделирования для обоснования конструкции устройств электромагнитного перемешивания и технологии непрерывной разливки.

4. Разработать принципы конструирования устройств электромагнитного перемешивания и кристаллизаторов МНЛЗ.

5. Опробовать и внедрить разработанные устройства ЭМП и конструкции кристаллизаторов на машинах непрерывного литья сортовых и блюмовых заготовок.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследований является оборудование кристаллизаторов и систем ЭМП жидкой стали на МНЛЗ, а предметом – научные основы совершенствования систем электромагнитного перемешивания жидкой стали и конструкции кристаллизаторов для сортовых и блюмовых МНЛЗ.

**На защиту автором выносятся:**

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований гидродинамики жидкой фазы в непрерывно отливаемых заготовках при одновременном воздействии на расплав тормозящих и создающих движение металла электромагнитных сил.

2. Методика выбора системы ЭМП, места её установки и режимов электромагнитного перемешивания в зависимости от марочного и размерного сортаментов производимых заготовок.

3. Методология разработки и опробования устройств электромагнитного перемешивания и кристаллизаторов сортовых и блюмовых МНЛЗ.

4. Результаты внедрения на различных металлургических заводах разработанных систем ЭМП для кристаллизаторов и зоны окончания

затвердевания, обеспечивавшие получение значительного экономического эффекта.

### **Научная новизна и теоретическая значимость результатов:**

1. Получены новые представления о процессах электромагнитного перемешивания жидкой стали в кристаллизаторе при двухуровневом электромагнитном воздействии, в котором производится электромагнитное перемешивание расплава в нижней части кристаллизатора вокруг его оси и электромагнитное торможение этих потоков в районе мениска.

2. Разработана методика совершенствования устройств ЭМП, встроенных непосредственно в кристаллизатор машины горизонтального непрерывного литья, позволяющая определить расположение зоны действия максимальных сил вращения жидкого металла.

3. Разработана и экспериментально подтверждена инженерная методика расчета устройств электромагнитного перемешивания для заданных условий, на основе которой установлена зависимость скорости движения расплава от электротехнических параметров.

4. Разработаны новые рациональные режимы электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе наружного исполнения, обеспечивающие эффективный диапазон скоростей движения жидкого металла 0,3-0,56 м/с для достижения необходимого качества непрерывно-литых заготовок.

5. Научно и технически обоснована методология разработки и опробования устройств электромагнитного перемешивания сортовых и блюмовых МНЛЗ, использование которой дает возможность повысить ресурс устройств ЭМП, сократить время и материальные затраты на выбор системы для конкретной МНЛЗ, её проектирование и промышленное опробование.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** обеспечиваются: надежностью и представительным объемом исходных данных, подтверждаются корректным применением методик проведенных экспериментов, принципов математического и физического моделирования; их согласованием с результатами промышленных испытаний на заводах: Молдавском

металлургическом («ММЗ»), Ижевском опытно-механическом («ИОМЗ»), металлургическом «Электросталь» и Оскольском электрометаллургическом комбинате («ОЭМК»), сопоставимостью результатов экспериментальных исследований с теоретическими выводами.

### **Практическая значимость работы:**

1. Выполнена классификация серии систем электромагнитного перемешивания и их недостатков.

2. Разработаны физические модели МГД-процессов, происходящих при ЭМП. Результаты, полученные с использованием испытательных стендов, позволяют обоснованно определять режимы электромагнитного перемешивания для достижения необходимых скоростей потоков расплава в кристаллизаторах сортовых МНЛЗ и блюмовых МПНЛЗ.

3. Разработана серия устройств ЭМП, встроенных в кристаллизатор, в которых полюса охлаждаются его водой, при внедрении которой получены следующие практические результаты:

– максимальный балл по центральной пористости сократился в 1,6 раза, а зона столбчатых кристаллов уменьшилась в 1,7 раза в заготовках из высокоуглеродистых марок стали, производимых на сортовой МНЛЗ ОАО «ММЗ»;

– двухуровневое электромагнитное воздействие с электромагнитным тормозом в верхней части и перемешивателем в нижней части кристаллизатора, необходимо использовать при невозможности отдаления статора от мениска на требуемое расстояние, в частности – при производстве круглых трубных заготовок, производимых на сортовой МНЛЗ ООО «Baku Steel Company» (г. Баку, Азербайджан).

4. Впервые в России разработано устройство ЭМП, встроенное в кристаллизатор горизонтальной МНЛЗ АО «ИОМЗ, при испытании которого средний балл по центральной пористости уменьшился в 1,6 раза, а качество поверхности существенно улучшилось в круглых заготовках из высоколегированных марок.

5. Для АО «ВТЗ» впервые разработана система электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе наружного исполнения, в которой применили воду кристаллизатора для охлаждения обмотки статора, расположенного в разборном корпусе из аустенитной нержавеющей стали, что обеспечило повышение ремонтпригодности в условиях металлургического завода, снижение капитальных затрат и эксплуатационных расходов.

6. Разработан и исследован в промышленных условиях комплекс оборудования для двухстадийного ЭМП в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания блюмовой МНЛЗ АО «ОЭМК» при производстве заготовок из подшипниковых марок стали, обеспечивающий сокращение подсадочной ликвации в 2,4–2,5 раза.

7. Разработан, исследован и пущен в промышленную эксплуатацию в условиях АО «МЗ «Электросталь» комплекс оборудования для одновременного электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе и в зоне окончания затвердевания для МПНЛ круглых заготовок из высоколегированных марок стали, что позволило в 2,5 раза снизить осевую ликвацию и центральную пористость, балл по осевым трещинам уменьшить в 2 раза, а краевые точечные загрязнения полностью исключить.

8. Разработана конструкция гильзового кристаллизатора, исключая несоосное расположение гильзы и рубашки охлаждения, обеспечивающая равномерное охлаждение заготовки по всему периметру кристаллизатора, при сохранении соосности расположения рубашки относительно гильзы в пределах 0,03-0,10 мм. Разработанная конструкция защищена патентом Российской Федерации №2709078.

9. Разработанные системы ЭМП для сортовых и блюмовых МНЛЗ обеспечивают существенное улучшение качества непрерывно-литых заготовок и снижение капитальных и эксплуатационных затрат в 1,5–2,0 раза по сравнению с зарубежными аналогами. Ожидаемый экономический эффект составляет 21 млн руб. при работе многоручьевой МНЛЗ 320 дней в году.

**Методология и методы исследования.** В работе использована комплексная методология, включающая математическое моделирование и экспериментальные методы исследований на лабораторных установках и промышленных объектах.

В исследованиях использовали:

– современные приборы и оборудование, позволяющие оценивать макро- и микроструктуру: световой микроскоп «Olimpus» (Япония), растровый (сканирующий) электронный микроскоп «Tescan» (Чехия), ниталь – 4 % раствор соляной кислоты в воде (спирте), свежеприготовленный раствор пикриновой кислоты и др.;

– метод исследования макроструктуры с помощью серных отпечатков по Бауману;

– метод оценки качества макроструктуры при металлографическом исследовании по ОСТ 14–1–235–91.

### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертация отвечает паспорту специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (металлургия): п. 1 «Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов и процессов; механизации производства в соответствии с современными требованиями внутреннего и внешнего рынка, технологии, качества, надежности, долговечности, промышленной и экологической безопасности», п. 3 «Теоретические и экспериментальные исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций» и п. 5 «Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов, процессов и оценки их экономической эффективности и ресурса».

**Основные положения и результаты** диссертации докладывались и обсуждались на XIII–XV Конгрессах сталеплавильщиков (г. Полевской, 2014 г.; г. Электросталь, 2016 г.; г. Тула, 2018 г.), международной конференции «Проблемы разлива и кристаллизации стали» (г. Москва, 2012 г.), международной конференции «Современные требования и металлургические аспекты повышения

коррозионной стойкости и других служебных свойств углеродистых и низколегированных сталей» (г. Москва, 2012 г.), международной конференции «Литейное производство и металлургия» (г. Минск, 2013 г.), международных конференциях «Технология и оборудование для внепечной обработки и непрерывной разливки стали» (г. Москва, 2013 г., 2015 г.), конференции «Эффективное производство стали» (г. Москва, 2016 г.), II международной конференции «Проблемы Металлургии и Материаловедение», (г. Баку, 2017 г.), международной конференции «Мировые тенденции развития технологии непрерывной разливки стали» (г. Москва, 2017 г.), XVIII научно-технической конференции «Новые перспективные материалы, оборудование и технологии для их получения» (г. Москва, 2019 г.), научно-практической конференции «Фазовые и структурные превращения в стали и сплавах» PST2020 (г. Екатеринбург, 2020 г.).

За две работы, выполненные по теме диссертации в 2015 г. («Создание нового оборудования для реконструкции действующих сортовых и блюмовых МНЛЗ с целью литья круглых заготовок с целью производства труб и железнодорожных осей и колес») и в 2019 г. («Разработка оборудования для электромагнитного перемешивания жидкой стали в кристаллизаторах сортовых и блюмовых МНЛЗ»), автору в составе творческого коллектива присвоили звание лауреата выставки, и он награжден золотыми медалями «Металл–Экспо», г. Москва.

**Личный вклад автора состоит в непосредственном участии** при организации, постановке и проведении всех экспериментальных и теоретических исследований, анализе результатов работы, обобщении и обосновании всех защищаемых положений, подготовке их к публикации, а также во внедрении результатов исследований в производство на промышленных МНЛЗ заводов «ММЗ», «ИОМЗ», «МЗ «Электросталь» и «ВТЗ».

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и шести приложений. Содержит 297 страниц машинописного текста, включающего 108 рисунков, 16 таблиц, библиографический список из 387 наименований и 6 приложений.

**Публикации.** Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в 31 научном труде, в том числе – в 12 рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, в 7 статьях – в журналах, индексируемых в международных наукометрических базах Scopus и Web of Science, в двух патентах РФ и в 12 статьях в других изданиях.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность за ценные советы и замечания всем, кто помогал в подготовке диссертации, особенно А.С. Смолякову, С.И. Платову, Д.В. Терентьеву, В.В. Точилкину, В.П. Анцупову, А.Б. Сычкову, В.А. Бигееву, Ю.М. Рогачикову.

## ГЛАВА 1. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАТОРЫ СОРТОВЫХ И БЛЮМОВЫХ МНЛЗ

### 1.1. Тенденции развития конструкции кристаллизаторов

Качество непрерывно-литых заготовок предопределяется комплексом технологических мероприятий, включающих выбор параметров и режимов литья, применяемыми огнеупорами на участке «сталеразливочный ковш – промежуточный ковш – кристаллизатор МНЛЗ», защитой расплава от вторичного окисления, рациональными значениями температурного режима и скорости разливки, а также – состоянием и конструктивными особенностями применяемого оборудования МНЛЗ.

Исследование особенностей гидродинамики стального расплава, тепломассопереноса и физико–химических процессов, происходящих на стадии кристаллизации, позволяет разработать надлежащие меры по усовершенствованию основного оборудования МНЛЗ, устройств электромагнитного перемешивания и технологии непрерывного литья с использованием ЭМП [9].

Кристаллизатор – один из ключевых технологических узлов МНЛЗ. В процессе непрерывного литья стали ему принадлежит основная функция формирования слитка требуемых сечения и качества. Производительность МНЛЗ и качество заготовок во многом зависит от того, насколько кристаллизатор соответствует всем технологическим требованиям. Главное из этих требований – обеспечить требуемый по равномерности и интенсивности теплоотвод от корки слитка, не разрушающейся под воздействием тепла расплава, ферростатического давления жидкой фазы и трещин термического происхождения [10].

Выбор правильного профиля рабочей полости кристаллизатора, компенсирующего усадку заготовки и обеспечивающего её плотный контакт со стенками кристаллизатора и равномерное охлаждение по периметру её поверхности, практически исключает разнотолщинность корки слитка и такие искажения формы его поперечного сечения, как ромбичность или овальность.

Возникновение зазоров между слитком и стенками кристаллизатора приводит к ухудшению качества продукции и ограничивает скорость литья. Дефекты металла, возникшие в кристаллизаторе, практически невозможно полностью устранить. Поэтому от конструкции кристаллизатора существенно зависят производительность МНЛЗ и качество заготовок.

Крупные металлургические и машиностроительные компании проектируют и используют в производстве оригинальные конструкции кристаллизаторов и гильз, позволяющих увеличить производительность и повысить качество готовой продукции.

С целью уменьшения ромбичности прямоугольных заготовок и увеличения скорости разливки фирма «КМЕ Group» (Германия) разработала конструкцию гильзы кристаллизатора с фирменным наименованием «WAVE» (волна) [11]. Отличительной особенностью гильзы «WAVE» является её внутренняя поверхность, выполненная в виде волнистого профиля, гребни которого зеркально отражаются на поверхности затвердевающего слитка. При сцеплении этих двух поверхностей заготовка движется по направляющим без смещения в какую-либо сторону. При этом обеспечивают равномерный теплоотвод и улучшение формирования корки заготовки в критический период нахождения в кристаллизаторе.

В 2010 году компания «КМЕ Group» испытала гильзы «WAVE» (материал Cu–Ag<sub>0,10P</sub>) на заводе «CMS Steel Texas» (США) при производстве заготовок 127x127 мм со скоростью литья 3,5–4,5 м/мин. По данным исследователей [12], ромбичность при скоростях разливки заготовок 3,5, 4,0, 4,5 м/мин из углеродистых сталей 1022 ([C]=0,19–0,23 %) не превышает 0,1 мм, при этом на сравнительных параболических гильзах при скорости литья 3,5 м/мин в стандартные гильзы «КМЕ» (материал «Elbrodur G AMT»), ромбичность составила 1,0 мм, при 4,0 м/мин – 1,5 мм, при 4,5 м/мин – 1,0 мм.

Испытания гильз «WAVE» продолжили еще на 2 заводах. На первом при литье заготовок сечением 134x194 мм из среднеуглеродистых марок стали скорость разливки составила 3,3 м/мин. На другом при разливке заготовок сечением 178x178

мм – 1,65 м/мин. Средняя ромбичность за 2 года составила 1,87 мм. Средняя стойкость гильз «WAVE» составила 1795 плавов или 50 тыс. т стали, для сравнения средняя стойкость параболических гильз из сплава «КМЕ Elbrodur G» – 1050 плавов [12].

Развитием конструкции гильз «WAVE» стали гильзы с волнистой наружной поверхностью. Отличительной особенностью этих гильз являются охлаждающие пазы с переменной геометрией в верхней части наружной поверхности гильз (патент «КМЕ»). По информации разработчика [13] такая конструкция позволяет оптимизировать отвод тепла в районе мениска в кристаллизаторе от жидкой стали к воде, увеличить срок службы гильзы благодаря уменьшенной тепловой нагрузке. Центрирование гильз обеспечивают сборными стальными направляющими плитами.

Широкое промышленное применение гильз «WAVE» не состоялось из-за того, что менее затратными технологическими приемами и конструктивными мероприятиями – (точное центрирование струи металла из промковша, трехконусный профиль рабочей поверхности гильзы и др.), удалось достигнуть требуемых результатов. Кроме того, ВНИИМЕТМАШ в девяностые годы прошлого столетия разработал и испытал на Молдавском металлургическом заводе схожие гильзы с волнистой внутренней поверхностью. Результаты проведенных исследований не показали существенных отличий качества заготовок, произведенных с использованием таких гильз по сравнению с изготовленными по традиционной технологии.

Одним из возможных путей снижения издержек производства непрерывно-литых заготовок является увеличение пропускной способности МНЛЗ путем увеличения скорости литья. Так, например, фирмой «Siemens-VAI» (Австрия) при использовании гильз конструкции «Diamold» длиной 1000 мм – во время испытаний на МНЛЗ №4 завода «EGE Celik» (Alliaga, Турция) при разливке заготовок сечением 130x130 мм из конструкционных сталей SAE1006, SAE1008 – была достигнута скорость литья 5,4–6,0 м/мин (до 6,2 м/мин) [14].

В работе [15] отмечено, что конструкция гильз «Diamold» позволяет существенно увеличить скорость литья и расширить марочный сортамент разливаемых сталей. Однако сложность изготовления и, вследствие этого, высокая стоимость (примерно в 2–2,5 раза выше гильз традиционной конструкции) препятствуют широкому распространению гильз «Diamold».

Фирма «SMS-Concast» (Швейцария) разработала новую гильзу кристаллизатора со скругленными углами с фирменным наименованием «All-Convex», которая является продолжением гильз конструкции «Convex» [16]. Гильзу «All-Convex» отличают от «Convex» скругленные углы, и – в случае квадратной заготовки – форма верхней части гильзы в поперечном сечении выполнена близкой к кругу, с дальнейшим переходом в квадрат. Литьё заготовок широкого марочного сортамента ( $[C]=0,03–0,95\%$ ) на МНЛЗ–1 завода «ArcelorMittal Steel Ruhrort» (Германия) с использованием гильз «All-Convex» со скоростью разливки до 4,0 м/мин обеспечило получение заготовок сечением 130x130 мм с хорошим качеством макроструктуры и поверхности [16].

При этом следует отметить, что в случае несоблюдения скоростного режима разливки заготовок из низкоуглеродистой стали, повышенная конусность в верхней части гильз может привести к образованию поперечных ужимин, а низкая конусность в нижней части – увеличивает ромбичность НЛЗ. Кроме того, из-за сложности конструкции и высокой цены в настоящее время в открытой печати известны лишь единичные случаи применения гильз данной конструкции при производстве сортовых заготовок.

Фирма «Danieli» (Италия) разработала новую конструкцию гильзы кристаллизатора наименованием «PowerMold<sup>TM</sup>» для высокоскоростного литья «FastCAST<sup>TM</sup>». Отличительной особенностью гильз этой конструкции является то, что охлаждение гильзы водой кристаллизатора обеспечивают не через наружную поверхность, а через систему вертикальных сверленных каналов, расположенных в стенке гильзы. По сравнению с обычной гильзой, толщина стенки в «PowerMold<sup>TM</sup>»

увеличивается в 2,0–2,5 раза, при этом отсутствует необходимость в применении рубашки охлаждения.

По мнению разработчиков [17], у гильзы «PowerMold™» имеются следующие основные преимущества: повышенная жесткость гильзы, отсутствие постоянных деформаций, увеличенная стойкость, отсутствие пленочного кипения, высокая и равномерная передача тепла от жидкой стали к воде, рациональное охлаждение углов, улучшенная конусность.

При разливке заготовок сечением 130x130 мм из низколегированных марок стали с использованием гильз «PowerMold™» на МНЛЗ микрозавода «СМС Steel» (Аризона, США) скорости разливки достигли 6,3 м/мин. По данным источника [18] такая скорость позволила совместить в одну линию МНЛЗ и прокатный стан.

Для увеличения производительности и улучшения качества непрерывно-литых заготовок диаметром 156 мм из трубных марок стали на МНЛЗ «Северского трубного завода» провели модернизацию с целью установки гильз «PowerMold™». Проведенные мероприятия улучшили качество поверхности, снизили число «подвисаний» и прорывов и позволили достигнуть скорости разливки 3,2 (макс. 3,5) м/мин [19].

Однако из-за сложности изготовления и повышенном расходе меди стоимость гильз данной конструкции в 2,5–3,0 раза выше стоимости гильз традиционной конструкции, вследствие чего, гильзы «PowerMold™» получили ограниченное распространение.

Гильзы «ВМ–sin» конструкции ВНИИМЕТМАШ для сортовых и блюмовых МНЛЗ внедрили на десятках ручьев российских и зарубежных металлургических заводов. Характерной особенностью гильз этой конструкции является воронкообразная область с синусоидальными выпуклостями в верхней части четырех стенок с прямолинейными боковыми участками [20, 21].

Промышленная эксплуатация гильз «ВМ–синус» на Молдавском метзаводе позволила увеличить скорость разливки сталей рядового сортамента в 1,5 раза – до

4,0–4,2 м/мин и довести годовую производительность одной МНЛЗ до 1013 тыс. т при проектной производительности 350 тыс. т [22].

Гильзы «ВМ–sin» также используют при литье круглых заготовок [23]. Например, с целью улучшения качества заготовок и увеличения производительности МНЛЗ–2 ВТЗ провели реконструкцию по проекту ВНИИМЕТМАШ [24–26]. Скорость литья увеличили с 2,6–2,8 до 3,2–3,8 м/мин, в результате время разливки 150–тонной плавки сократилось со 110–120 до 90 мин, чем выровняли циклы подачи ковшей на установку «печь–ковш» и на МНЛЗ–2 [27]. Брак литых заготовок диаметром 156 мм снизился по трещинам и ужиминам в 20 раз, кроме того в 1,25–1,4 раза сократился удельный расход огнеупоров промежуточного ковша [28].

На МНЛЗ–1 Волжского трубного завода после замены гильз зарубежных поставщиков гильзами конструкции «ВМ–sin» [29] при производстве заготовок диаметром 156 мм максимальная скорость разливки повысилась до 3,2 м/мин, почти в 10 раз снизилось количество прорывов металла, а средняя серийность выросла с 2,7 до 4,3 плавов [30].

Однако высокая стоимость и сложность изготовления технологической оснастки для производства гильз новых форматов привели к снижению спроса на гильзы «ВМ–sin» на российском рынке.

Фирма «КМЕ» разработала новый способ контроля теплообмена в кристаллизаторе при помощи текстурированной гильзы [31]. При помощи особой производственной операции внутреннюю поверхность гильзы подвергают макротекстурированию. По информации разработчика, конструкция такой гильзы улучшает эффективность смазки, так как во время разливки масло или шлакообразующая смесь (ШОС), попадая в пазы текстуры, улучшает теплообмен в районе мениска. Преимущества текстурированной гильзы заключаются в следующем [32]: контролируемый теплообмен в определенных зонах гильзы кристаллизатора, улучшение качества литых заготовок из–за более однородной корки металла, уменьшение ромбичности заготовок, увеличение срока службы гильзы из–за снижения термических нагрузок. При этом следует отметить, что

после проведения сравнительных испытаний на одном из российских металлургических заводов трех видов гильз кристаллизаторов – текстурированных, «WAVE» и параболических из хромциркониевой бронзы – заказчик выбрал последние по соотношению «цена–качество».

На заводе «Badische Stahl Werke» (Германия) при разливке заготовок сечением 130x130 мм применяют гильзовые кристаллизаторы длиной 1000 мм. Спрейерное водяное охлаждение гильз обеспечивают 60 форсунками при давлении 0,8 МПа и расходе 1000 л/мин на кристаллизатор. В работе [33] отмечено, что спрейерное охлаждение кристаллизаторов обеспечивает их высокую безопасность. Кроме того, по мнению разработчиков, при использовании спрейерного охлаждения гильз потребляется в 1,3 раза меньше воды, чем в кристаллизаторах традиционной конструкции, а устройство кристаллизатора отмечается компактностью и небольшой массой [34-36]. Однако следует отметить, что в открытых источниках не описан опыт применения кристаллизаторов этой конструкции, кроме как на данном заводе.

По мере увеличения производительности МНЛЗ и повышения требований к качеству НЛЗ возрастают и требования к стойкости гильз, в частности, к качеству исходного материала для производства гильз и к износостойкости покрытия. С повышением скорости разливки увеличиваются тепловые потоки от поверхности заготовки к гильзе кристаллизатора, уменьшается толщина затвердевшей корки заготовки и повышается её температура. В следствие этого температура рабочей поверхности гильзы повышается до 200–250 °С. При превышении температуры стенки выше температуры рекристаллизации (разупрочнения) меди в стенке гильзы возникает термическая деформация, приводящая к изменению геометрии гильзы и существенному уменьшению срока её службы.

Изначально для стабильной работы гильз кристаллизаторов производители применяли чистую медь 99,9 %, раскисленную фосфором в количестве 0,015–0,040 %. Температура рекристаллизации у этой меди составляет 280–330 °С. Эту марку меди по международным стандартам называют Cu–DHP, в российском ГОСТе – М1ф. Увеличение скорости разливки стальных заготовок привело к использованию

в качестве исходного материала чистой меди с добавкой около 0,1 % серебра и 0,004–0,008 % фосфора. Для этой марки меди CuAg0,1 (МС по российским стандартам) температура рекристаллизации составляет 370 °С, а удельная теплопроводность 377 Вт/м·К. Этот материал сохраняет высокие теплопроводность и твердость (НВ>60) при длительных периодах работы методом плавки на плавку.

Следующим этапом развития материала для гильз стало применение дисперсионно–твердеющих бронз с содержанием хрома, циркония или никеля. При этом существенно улучшаются механические свойства материала при высоких температурах, однако теплопроводность стенки снижается. Наиболее распространен сплав меди с хромом (0,65 %) и цирконием (0,1 %) – «ELBRODUR® G» по классификации «КМЕ» или БрХЦр – по российским стандартам. В таблице 1.1 приведены основные свойства медных сплавов, используемых для производства гильз фирмой «КМЕ».

Для увеличения стойкости гильз в настоящее время применяют различные виды износостойких покрытий гильз кристаллизаторов: однослойное (Cr, Ni), двухслойное (Ni–Cr), трехслойное (Ni–Co–Cr), керамическое и др.

На МНЛЗ ГУП «ЛПЗ» (г. Ярцево) провели испытания гильз из хромциркониевой бронзы с трехслойным покрытием (Ni–Co–Cr). Применение гильзы этой конструкции – наряду с улучшением качества непрерывно-литых заготовок – позволило увеличить стойкость таких гильз до 50000 т и выше, что в 3 раза превышает стойкость гильз традиционной конструкции [37]. По данным [38], используя на МНЛЗ–3 завода «АрселорМиттал Темиртау» (Казахстан) гильзы этой конструкции при производстве заготовок сечением 130x130 и 150x150 мм, увеличили скорость разливки на 20 %.

В случае применения электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе при литье заготовок большого формата для изготовления гильз используют материал «ELBRODUR® GR». Уменьшение удельной электропроводности этого материала, при одновременном сохранении механических свойств, обеспечивает

Таблица 1.1 – Свойств медных сплавов, применяемых фирмой «КМЕ» для производства гильз [32]

№ п/п	Свойства материалов	T, °C	Единицы измерения	DHP (M1ф)	CuAg0,1 (MC)	«ELBRODUR® G» (БрХЦр)	«ELBRODUR® GR»
1.	Химический состав (без меди)	–	%	0,03 P	0,09 Ag, 0,006 P	0,65 Cr, 0,1 Zr	0,65 Cr, 0,1 Zr, 1,5 другие
2.	Удельная электропроводность	20	Ом/мм <sup>2</sup> % IACS	48 83	55 95	50 86	32–40 55–69
3.	Удельная теплопроводность	20	Вт/(м*К)	340	377	355	245–290
4.	Температура рекристаллизации	–	°C	350	370	(700)	(700)
5.	Предел прочности на растяжение, Rm	20	МПа	295	295	425	425
		200		255	255	400	400
		350		(200)	(200)	340	340
		500		(90)	(90)	(210)	(210)
6.	Твердость, HBW	20	2,5/62,5	95	95	130	130

поддержание минимального уровня электромагнитных потерь в стенках такого кристаллизатора и не требует дополнительных затрат энергии в катушках электромагнитного перемешивания.

При этом следует отметить, что использование для производства гильз трубных заготовок из хромциркониевой бронзы приводит к более чем двукратному увеличению стоимости материала и существенно усложняет технологию изготовления гильз. Из-за высокой твердости материала, также известны случаи подвисяния заготовок при использовании на МНЛЗ гильз, изготовленных из сплавов Cu–Cr–Zr.

Также отдельно следует отметить, что применяемые в настоящее время в большинстве случаев на отечественных и зарубежных МНЛЗ гильзовые кристаллизаторы для производства сортовых, круглых и блюмовых заготовок имеют значительный конструктивный недостаток, заключающийся в том, что для центрирования рубашек охлаждения относительно гильзы используют вкрученные в рубашку болты, требующие отведение от гильзы с учетом её температурного расширения. Вследствие этого кольцевой зазор между гильзой и рубашкой, по которому проходит охлаждающая гильзу вода, может иметь существенные отклонения от заданных значений, что приводит к искажению формы гильзы, в это вызывает разнотолщинность корки слитка на выходе из кристаллизатора. В случае круглых заготовок это приводит к овальности и возникновению продольных трещин, в случае квадратных – к ромбичности и околоугловым продольным трещинам.

Поэтому создание конструкции кристаллизатора, в котором зазор между гильзой и рубашкой охлаждения, предназначенный для прохода воды, формируется с высокой степени точности, обеспечивающей равномерный отвод тепла от стенок гильзы, и следовательно – получение равномерной по толщине корки затвердевающего слитка, является задачей своевременной и актуальной.

Обобщенные современные тенденции развития конструкции кристаллизаторов сортовых и блюмовых МНЛЗ представлены на рисунке 1.1. Из рисунка видно, что в разрабатываемых кристаллизаторах применяются новые



Рисунок 1.1 – Современные тенденции развития конструкции кристаллизаторов

конструкции гильз и стенок, новые материалы, а также инновационные покрытия рабочих поверхностей.

## **1.2. Физические методы воздействия на качество непрерывно-литых заготовок**

Во всем мире владельцы существующих машин непрерывного литья заготовок расходуют значительные средства на то, чтобы принадлежащее им технологическое оборудование МНЛЗ соответствовало современным требованиям. В связи с этим следует отметить, что разработка малозатратных и высокоэффективных новых конструктивных решений является главной задачей настоящей работы, которая заключается в устранении тех дефектов поверхности и макроструктуры НЛЗ, которые не могут быть полностью ликвидированы даже при оптимальной конструкции оборудования МНЛЗ и рациональных технологических параметрах непрерывного литья.

В данной ситуации особую значимость в достижении требуемых качественных показателей производимой продукции обретают различные способы экзогенного физического воздействия на затвердевающий расплав, предполагающие интенсивное вмешательство в процесс кристаллизации непрерывных заготовок по ходу разливки.

Несмотря на обеспечение соответствующей подготовки расплава к разливке, качество стали формируется непосредственно в кристаллизаторе и в предкристаллизационный период при переходе расплава из жидкого состояния в твердое. Анализ и учет особенностей гидродинамики движения расплава, теплопереноса и физико-химических процессов, происходящих на стадии затвердевания, позволяет разработать соответствующие мероприятия по усовершенствованию технологии разливки, конструкции МНЛЗ и кристаллизатора [39].

Современные исследования свидетельствуют о том, что даже материалы с одинаковыми размерами зерна могут различаться по свойствам, если они получены

разными способами. Поэтому очень важно с помощью каких средств будет достигнуто получение качественной металлопродукции. Известно, что при выборе технологии в каждом конкретном случае следует прежде всего исходить из её экономичности, эффективности и экологических норм [3].

Существуют разные способы классификации физического воздействия на непрерывно-литые заготовки в процессе разлива. Например, все основные способы можно поделить на 3 группы [39]:

— внедрение в расплав колебаний и давлений: низкочастотная и высокочастотная (ультразвуковая) вибрация;

– перемешивание расплава под воздействием газоимпульсной обработки, электромагнитного поля, продувки инертными газами и специальных механических мешалок;

– введение в жидкую сталь концентрированных источников энергии: влияние на расплав взрывом или электроимпульсом.

Также известны и другие схемы классификации.

Влияние *электрогидроимпульсного воздействия* на расплав основывают на создании периодического импульса в электроразрядном генераторе упругих колебаний (ЭГУК) и их передачу через гибкую мембрану в формирующийся слиток. ЭГУК представляет собой замкнутую емкость с электродом, помещенным в циркулирующую в ней воду низкого омического сопротивления. При электрогидроимпульсной обработке ударная волна ведет к образованию кавитационного эффекта и созданию ограниченных турбулентных потоков вдоль фронта кристаллизации. Данное явление влечет за собой интенсификацию теплоотдачи от жидкой фазы, механическое разрушение двухфазной зоны и возникновение дополнительных центров кристаллизации [40-43].

При проведении испытаний электрогидроимпульсного воздействия получили снижение центральной пористости и снижение длины жидкой фазы на 11 % [44-48].

На ряде металлургических заводов СНГ также успешно исследовали этот способ воздействия на кристаллизующуюся осевую зону заготовки [49]. В камерах

ЭГУК, расположенных на разных уровнях МНЛЗ и вплотную прижатых мембранами к поверхности заготовки, циклично производили электрические разряды. Создаваемые ими колебания передавались через мембраны корке заготовки и её жидкой сердцевине. В результате данного воздействия улучшилась макроструктура и химическая однородность заготовок [49].

В результате повысилась структурная, химическая и физическая однородность заготовок [49]. Однако из-за сложности применения эта технология электрогидроимпульсного воздействия не нашла широкого применения.

По мнению авторов работы [50], среди статических методов физического воздействия на кристаллизующийся слиток перспективным является способ ***ввода в кристаллизатор через мениск металла модификаторов и инокуляторов***. При этом изменяется форма, вид и характер неметаллических включений, что приводит к улучшению механических и технологических свойств стали [51].

Лучшие результаты по усвоению модификаторов жидким металлом и влиянию на служебные свойства стали получают при совместном применении хотя бы по одному элементу из каждой группы модификаторов, например, ванадия или ниобия совместно с кальцием – комбинированных модификаторов [50].

Итальянский металлургический научно-исследовательский центр разработал технологию ввода модификаторов при помощи порошковой проволоки, которая позволяет улучшить качество металла и поверхности непрерывно-литых заготовок. Основываясь на этих исследованиях, фирма «Terni Acciai Speciali» (Италия) смонтировала установку по вводу порошковой проволоки через стопор промежуточного ковша в струю металла между промежуточным ковшом и кристаллизатором. Расстояние между витками и их диаметр выбирали в зависимости от глубины ванны металла и температуры стали [52, 53].

В работе [54] предложили метод введения сплава ФС30РЗМ20 в кристаллизатор в виде гранул 5–15 мм на поверхность шлакообразующей смеси. Модификатор имел плотность в 2,0–2,5 раза большую, чем ШОС, проникал на границу раздела шлак-жидкий металл и растворялся в нем. Часть образующихся неметаллических включений ассимилировалась ШОС. По результатам

проведенных исследований установлено, что такой способ модификации металла в кристаллизаторе существенно повышает степень усвоения активных элементов. В результате модифицирования количество неметаллических включений в стали снижается в 1,5–2,0 раза, а ударная вязкость проката повышается на 20–30 % [54].

Перспективным способом повышения качества макроструктуры НЛЗ признали применение добавок ультрадисперсных тугоплавких веществ, обладающих проводимостью металлического типа – нанопорошковых модификаторов [55-59]. Нанопорошковые модификаторы (TiN, TiCN, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др.), считаются активными центрами кристаллизации с высокой удельной поверхностью, чем обеспечивают ускоренное и более равномерное затвердевание стали, измельчение зерна, диспергирование и рассредоточение неметаллических включений [60, 61], а это приводит к преимущественно объемному затвердеванию с образованием однородной дисперсной структуры глобулярных кристаллов и к подавлению ликвационных процессов.

При введении в кристаллизатор порошковой проволоки с содержанием нанопорошковых инокуляторов (НПИ) 0,003–0,007 % [61], плотность заготовок снижалась, по сравнению, с введением ленты в промежуточный ковш. Такие же результаты установили при внедрении порошковых добавок в жидкую сталь. Так, например, при введении в промежуточный ковш ленты с НПИ в количестве 0,015–0,026 %, эффективность модифицирования металла была выше, чем при вводе в кристаллизатор порошковой проволоки в количестве 0,003–0,007 %.

По результатам проведенных исследований установлено, что модифицирование металла в кристаллизаторе и промежуточном ковше МНЛЗ нанопорошковыми материалами приводит к объемно-последовательной кристаллизации расплава. При этом изменяется кристаллическая структура заготовок: вместо столбчатой формируется зона равноосных кристаллов, что приводит к сокращению дендритной структуры слитка, повышается его плотность, снижается химическая неоднородность и улучшаются механические свойства заготовок [60-62].

По данным работы [58], введение порошковой ленты в приемную ванну промежуточного ковша МНЛЗ позволяет использовать нанопорошковые материалы в промышленных масштабах для повышения качества металлопродукции.

В работе [63] описывали несколько способов ввода инокуляторов в процессе непрерывной разливки. Разработали методику ввода в виде газовой взвеси инокулирующего порошка через полый стопор-инжектор и распределение его в кристаллизаторе.

В настоящее время применение инокуляторов и модификаторов при непрерывной разливке стали, кроме как на заводе фирмы «Italsider», не нашло промышленного применения.

Известно, что для формирования протяженной зоны равноосных кристаллов, следует разливать сталь с минимальным перегревом над температурой ликвидус. В связи с этим, на большинстве МНЛЗ сталь разливают на нижнем температурном пределе. Одним из способов увеличения зоны равноосных кристаллов в непрерывно-литых заготовках и улучшения качества проката является *использование расходуемых и нерасходуемых холодильников* [64–68].

В работе [69] исследовали две технологии непрерывной разливки, позволяющие практически полностью исключить или значительно снизить осевую ликвацию элементов при производстве заготовок сечением 250–300×1550–1850 мм – использование консольных охлаждаемых перегородок в кристаллизаторах и введение макрохолодильников в жидкую лунку кристаллизатора МНЛЗ.

По мнению исследователей [70], ввод расходуемых холодильников в расплав через мениск кристаллизатора в виде металлических порошков, ленты, дроби или гранул из стали того же состава, что и разливаемый металл, в зависимости от фракции и их количества, создает хорошие условия для локального возникновения центров кристаллизации.

В работе [71] исследовали влияние ввода в расплав макрохолодильников в виде стальной ленты на процессы затвердевания непрерывно-литой заготовки.

В патенте РФ №2407606 [72] описывали способ улучшения структуры непрерывных заготовок, используя ввод ленты в кристаллизатор. По мнению авторов, такая технология обеспечила увеличение дисперсности кристаллической структуры НЛЗ, снижение степени ликвации химических элементов по всему сечению заготовок.

В работе [73] отметили, что ввод в кристаллизатор макрохолодильников в виде стальной ленты в качестве расходуемых холодульников при непрерывной разливке стали позволил получить структуру литой заготовки, приближенной к катаной.

По данным работы [74], при вводе в кристаллизатор 220x1000 мм стальной полосы сечением 100x3 мм со скоростью 3,6 м/мин температура перегрева расплава уменьшилась на 5 °С, а металлургическая длина – на 2,9 м. При введении такой же полосы со скоростью 6 м/мин – на 9 °С и 3,7 м соответственно.

В работе [75] исследовали ввод в кристаллизатор 300x2300 мм стальной ленты сечением 400x1,5 мм из стали Ст45. По результатам работы отметили, что ввод ленты стабилизирует гидродинамические и тепловые потоки в кристаллизаторе, что приводит к улучшению условий кристаллизации заготовок.

В дальнейшем, развивая это направление с целью улучшения условий кристаллизации, в ряде работ реализовали технологию ввода микрохолодильников в промковш или кристаллизатор [76-80].

По результатам моделирования в работах [81, 82] получили зависимости между требуемым количеством микрохолодильников и температурой разливаемой стали, корреляции которых позволяют установить рациональные области температуры разливки и количества микрохолодильников.

В статье [82], используя математическое моделирование, исследовали периодический ввод в кристаллизатор микрохолодильников диаметром 2–3 мм в количестве 1, 2, 3 % от веса стали при разливке заготовок диаметром 350 мм из трубных марок стали. По результатам работы определили изменение скорости роста фронта кристаллизации при вводе различного количества микрохолодильников.

В работе [83] рассмотрели промышленную технологию непрерывной разливки углеродистых сталей с вводом в расплав сплава-микрохолодильника. Гранулы того же химического состава, что и разливаемая сталь, вводили непосредственно в кристаллизатор сечением 270x240 мм. По данным исследователей, введенные микрохолодильники обеспечили дисперсность кристаллической структуры и снижение степени ликвации химических элементов по всему сечению заготовок.

Следует отметить, что технология ввода макро– и микрохолодильников обладает существенным недостатком – это возможное загрязнение макроструктуры заготовок экзогенными шлаковыми и эндогенными неметаллическими включениями. По данным исследователей [84, 85], при наложении на холодильник определенной частоты, исключалось намораживание на него жидкой ШОС и затягивание её в расплав, при этом качество макроструктуры слитков широкого марочного и размерного сортаментов значительно улучшалось. По мнению авторов работы [70], наложение разночастотных колебаний на вводимые макрохолодильники существенно повышают эффективность воздействия на процессы кристаллизации и структурообразование непрерывно-литой заготовки. Однако исследования этой технологии закончили на уровне проведения промышленных экспериментов.

По мнению авторов работы [40], **вибрационная обработка** кристаллизующихся расплавов благодаря простоте своей конструкции, эксплуатации и обслуживания, а также – низкой стоимости, открывает большие возможности для её широкого применения в процессе непрерывной разливки стали. В работе отдельно отметили, что наряду с измельчением кристаллической структуры, преимущества технологии наложения вибрации заключаются в том, что при её применении, многократно снижается удельный расход энергии на улучшение качества макроструктуры заготовок по сравнению с использованием ультразвука или электромагнитного перемешивания [40].

Ряд исследователей [86-90] предложили применять обработку расплава и заготовок вибрационными воздействиями в промковше и в кристаллизаторе с

целью интенсификации гидродинамических процессов, что, в свою очередь, приводит к усилению теплообменных процессов в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения.

В работах [91, 92] исследовали наложение вибрации на расплав в разливочном отсеке промежуточного ковша упругими высокодинамичными колебаниями, что привело не только к дополнительному снижению количества неметаллических включений на 30–40 %, но и 4–5-кратному измельчению самих включений.

Ряд трудов посвятили изучению вибрации с использованием физического моделирования на камфене [93, 94]. Например, в работах [94, 95] изучили влияние вибрации на теплофизические условия формирования непрерывно-литых заготовок. Параметры вибрации были следующие: частота 35–100 Гц, амплитуда 0,5–2,5 мм. По результатам исследований установили, что наложение виброимпульса на кристаллизатор и заготовку усилило теплоотвод от затвердевающего слитка по всей зоне кристаллизации. Кроме того, интенсивность отвода тепла в кристаллизаторе и самой заготовке увеличилась соответственно на 3–4 и 7 %, что повысило в среднем на 10 % скорость кристаллизации расплава и изменило дисперсность кристаллической структуры. На основании изучения кинетики затвердевания заготовок сечением 220x280 мм на физической модели установили [95], что использование виброобработки уменьшает на 10–20 % зону двухфазного состояния в месте бокового воздействия на кристаллизатор, и увеличивает её на 25–30 % в зоне окончания затвердевания. Длительность нахождения расплава в двухфазном состоянии сократилось на 15–20 %.

В работе [96] исследовали влияние вибрации на формирование полунепрерывных заготовок из алюминиевых сплавов. В опытных образцах, разлитых с применением вибрации, отметили повышение плотности металла и более равномерное распределение неметаллических включений.

Экспериментальные данные работы [97] свидетельствуют о том, что наложение вибрации частотой 50 Гц и амплитудой 0,2 мм на стенки кристаллизатора увеличивает интенсивность теплоотдачи в 1,2–1,3 раза. По

данным исследователей, при поперечной вибрационной обработке в кристаллизаторе слябовых заготовок толщиной 180 мм из среднеуглеродистой стали плотность теплового потока увеличилась на 50–100 %. А в работе [39] отметили, что при применении мощных электрогидроимпульсных вибраторов – кроме указанного воздействия на границу затвердевания – возможны условия для активизации нерастворимых примесей в поле развитой кавитации.

При изучении эффективности влияния вибрационной обработки на формирование структуры заготовок сечением 150x1000 мм из стали марок Ст3 и сталь 35 установили уменьшение балла по осевой ликвации в среднем в 1,8 раза, повышение плотности дендритной структуры до 30 %, снижение числа участков, пораженных шнуровой ликвацией, более равномерное по длине и в промежуточной осевой зоне заготовок распределение неметаллических включений и ликватов [98].

В работе [99] отметили, что при вибрационном воздействии на кристаллизирующийся металл происходит уплотнение центральной зоны заготовки, увеличение скорости кристаллизации и значительное снижение ликвации.

Исследования [100] обработки вибрацией в кристаллизаторе заготовок сечением 250x1500 мм из углеродистых и легированных марок стали проводили при частоте 1500–3000 кол/мин и амплитуде 0,5–2,5 мм. Сравнение серных отпечатков и поперечных темплетов заготовок показало значительное улучшение качества слябов, разлитых с виброобработкой металла при его кристаллизации. Также отметили улучшение механических свойств листового проката толщиной 20 мм, произведенного из опытных слябов: предел текучести вырос на 7–8 %, ударная вязкость после старения возросла на 8–30 %, а при отрицательной температуре – на 8–9 %.

По данным работы [101], наложение вибрации на расплав в кристаллизаторе возможно как посредством охлаждаемого холодильника, вводимого в жидкую сталь, так и через стенки кристаллизатора с использованием специальных излучателей, создающих колебания с частотой 20–35 кГц.

В работе [102] на физических и механических моделях изучали влияние вибрационного воздействия на теплопередачу от жидкой лунки заготовки к охлаждающей среде зоны вторичного охлаждения. Анализ результатов экспериментов показал, что воздействие вибрацией на заготовку в зоне вторичного охлаждения приводит к интенсификации теплообмена между твердой и жидкой фазами. При рациональной интенсивности вибрационного воздействия величина теплового потока к поверхности кристаллизатора по данным исследователей составляет 1,9–2,5 кДж/м<sup>2</sup>, что в 1,35–1,45 раза выше, чем без вибрационной обработки. При наложении вибрации на металл через волновод к указанным термическим сопротивлениям добавляется акустическое сопротивление, и эффективность его воздействия на теплообмен в заготовке уменьшается.

В работе [103] исследовали комплексное влияние газоимпульсного перемешивания металла в кристаллизаторе и вибрации в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) при непрерывном литье блюмовых заготовок. Вибратор, создающий колебания частотой до 1000 мин<sup>-1</sup> и амплитудой 1,5 мм, разместили на стойках опорных роликов ЗВО со стороны малого радиуса на расстоянии 0,3–0,5 м от нижнего среза кристаллизатора. В соответствии с приведенными данными, применение вибрационного воздействия в ЗВО совместно с газоимпульсным перемешиванием в кристаллизаторе повышает плотность металла и снижает анизотропию свойств по сечению заготовки.

Таким образом, полученные результаты показали перспективность применения вибрации для интенсификации гидродинамических процессов, происходящих в жидкой лунке непрерывно-литых заготовок, усиливающих теплообменные процессы по всей зоне кристаллизации и способствующих повышению производительности МНЛЗ.

Однако несмотря на проведение многочисленных исследований и полученные положительные результаты, вибрационная обработка из-за сложности применения до настоящего времени не нашла широкого распространения при непрерывном литье сортовых и блюмовых заготовок.

*Ультразвуковое воздействие.* Ультразвуковую (УЗ) обработку расплавов черных и цветных металлов с целью улучшения их свойств неоднократно описывали в научно-технической литературе [104-108]. Ультразвук — это упругие колебания с частотой выше 16 кГц, вводимые в расплав, способствующие его дополнительному перемешиванию и дегазации, препятствующие концентрации неметаллических включений на границах зерен и обламывающие растущие дендриты [109]. В работах [110, 111] провели испытания способов воздействия на расплав ультразвуком: в кристаллизаторе — через водоохлаждаемую воронку, в зоне вторичного охлаждения — через кристаллизующуюся корку слитка, через направляющие ролики и др.

В работе [112] исследовали влияние УЗ-обработки расплава на качество поверхности непрерывно-литой заготовки из сплава Al - 1 % Si. Применение при непрерывном литье ультразвуковой обработки расплава мощностью 1000 Вт привело к измельчению зерна, а средний размер зерна снизился до 31,2 мкм.

В ЦНИИчермет им. И.П. Бардина совместно со специалистами АО «ММК» создали технологию модифицирования макроструктуры непрерывных слитков, построенную на обработке жидкой стали механическими колебаниями особой частоты, вводимыми в расплав через стенки кристаллизатора и вибрирующую стальную полосу [113, 114]. Исследователи отметили, что при выборе частоты воздействия, совпадающей с частотой собственных колебаний, в системе достигался резонанс. В таком случае даже при небольшой мощности возбуждающих колебаний многократно возрастала результирующая амплитуда. По мнению авторов, для повышения качества заготовок в кристаллизующийся металл, помимо самого УЗ-воздействия, следует дополнительно вводить ленту из низкоуглеродистой стали. Воздействие ультразвука на вводимую ленту, снижающую перегрев металла в кристаллизаторе, вызвало её дробление и образование в жидком металле новых центров кристаллизации.

В работах [115, 116] описывали опыт применения УЗ-обработки на машине полунепрерывной горизонтальной разливки прутков диаметром 12 мм из медных сплавов МНЖКТ. По результатам проведенных исследований выявлено, что

ультразвуковые колебания с резонансной частотой  $\sim 19$  кГц, вводимые в расплав, способствуют дополнительному перемешиванию, интенсифицируют процесс дегазации, способствуют дроблению неметаллических включений и препятствуют образованию дендритной ликвации на границах зерен.

Необходимо также отметить, что УЗ-воздействие на непрерывно-литую заготовку приводило к загрязнению расплава в кристаллизаторе вводимыми в него элементами влияния на структурообразование слитка, такими, например, как вибрирующая лента. В настоящий момент технологию ультразвукового воздействия при непрерывной разливке стали применяют на уровне экспериментов, и она не нашла промышленного использования.

*Мягкое обжатие* (МО) реализуют в процессе непрерывной разливки путем наложения избыточного давления в роликовых клетях, расположенных последовательно по длине непрерывно-литого слитка в зоне его окончательного затвердевания. В процессе затвердевания заготовок с широким интервалом кристаллизации при содержании жидкой фазы в пределах 30–70 % появляются перемычки («мосты»), которые препятствуют попаданию маточного расплава в зону окончательного затвердевания и приводят к образованию осевой пористости. При этом в образующиеся пустоты проникает расплав из междендритных пространств, обогащенный ликвирующими элементами, что является причиной образования осевой ликвации. Поэтому технологию МО наиболее эффективно используют при литье крупноформатных заготовок из высоколегированных и высокоуглеродистых марок стали с широким интервалом кристаллизации [117, 118].

В момент применения мягкого обжатия из-за увеличения давления на заготовку жидкая сердцевина с ликвирующими элементами вытесняется из зоны окончательной кристаллизации, что приводит к уменьшению осевой ликвации. Кроме этого, в процессе обжатия разрушаются оси дендритов у фронта кристаллизации, увеличивая в двухфазной зоне число центров кристаллизации, компенсируя усадку металла при затвердевании и разрушая перемычки, в

результате подавляются процессы формирования осевой ликвации и центральной пористости [119, 120].

Известные методы мягкого обжатия делят на две группы: статические и динамические. При статическом методе обжатие производят в одних и тех же роликовых клетях, то есть обжатие является «статическим» (неподвижным) относительно линии МНЛЗ. Например, при разливке заготовок сечением 150x150 мм из стали 5сп на МНЛЗ Енакиевского металлургического завода [121] при обжатии 2,5 мм посредством применения повышенного давления в тянущих клетях средний балл по центральной пористости снизился с 2,0 балла до 0 балла, а осевой ликвации – с 2,5 балла до 0,5 балла. При этом средний балл по осевым трещинам остался неизменным [122]. Однако «статический» метод мягкого обжатия имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что его эффективность значительно снижается при изменении сортамента разливаемой стали, скорости разливки и режима вторичного охлаждения. Отклонения от установившегося процесса разливки приводят к изменению расположения лунки жидкого металла относительно роликовых клетей, производящих процесс мягкого обжатия. Вследствие этого снижается эффективность применяемого метода: при раннем обжатии не происходит полная обработка роликами двухфазной зоны заготовки, а при позднем – существенная часть заготовки имеет уже практически сформировавшуюся кристаллическую структуру со всеми вышеописанными дефектами.

В настоящее время при разливке заготовок широкого размерного и марочного сортаментов, в основном, применяют динамическое мягкое обжатие, при котором в процессе разливки обеспечивают непрерывный контроль за границами обжатия, величиной хода гидроцилиндров каждой клетки и выбором соответствующих роликовых пар, производящих обжатие заготовки. Вследствие этого зона мягкого обжатия при изменении режимов разливки может перемещаться относительно технологической оси МНЛЗ [123].

В случае применения технологии мягкого обжатия требуется точная установка места приложения усилия обжатия с определением соотношения

твердой и жидкой фаз, технологии обжатия, порядка приложения усилия к поверхности слитка. Наибольшее подавление осевой ликвации достигается при минимальных колебаниях технологических параметров разлива, что возможно лишь при комплексной автоматизации технологических процессов и детальном контроле всего цикла сталеплавильного производства. Эффективность метода мягкого обжатия может быть обеспечена лишь в случае, когда воздействие роликов на корку кристаллизующейся заготовки прикладывают в местах, где соотношение жидкой фазы к твердой находится в интервале 0,3–0,7. В случае, когда доля жидкой фазы превышает 0,7, приложение давления к корке заготовки может привести к некоторой интенсификации конвективного течения расплава в двухфазной зоне, при этом влияние мягкого обжатия на процессы, происходящие в осевой зоне заготовки, будет минимальным [124]. В этом случае на фронте кристаллизации могут возникнуть растягивающие напряжения, приводящие к образованию внутренних трещин. В противном случае, при доле жидкой фазы менее 0,3, существенно возрастает сопротивление закристаллизовавшегося каркаса заготовки. Преодоление этого сопротивления может привести к появлению внутренних трещин в температурном интервале хрупкости. Если обжатие приложить поздно, а сердцевина слитка уже затвердела, то в заготовке устраняют лишь пористость, а ликвация не снижается [125].

В настоящее время практически все передовые мировые машиностроительные компании при проектировании слябовых и блюмовых МНЛЗ предусматривают применение на них технологии мягкого обжатия. Например, трехручьевую МНЛЗ-1 завода «Pohang» компании «Posco», производящую заготовки сечения 400×500 мм из высококачественных сталей широкого марочного состава, оснастили оборудованием МО [120]. На МНЛЗ на каждом ручье установили 11 секций для мягкого обжатия заготовок. Во всех этих секциях верхние ролики были приводные.

Технология мягкого обжатия DynaGap SoftReduction компании Siemens VAI (Австрия) [125] включает трехмерную систему термического отслеживания для расчёта в режиме реального времени температурного поля непрерывного слитка.

Эту технологию впервые освоили в 2003 г. на блюмовой МНЛЗ завода Panzhiqua Iron and Steel Group Co. (Китай). Впоследствии в 2006 г. данное технологическое решение применили на 5-ручьеовой блюмовой МНЛЗ завода Wuhan Iron & Steel Co. Ltd. (КНР). Исследование блюмов небольшого квадратного сечения, разлитых с использованием технологии МО, продемонстрировало практически полное отсутствие следов сегрегации и лишь незначительную центральную пористость [126].

В 2009 г. на МНЛЗ-3 Белорусского металлургического завода также внедрили систему динамического МО компании «Danieli» при производстве блюмов сечением 250x300 и 300x400 мм. Тянуще-правильный механизм состоял из девяти модулей, на каждом из которых осуществляли обжатие роликами. Система МО предусматривала рациональный диапазон зоны начала и окончания мягкого обжатия для всего марочного сортамента разливаемых сталей при доле твердой фазы в заготовке в интервале 0,2–0,8 [119, 126-128].

В 2012 г. компания «Danieli» переоборудовала МНЛЗ-2 ЕВРАЗ ЗСМК, производящую заготовки сечением 300x360 мм. После реконструкции производительность МНЛЗ выросла на 25 % до 140 т/ч. При работе МНЛЗ по схеме «летающих» промежуточных ковшей обработка заготовок, основанная на сочетании микро-электромагнитного перемешивания с «мягким» и «жестким» обжатиями (последнее выполняют усовершенствованными системами МО со специальными программами), позволила получить непрерывно-литые заготовки с тонкой микроструктурой и малой центральной пористостью по всему сортаменту, в том числе – по рельсовым маркам стали [129, 130]

Кроме того, применение технологии мягкого обжатия при непрерывной разливке стали достаточно широко осветили в ряде других работ [4, 131-140]. Например, в работах [141, 142] положительные результаты получили при литье заготовок сечением 150x150 и 180x180 мм из стали марок С72D и 54SiCr6 на 6-ти ручьеовой МНЛЗ завода «Saarstahl AG» (Германия). МО заготовок обеспечивали в тянуще– правильном узле длиной 8 м, состоящем из 12 роликовых пар с верхними приводными роликами, установленных на 6-ти сегментах. Разработчики

технологии считали, что процесс затвердевания слитков является динамическим и зависит от нескольких параметров: скорости разливки, химического состава стали, конструкции и режима вторичного охлаждения и т.д. Вследствие этого, все пары роликов имели установленную величину обжатия, что соответствовало процессу кристаллизации в конкретный момент времени. Вследствие этого, по мнению разработчиков, при любых изменениях технологических режимов разливки кристаллизирующийся слиток будет получать требуемую степень деформации [141, 142].

Однако на основании анализа проведенных экспериментов сделали вывод, что существует целый ряд серьезных препятствий для эффективного применения мягкого обжатия при непрерывной разливке стали:

- обжатие заготовок необходимо производить в фиксированных местах линии МНЛЗ, что предъявляет дополнительные требования к контролю определенных параметров разливки, включая температуру жидкой стали и режимы вторичного охлаждения, так как, в ином случае, смещается положение зоны окончания затвердевания и требуемый эффект не может быть достигнут;

- для обжатия слитков требуется приложение существенных усилий, значение которых возрастает пропорционально увеличению доли твердой фазы. Однако при нарастании процента жидкой фазы в структуре заготовки эффект динамического обжатия резко снижается из-за простого перетекания металла, что фактически исключает устранение осевой ликвации и центральной пористости;

- возможно выпучивание заготовок между роликами при обжатии заготовок несколькими парами роликов. Кроме того, такая деформация слитков может вызвать развитие осевой ликвации и появлению ликвационных полосок;

- в случае разливки заготовок широкого размерного и марочного сортаментов, технологию мягкого обжатия приходится претворять разными способами.

Кроме того, следует отметить, что в настоящее время из-за высокой стоимости внедрения, сложности настройки и эксплуатации, технология мягкого обжатия не нашла широкого применения при непрерывном литье сортовых и

блюдомых заготовок, однако достаточно распространена при производстве высококачественных слябов [64, 143-162].

Как подчеркивалось ранее, при любых методах мягкого обжата воздействие на слиток начинают, когда значительная его часть – от 70 до 30 % – закристаллизовалась, и улучшение качественных характеристик слитка происходит в основном в его осевой зоне. Поэтому, как следует, например, из [120], стремление получить высококачественную НЛЗ приводит к необходимости применения электромагнитного перемешивания, особенно в кристаллизаторе, где управление процессом кристаллизации становится такой же важной задачей, как МО в зоне окончания затвердевания.

***Перемешивание расплава.*** Для оптимизации гидродинамических потоков расплава с целью создания благоприятных условий для удаления неметаллических включений предлагают применять различные системы перемешивания жидкой стали в промковшах. Наряду с продувкой расплава инертными газами через блоки в днище промковша [163, 164] описаны отдельные способы электромагнитного перемешивания.

В работе [165] рассмотрено моделирование процесса перемешивания жидкой стали в промковшах 2-х ручьевого слябовой и 6-ти ручьевого сортовой МНЛЗ с помощью индукционного статора. По мнению авторов, применение индукционного ЭМП в промковше приводит к выравниванию температуры жидкой стали и удалению неметаллических включений.

В работах [166, 167] исследовали применение индукционного ЭМП, расположенного под промковшом. При этом способе стакан-дозатор промковша встроили в перемешивающее устройство вращающегося типа. По результатам испытаний выявлено, что применение устройства ЭМП устранило отложение неметаллических включений в канале стакана-дозатора, увеличило безаварийное время разлива и повысило производительность МНЛЗ. В работах [168, 169] описана организация вихревого движения стального расплава в момент прохождения канала погружного стакана за счет наложения магнитного поля с переносом вращательного движения в жидкий металл. По результатам

проведенных исследований установлено, что использование защитного стакана с катушкой электромагнитного перемешивания повысило его стойкость, уменьшило глубину проникновения струи и повысило температуру мениска, что положительно сказалось на качестве НЛЗ и стабильности всего процесса разлива. Недостатком этого способа физического воздействия считается его низкая эффективность по причине слабого вращательного движения, вносимого расплавом в объем кристаллизатора, сложность конструкции с необходимостью охлаждения статора, расположенного чрезвычайно близко к расплаву в кристаллизаторе.

По мнению авторов работы [170], наиболее целесообразным является использование кондукционного электромагнитного перемешивания (КЭМП), в котором внешнее магнитное поле взаимодействует с током, введенным в металл от источника питания через контактные элементы. В работах [171, 172] предложили конструкцию, при которой КЭМП представляет собой отъемную футерованную ванну с корпусом из немагнитной стали, расположенную в торце промковша слябовой МНЛЗ между полюсами электромагнита. Вдоль оси промковша в ванну электромагнита через электрическую дугу подвели постоянный ток, что способствовало не только движению расплава, но и подогреву жидкой стали. По мнению разработчиков, использование КЭМП позволило создать большее силовое воздействие на расплав по сравнению с применением индукционных перемешивателей [173, 174].

Для уменьшения зоны столбчатых кристаллов многие исследователи предложили различные способы перемешивания расплава на участке формирования непрерывно-литых заготовок. При перемешивании создавали принудительное движение жидкой фазы относительно фронта кристаллизации с целью достижения скорости, превышающей скорость конвекционных потоков.

Известно несколько основных способов перемешивания расплава на участке формирования НЛЗ: газоимпульсное, механическое, пульсационная продувка инертным газом, с помощью безнапорных погружных стаканов и электромагнитное.

В работе [40] *газоимпульсное перемешивание (ГИП)* отмечается как один из наиболее эффективных способов перемешивания. Сущность ГИП – создание скоростных затопленных потоков стального расплава, способствующих подводу к мениску в кристаллизаторе более подогретого металла и ускорению процесса затвердевания. Это достигается периодичным подводом энергии к расплаву за счет циклического вакуумного всасывания порций металла и его последующего выталкивания из погруженной в жидкую фазу огнеупорной трубы [175].

В работе [176] предложили способ ГИП, сущность которого заключалась в циклическом выталкивании из погружного стакана порций металла за счет периодического нагнетания его в полость инертного газа и его стравливания. При этом, по мнению разработчиков, максимальное давление газа не должно превышать гидростатического напора над верхом выпускных отверстий стакана для недопущения попадания газа в объем обрабатываемого металла и его бурления на поверхности мениска кристаллизатора [176].

По вопросу ГИП также следует отметить работы [175, 176]. В результате экспериментов с использованием ГИП в кристаллизаторе при разливке слябов сечением 300x1850 и 200x1200 мм из углеродистых и низколегированных сталей установили [175, 176]:

- полное время затвердевания опытных заготовок сократилось на 8–10 %;
- протяженность двухфазной зоны в центре заготовок снизилась с 5 до 3 м;
- протяженность зоны столбчатых кристаллов уменьшилась на 25–30 %;
- изменилась форма, размер, количество и распределение неметаллических включений, что снижает брак заготовок и проката по расслою, трещинам и осевой неоднородности.

В работе [177] исследовали применение ГИП при разливке на МНЛЗ слябов из низколегированных и углеродистых марок стали. Исследования макроструктуры опытных заготовок показали снижение количество дефектов макроструктуры, вызывающих расслой листов; осевая зона не имела резко выраженной осевой рыхлости в виде сконцентрированных участков повышенной травимости и крупных пор.

По мнению авторов работ [178, 179], ГИП – это эффективный способ интенсификации массотеплообменных процессов, формирующих в слитке равномерно распределенную по всему сечению мелкозернистую структуру, способствующую повышению плотности и снижению анизотропии свойств металла по сечению заготовок.

Однако из-за низкой стойкости применяемых для продувки огнеупоров и возможного загрязнения расплава экзогенными неметаллическими включениями технология ГИП не нашла промышленного применения.

*Пульсационная продувка металла инертным газом в кристаллизаторе* сочетает два метода физического воздействия на непрерывно-литой слиток: пульсационное перемешивание и продувку расплава инертным газом, что, по мнению авторов работ [180-182], является эффективным способом снижения содержания неметаллических включений и протяженности зоны столбчатых кристаллов. Хотя эта технология проста в эксплуатации и не требует крупных установок, она не получила распространения после проведенных экспериментов.

При *механическом перемешивании* через мениск в кристаллизаторе в расплав вводили специальный активатор, который вследствие вязкого трения при вращении приводил к перемещению и турбулизации жидкой стали. При этом интенсифицировали теплообмен на границе затвердевания. Также при механическом перемешивании снизилась разнотолщинность твердой корки по всему периметру поперечного сечения заготовок. В процессе испытаний механического перемешивания установили, что происходило однонаправленное движение расплава, что, в свою очередь, в ряде случаев вызывает анизотропию химического состава и физических свойств заготовки. Также отметили низкую стойкость активаторов, в связи с чем данный способ не получил широкого применения [183].

В *безнапорном погружном стакане* выходные отверстия выполняют со смещёнными выпускными каналами. При этом способе воздействия значительную часть расплава закручивают в ограниченном объеме кристаллизатора и в таком состоянии подают в остальной объем металла кристаллизатора.

Примером такой технологии является глуходонный погружной стакан марки «FOSULIS», оборудованный «юбкой», закрепленной на нижней наружной части стакана выше выходных его боковых каналов [184-186], расположенных веерообразно по периметру его поперечного сечения. Эта «юбка» цилиндрической или иной формы, при этом нижний край стакана находится выше края «юбки». Результаты опробования таких стаканов на заводе «Lech-Stahlwerke GmbH» (Германия) при разливке заготовок 240x240 мм из подшипниковой стали марки 100Cr6 указали на уменьшение количества неметаллических включений. В настоящее время стаканы этой конструкции проходят испытания на других металлургических заводах [187, 188], однако, по информации из открытых источников, пока не нашли промышленного применения.

При испытаниях на заводе ОАО ММЗ «Серп и Молот» при разливке заготовок сечением 140x140 мм отметили, что применение глуходонного стакана с веерообразно расположенными выпускными каналами привело к вращательному движению поступающих через эти каналы в кристаллизатор струй расплава, и следовательно – к снижению глубины их проникновения в жидкую лунку и к более равномерному по периметру поперечного сечения заготовок температурному полю [189, 190]. По мнению авторов работ [191, 192], такая конструкция стакана обеспечивала более «горячий» мениск в кристаллизаторе, что снизило вероятность образования шлакометаллических корочек и создавало благоприятные условия для всплытия неметаллических включений путем торможения нисходящих потоков [193]. При разливке заготовок сечением 220x280 мм из стали 9ХФ с использованием безнапорного стакана получили в среднем 1,6–1,9–кратное снижение неравномерности фронта затвердевания.

На четырехручьеваой МНЛЗ №1 АО «ЕВРАЗ НТМК» разливают колесобандажный металл в заготовки круглого сечения диаметром 430 мм, рельсовые марки стали и стали специального назначения (подшипниковые, легированные и т.д.) в заготовки прямоугольного сечения 300x360 мм. При разливке колесобандажного металла на комбинате разработали и до настоящего времени применяют способ подвода металла в кристаллизаторы через безнапорные

погружные стаканы специальной конструкции, обеспечивающие повышение чистоты стали по неметаллическим включениям [194, 195]. Схожие результаты отметили в работах [47, 91, 196]. Однако по данным работы [48] применение безнапорных погружных стаканов со смещенными выпускными каналами позволило создавать горизонтальные составляющие потока расплава вдоль фронта кристаллизации лишь в пределах 0,08–0,18 м/с, что недостаточно для создания турбулентного движения. В числе других недостатков использования безнапорных погружных стаканов можно назвать усложнение его конструкции и обслуживания, повышенная стоимость, быстрое затухание гидродинамики расплава в кристаллизаторе прямоугольного сечения, а также возможное появление бурлящих поверхностных слоев в районе мениска, особенно в углах кристаллизатора.

Результаты теоретического анализа основных способов внешнего физического воздействия на кристаллизующуюся заготовку при непрерывной разливке стали представлены на рисунке 1.2.

### **1.3. Существующее состояние электромагнитного перемешивания**

Магнитогидродинамические методы (МГД–методы) внешнего физического воздействия все чаще начинают применять в металлургии и литейном производстве, в том числе и на МНЛЗ, для устранения усадочной рыхлости кристаллизующегося металла, а также для управления процессом затвердевания, т.е. воздействием на кристаллическую структуру формирующегося слитка. При этом формируемые магнитные поля, воздействующие на расплав металла, могут быть постоянными, переменными, бегущими или вращающимися. Каждое из этих полей оказывает свое специфическое влияние на расплав металла при его кристаллизации. Кроме этого, возникают дополнительные эффекты в кристаллизующемся в магнитном поле металла, если расплав движется в этом поле.

Так, при воздействии на статический расплав цинка, алюминия и цинковой бронзы постоянного, импульсного или вращающегося магнитного поля при



Рисунок 1.2 - Анализ основных способов внешнего физического воздействия при непрерывной разливке стали на кристаллизующую заготовку

кристаллизации выявили отсутствие столбчатых кристаллов (дендритов) и по всему сечению слитков цилиндрической формы достигнута мелкозернистая структура, характерная для зоны равноосных кристаллов [197].

Подобный результат связывают с изменением термодинамических и кинетических параметров кристаллизации, а также перемешиванием жидкого металла в вертикальном направлении. Вертикальные потоки металла в процессе его охлаждения приводят к раздроблению столбчатых кристаллов у стенок формы и заносят центры кристаллизации в глубь жидкого металла [198, 199].

Исключение или подавление развития ряда дефектов макроструктуры и поверхности непрерывно-литых заготовок (центральной пористости, подсадочной ликвации, развитой дендритной структуры слитка и др.) многие исследователи связывают с созданием принудительно управляемой циркуляции расплава кристаллизующегося слитка, в частности, с помощью электромагнитного перемешивания.

ЭМП представляет собой процесс создания управляемого движения жидкой фазы затвердевающих заготовок посредством наложения электромагнитных сил.

Под воздействием электромагнитного перемешивания создается принудительное движение расплава относительно фронта кристаллизации, причем, может достигаться скорость большая, чем скорость конвекционных потоков. При этом имеют место следующие физические процессы: ускорение тепло- и массообмена в объеме кристаллизующегося металла, выравнивание градиента температур по сечению непрерывно-литых заготовок и химического состава стали, интенсификация теплопереноса от поверхности заготовок к окружающей среде, разрушение фронта кристаллизации. Образующиеся под воздействием ЭМП потоки способствуют ликвидации остаточного перегрева, поскольку они улучшают на фронте кристаллизации тепло- и массообмен между жидкой и твердой фазами, имитируя литьё с низким перегревом. За счет этого снижается градиент температур на самой ранней стадии затвердевания, а условия для роста столбчатых кристаллов резко ухудшаются. Очевидно, потоками расплава частично разрушается и двухфазная зона, что облегчает подпитку усадочных пустот в процессе

кристаллизации. Кроме того, под действием интенсивного движения расплава концы ветвей дендритов могут оплавляться или обламываться вследствие механического сдвига. Эти частицы затем смешиваются с общей массой, так как жидкий металл может несколько переохладиться вследствие структурного переохладения на концах столбчатых кристаллов. В этих условиях может начаться рост свободных кристаллов. Когда рост зародышей достигнет необходимого уровня, происходит превращение столбчатой структуры в равноосную. Такая трактовка влияния ЭМП на формирование кристаллической структуры заготовок получила название механической [200].

Не исключая возможности механического воздействия потока расплава на растущую в расплаве часть столбчатых кристаллов, в работе [200] развивается «турбулентная» трактовка влияния электромагнитного перемешивания на структуру слитка. По мнению авторов работы [200], турбулизация расплава увеличивает эффективное (кажущееся) значение коэффициента тепловой проводимости на три порядка, а коэффициента диффузии примеси – на шесть порядков. Столь большое возрастание эффективных (кажущихся) значений коэффициентов проводимости тепла и примесей влияет на кинетику кристаллизации охлаждаемого расплава. Это объясняет, почему перемешивание в кристаллизаторе, а не только в зоне вторичного охлаждения, может приводить к зарождению широкой равноосной зоны, вследствие чего следует считать, что ЭМП эквивалентно низкотемпературному литью. Таким образом, при электромагнитном перемешивании создаются условия для подавления роста столбчатых кристаллов, формирования зоны равноосных кристаллов, появления более рассредоточенной центральной пористости и снижения осевой ликвации.

В работе [201] также подчеркивают важную роль турбулентного характера движения жидкой фазы в конкурентной борьбе между столбчатыми и равноосными кристаллами.

Значительный вклад в изучение процессов, протекающих при ЭМП в зоне кристаллизации МНЛЗ, внесли работы отечественных и зарубежных исследователей (среди них следует выделить А.Д. Акименко [202], Ю.А.

Самойловича [200], З.К. Кабакова [203, 204], А.И. Цаплина [205, 206], К.Н. Вдовина [207], В.А. Ефимова [208], Э.В. Щербинина [209-211] Л.А. Верте [212], А.С. Смолякова [213], И.Н. Шифрина [214-216], Ф.С. Солодовника [217], Ю.М. Рогачикова [218-220], Т. Аята [221-222], Л. Бейтельмана [223, 224], С. Кунстрайха [225, 226] и др.), при этом необходимо отметить, что исследовательские работы в этой области продолжаются.

С учетом особенностей кристаллизации непрерывного слитка из легированных, высокоуглеродистых, трубных и других марок стали ответственного назначения, имеющих широкий интервал кристаллизации, и стремления получить максимальный эффект, были сделаны попытки осуществить ЭМП в технологической линии МНЛЗ на двух [227-230], трех [231-233], а иногда и на четырех уровнях [234] (рисунок 1.3).

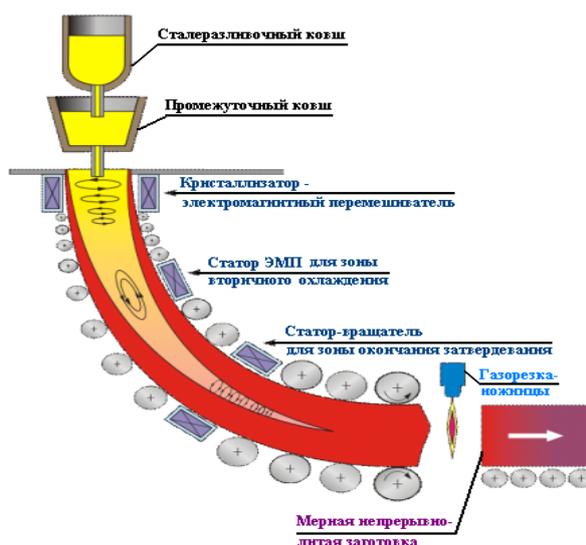


Рисунок 1.3 – Схема электромагнитного перемешивания на МНЛЗ [235]

Количество устройств ЭМП и место их установки определяли для каждой конкретной МНЛЗ, исходя из конструктивных особенностей оборудования, марочного и размерного ассортиментов производимых заготовок, а также – технологии непрерывной разливки [236]. Следует отметить, что применение ЭМП связано с существенными капитальными затратами и текущими эксплуатационными расходами. Поэтому при определении количества устройств

ЭМП, устанавливаемых в технологической линии конкретной МНЛЗ, это обстоятельство также необходимо учитывать.

Устройства ЭМП устанавливают на МНЛЗ, на которых производят заготовки разных форматов: круги [236-243], квадраты [244-248], прямоугольники (блюмы [249, 250], слябы [251-261]) и различных сечений: диаметром от 80 до 1000 мм, прямоугольных заготовок от 100x100 до 457x610 мм, слябов до 500x2200 мм. В настоящее время системы ЭМП нашли широкое применение на современных МНЛЗ российских металлургических заводов.

В России системами ЭМП в кристаллизаторе оснащены сортовые и блюмовые МНЛЗ металлургических комбинатов – Магнитогорского, «Северсталь», ЕВРАЗ «ЗСМК», Челябинского, «Уральская сталь» и Оскольского электрометаллургического, а также – Волжского и Северского трубных, Первоуральского новотрубного, Таганрогского металлургического, «УГМК-Сталь», Нижнесергинского метизного и Омутнинского металлургического заводов. МНЛЗ металлургических заводов «Ижсталь», «Тулачермет-Сталь» и машина полунепрерывного литья заготовок завода «Электросталь» оснащены системами ЭМП на двух уровнях – в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения.

При использовании электромагнитного поля возможно два вида движения расплава в слитке – перпендикулярно движению заготовки при вращающемся магнитном поле, и в плоскости, параллельной движению слитка при помощи бегущего магнитного поля, т.е. с развернутым статором. Очевидно, что выбор типа, конструкции и места расположения устройства ЭМП связаны, в первую очередь, с конструктивными особенностями МНЛЗ и форматом производимых заготовок. В машинах непрерывного литья, производящих слябовые заготовки, применяют системы ЭМП в кристаллизаторе [254-256, 261, 262] или зоне вторичного охлаждения [220, 221, 257-259] только с бегущим магнитным полем [260-262]. В сортовых МНЛЗ используют устройства ЭМП только с вращающимся магнитным полем [248-250]. При литье блюмовых заготовок выбор варианта поля зависит от расположения ЭМП, при этом в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания, при неимении опорных элементов, эффективнее применять перемешиватели с

вращающимся магнитным полем [218, 237, 263, 264]. В ЗВО таких МНЛЗ устройства с вращающимся магнитным полем могут быть установлены исключительно ниже зоны активного поддерживания корки слитка, т.е. на расстоянии, превышающем 4–5 м от мениска в кристаллизаторе [239-241]. Поэтому, если есть потребность производить электромагнитное перемешивание в той части технологической линии МНЛЗ, где установлены секции с поддерживающими роликами, целесообразно использовать статоры с бегущим магнитным полем.

С учетом характера электрического тока различают индукционное и кондукционное ЭМП. Применение кондукционного метода [265-270] требует большой объем жидкой лунки, поэтому этот способ нашел применение в основном на слябовых МНЛЗ. По мнению разработчиков [218], главное преимущество кондукционного метода перемешивания – это его высокая экономичность. Однако этот способ ЭМП не нашел широкого распространения на промышленных МНЛЗ, так как при этом способе присутствует непосредственный контакт между статором и заготовкой.

Для снижения эксплуатационных затрат на перемешивание металла в кристаллизаторе в ряде работ предложили устройство, в котором возбуждение магнитного поля обеспечивали системой постоянных магнитов [271-277]. Принцип действия такого перемешивания основан на вращении магнитной системы с заданной скоростью. Устройство включало двухполюсную магнитную систему, выполненную в виде пары магнитов из композита Nd-Fe-B, закрепленных на внутренней поверхности полого цилиндрического корпуса и установленного вертикально в подшипниковых опорах [278-280].

В настоящее время на сортовых и блюмовых, а также на большинстве слябовых МНЛЗ, применяют в основном индукционные методы ЭМП [281], которые и будут рассмотрены в данной работе.

На основании проведенного анализа в таблице 1.2 представлены тенденции развития систем электромагнитного перемешивания для сортовых и блюмовых МНЛЗ. Рассмотрены новые элементы конструкции и недостатки систем

Таблица 1.2 - Тенденции развития систем электромагнитного перемешивания для сортовых и блюмовых МНЛЗ

№ п/п	Автор, год	Устройство	Сечение заготовок, мм	Тип поля	Место установки на МНЛЗ	Новые элементы конструкции и недостатки
1	2	3	4	5	6	7
1.	Н. Kurth, 1917 [282]	Первое предложение по перемешиванию металла во время затвердевания	н/д	Вращ.	-	н/д
2.	D.A. Shtanko, 1933 [283], A.Bruchanov, 1934 [284]	Опыты по использованию ЭМП при затвердевании металлов.	н/д	Вращ.	-	н/д
3.	S. Junghans, O. Shaaber, 1950-1952 [285, 286]	Пилотные испытания ЭМП на заводах «Schorndorf» и «Huckingen» (Германия).	н/д	Вращ.	Под кристал.	Отдельный контур охлаждения обмоток статора дистиллированной водой.
4.	S. Junghans. O. Shaaber, 1960-е [287]	Испытания ЭМП на заводе «Bohler Works» (г.Карфенберг, Австрия).	н/д	Вращ.	Встроено в кристал.	Полюса статора неремонтопригодны и охлаждаются только с наружной стороны. Из-за низкой проводимости стенок кристаллизатора из Al- бронзы или молибдена питание обеспечивалось током частотой 50 Гц.
5.	«Irsid»/«СЕМ» Франция, 1968 [288]	Пробные испытания устройства ЭМП.	н/д	Вращ.	Под кристал.	Отдельный контур охлаждения обмоток статора дистиллированной водой.
6.	«Irsid»/«СЕМ» Франция), 1973 [289]	Промышленное применение ЭМП на 4-х ручьях МНЛЗ завода «SAFE» (г.Хагондвнж Франция).	240х240	Вращ.	Под кристал.	Отдельный контур охлаждения обмоток статора дистиллированной водой.
7.	«АСЕА—Concast» (Швеция-Швейцария), 1973 [290]	Первое промышленное применение системы АСЕА-Concast на заводе «Кавасаки Сэйтэцу Мидзусима» (Япония).	400х240 /300	Бегущ.	ЗВО	Располагается за роликовой обоймой. установка немагнитных роликов в роликовой проводке. Имеет несколько контуров охлаждения.

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3	4	5	6	7
8.	«Irsid», «Usinor», «Arbed» и «СЕМ», 1974 [291]	Пробные испытания устройства ЭМП.	н/д	Вращ.	В кристал.	Охлаждение полюсов по наружной поверхности
9.	«Rotelec» (Франция), 1977 [289]	Создание фирмы «Rotelec» (Франция). На основании экспериментов, проведенных «Irsid»/«СЕМ» и патентов «USINOR» и «IRSID», технологию начали распространять под маркой «Magnetogug».	н/д	Вращ.	Встроено в кристал.	Катушки изготовлены из медного провода, защищенного водонепроницаемой изоляцией. Обмотка на магнитном сердечнике подвергается пропитке под вакуумом с использованием специальных смол. Особые требования предъявляются к охлаждающей воде по кислотности, количеству металлических включений и их величине.
10.	«IRSID-Rotelec» (Франция), 1977 [289]	Первое промышленное применение системы «Magnetogug» на МНЛЗ завода «Eachweiler Bergwerks Vereinl» (г.Eschweiler, Германия).	100x100-230x230, диаметры 125-250	Вращ.	Встроено в кристал.	
11.	«IRSID», 1977 [292]	Первые испытания статора с бегущим полем на МНЛЗ завода «Allevard works» (La Cheilas).	бюом	Бегущ.	Кристал.	Отдельный контур охлаждения дистиллированной водой.
12.	«ABB» (Швеция), 1979 [293]	Первое промышленное применение системы «MidMEMS» на МНЛЗ завода «Gerdau Ameristeel» (г. Whitby, США).	133x133	Вращ.	-	Предназначено для установки в кристаллизатор (встроенное и наружное исполнение), ЗВО и ЗОЗ. Имеет те же недостатки, что и ModMEMS и MaxMems, описанные ниже.
13.	«Kobe Steel» (Япония. «Rotelec» (Франция), 1981 [289]	Первое промышленное применение системы «Kosmostir-Magnetogug» на МНЛЗ завода «Kobe Steel» (г. Кобе, Япония).	бюом	Вращ.	Вне кристал. (Kobe Steel) и	Особенности системы «Magnetogug» описаны выше. В системе «Kobe Steel» катушки полюса намотаны из медной трубки, охлаждаемой изнутри дистиллированной водой, как и у фирмы

1	2	3	4	5	6	7
					в ЗОЗ (Rotelec)	АВВ. Конструкция обмотки сложна в изготовлении и эксплуатации.
14.	«АВВ» (Швеция), 1982 [293]	Первое промышленное применение системы «МахMEMS» на блюмовой МНЛЗ завода «JFE West Japan Works», Kurashiki (Япония).	300x400	Вращ.	Вне корпуса кристал.	Корпус статора охватывает снаружи корпус кристаллизатора, оба изготовлены из аустенитной стали. Устройство ЭМП, имеет значительные размеры, большой немагнитный зазор и большую потребляемую мощность. Обмотки статора выполнены из полой медной трубки квадратного сечения, изолированной снаружи. Для охлаждения обмотки применяется дистиллированная вода, охлаждаемая в теплообменнике технической водой. Также в полость статора подается сжатый осушенный воздух для предотвращения попадания влаги и электропроводной пыли на электроизоляцию обмотки. Конструкция обмотки трудна в изготовлении и эксплуатации.
15.	ВНИИМЕТМАШ, 1986 [294]	ПСЭН-300x360.	300x360	Бегущ.	ЗВО	Система сложна в эксплуатации из-за наличия трех контуров охлаждения: дистиллированной водой для охлаждения обмотки, технической водой для охлаждения кожуха и сухим воздухом для защиты внутренней полости статора от попадания влаги,

## Окончание таблицы 1.2

1	2	3	4	5	6	7
						пыли и для охлаждения магнитопровода.
16.	«Ispat Sibtek Ink.», «J. Mulcahy Enterprice» («JME»), 1994 [295]	Испытание системы «DualMEMS» на заводе «Saarstahl» (Германия).	120x120, 140x140	Вращ.	Кристал.	Двухкатушечная система ЭМП. Катушка АС-СМ установлена в районе мениска, а М-EMS – в нижней части кристаллизатора. Нижняя катушка предназначена для ЭМП основного объема металл, верхняя – для ограниченного объема металла. Катушки питаются от отдельных источников. Значение режимов тока, частоты и направления вращения проводится также независимо.
17.	«ABB» (Швеция), 1994 [293]	Первое промышленное применение «DualMEMS» на заводе «Arcelor – Mittal» (г.Сонтрекоeur, Канада); «QIT» (г.Трейси, Канада).	120 x 120, 140 x 140, 160 x 160	Вращ.	Кристал.	Статор состоит из 4 или 6 стандартизированных полюсов, состоящих из железного сердечника с электрическими обмотками, заключенного в герметичный корпус из нержавеющей стали. Обмотки полюса охлаждаются снаружи водой кристаллизатора. Система разработана для разлива заготовок сечением до 160x160 мм и диаметром до 400 мм. Система не предназначена для корпусов кристаллизатора нестандартной конструкции..
18.	«ABB» (Швеция), 1995 [293]	Первое промышленное применение системы «ModMEMS» на заводе «Lestel Lesjöfors» (Швеция).	150x150	Вращ.	Кристал.	

электромагнитного перемешивания, применяемых на разных уровнях МНЛЗ. По результатам проведенных исследований установлено, что в основном развиваются конструкции систем ЭМП в кристаллизаторе (наружного и встроенного исполнения, двухуровневые, а также модульные).

На сегодняшний день в мировой практике индукционное ЭМП жидкого металла на МНЛЗ стало неотъемлемой частью современной технологии получения высококачественных заготовок [278]. В результате рост требований к качеству готовой продукции и развитие эффективных средств и методов электромагнитной обработки расплавов привели к тому, что в контрактные требования к качеству НЛЗ стали вносить положения об обязательном применении ЭМП при производстве продукции из высококачественных марок стали.

Многие исследователи отмечают связь металлургического эффекта при ЭМП со скоростью потоков расплава у фронта кристаллизации [201, 296-298]. При этом оптимальная скорость движения металла должна соответствовать нескольким условиям. С одной стороны, она должна превышать некую минимальную величину, при которой неметаллические включения и шлак центрифугируются в центр мениска кристаллизатора. С другой стороны, скорость движения не должна превышать определённую максимальную величину, так как в таком случае, завихрение поверхности мениска может быть настолько глубоким, что невозможно будет вылавливать шлак с зеркала металла. Для устранения газовых пузырей также требуется определённая скорость, зависящая от марки стали и её чувствительности к их образованию.

Величины скоростей, создаваемых ЭМП в жидкой стали, находятся в диапазоне 0,1–1,0 м/с. Так, в работе [299] отметили, что при скорости 0,3 м/с наблюдалось отсутствие ликвации в осевой зоне и измельчение карбидов. При скоростях менее 0,23 м/с стальной расплав кристаллизуется с образованием дендритов, изогнутых против потока [300]. Повышенное качество внутренней структуры заготовок, отлитых с применением ЭМП, обусловлено отсутствием неметаллических включений в сердцевине непрерывно-литого слитка. Это объяснили тем [287], что при вращении металла в кристаллизаторе

неметаллические включения быстрее удаляются к периферии заготовки, причем скорость удаления неметаллических включений существенно возрастает с увеличением диаметра частиц. Образование частиц размером более 10 мм обуславливает их вынос со скоростями до 0,40 м/с. Эта величина превышает скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора, чем и обуславливается отсутствие неметаллических включений в проходимых заготовках [290]. В диапазоне скоростей 0,23–0,5 м/с расплав кристаллизуется с образованием неупорядоченных кристаллов. При дальнейшем увеличении скорости потока образуется ячеисто-гладкая граница раздела фаз. По мнению авторов работы [301], при скоростях движения расплава 0,25–0,30 м/с структурные зоны разделены ликвационными полосами, а увеличение скорости до 0,5–0,8 м/с приводит к ускоренному росту столбчатых кристаллов. При скоростях движения, превышающих 0,65 м/с, наблюдается разрушение транскристаллитов. По мнению исследователей, для эффективного влияния ЭМП рекомендуется поддерживать указанную скорость в интервале 0,65–0,8 м/с. Опыт работы [302] показывает, что удовлетворительных результатов перемешивания можно достичь при скорости потоков у фронта кристаллизации, равной 0,5–1,0 м/с.

По результатам проведенных исследований установлено, что при линейной скорости потока металла менее 0,3 м/с эффективность применения ЭМП резко снижается, а при скорости потока расплава, превышающей 1,0 м/с, появляются отрицательные металлургические эффекты в виде пор вдоль фронта кристаллизации и отрицательной ликвации.

Использование методов физического моделирования и тем более натуральных исследований, связанных с определением скоростей циркуляции расплава, определением температурных полей и изучением структуры металла, требует больших затрат и в большинстве случаев практически неосуществимы, хотя работы в этом направлении и проводятся.

Известны методы физического моделирования магнитогидродинамических процессов, протекающих при электромагнитном перемешивании: с применением электролита на основе водного раствора поваренной соли [303], сплавов галлия,

олова и цинка [304], галлия и олова [304], сплава Вуда [305], олова и висмута [306], камфена (2,2-диметил-3-метилен-бициклогептана) [307], а также ртути [308]. Однако наиболее близким по магнитогидродинамическим параметрам к жидкой стали для физического моделирования электромагнитного перемешивания является сплав Роузе.

Физико-математические основы ЭМП расплава впервые изложены в работе [309], где дана система уравнений для расчёта движения расплава под действием пондеромоторных сил и отмечена необходимость предварительного изучения распределения скоростей, обеспечивающих желаемый металлургический эффект.

Одной из первых работ, в которой рассматривается затвердевание непрерывного слитка в бегущем магнитном поле, является работа [310]. Однако её авторы рассматривают только тепловую часть задачи, пренебрегая динамикой жидкой фазы. При этом производились попытки, постулируя границу кристаллизации, рассчитывать только поле скоростей в жидкой фазе слитка [311].

В наиболее общем виде задача затвердевания непрерывно-литой заготовки в электромагнитном поле на основе сопряженных уравнений тепло- и массопереноса сформулирована в работах [312, 313]. Однако в данных исследованиях имеются некорректности в формулах для расчёта пондеромоторных сил, которые не обращаются в нуль на бесконечности, а численные расчёты проведены для постулированной границы затвердевания.

В работе [314] также решена задача затвердевания непрерывного слитка в электромагнитном поле на основе сопряженных уравнений. Однако при проведении расчётов авторами не преодолены некоторые методические трудности счета. Это наложило отпечаток на результаты моделирования. Так, например, при перемешивании одним плоским статором, расположенным вдоль грани слитка, по мнению авторов, траектория течения расплава и поля скоростей по сечению жидкой фазы получаются симметричными, что явно не соответствует действительности.

Наиболее полная математическая модель, связывающая основные параметры статора (полусное деление, ток фазы и частоту питающего тока) с затвердеванием

и циркуляцией жидкой фазы непрерывного слитка представлена в работе [315]. В модели учтены реальные условия размещения статора в технологической линии машины непрерывного литья заготовок: наличие воздушного зазора, влияние магнитных и немагнитных роликов. Однако данная модель позволяет рассчитывать поля скоростей только для стационарных режимов, не учитывая динамики циркуляции жидкой фазы заготовки в случае реверсирования направления движения электромагнитного поля статора.

При этом следует отметить, что ни в одной из описанных моделей не рассматриваются процессы, протекающие при одновременном наложении электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе и электромагнитного тормоза в районе мениска металла.

Электромагнитное перемешивание, установленное в ЗВО, способствует повышению качества макроструктуры заготовок, однако при нерациональных режимах перемешивания возможно появление зон отрицательной ликвации, проявляемой на серных отпечатках как «светлый контур».

ЭМП в зоне окончания затвердевания улучшает, в основном, осевую зону заготовок, например, из высокоуглеродистых и высоколегированных марок стали, не воздействуя при этом на качество поверхности и подповерхностную зону заготовок.

Опыт применения систем ЭМП на разных заводах показал, что при использовании одного устройства электромагнитного перемешивания на МНЛЗ, максимальное влияние на качество макроструктуры и поверхности сортовых и блюмовых заготовок оказывает ЭМП в кристаллизаторе [234, 316] (таблица 1.3).

Поэтому многими исследователями применение ЭМП в кристаллизаторе признано наиболее целесообразным и эффективным.

В случае использования электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе происходят следующие физические процессы [317]:

- ликвидация в расплаве застойных зон [318];
- усиление массо– и теплообмена в двухфазной зоне [319];

Таблица 1.3 – Влияние систем ЭМП на качество непрерывно-литых заготовок

Место установки ЭМП	Влияние систем ЭМП на качество поверхности и макроструктуры непрерывно-литых заготовок								
	Поверхностный и подкорковый пузырь	Поверхностные и подповерхностные трещины	Точечная неоднородность	Снижение числа прорывов	Кристаллическая структура и внутренние трещины	Центральная пористость	Осевая ликвация	Подсадочная ликвация	V-образная ликвация
1	+++	+++	++	++	++	++	++	++	+
1+3	+++	+++	++	++	++	+++	+++	+++	+++
1+2+3	+++	+++	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++
1+2	+++	+++	+++	++	++	++	++	++	++
2+3	—	—	++	—	+	++	+++	++	++
2	—	—	++	—	+	++	++	+	+
3	—	—	—	—	—	+	+	+	++

Место установки систем электромагнитного перемешивания: 1 – в кристаллизаторе, 2 – в зоне вторичного охлаждения, 3 – в зоне окончания затвердевания.

Степень влияния ЭМП на качество заготовок: «—» – отсутствует влияние; «+» – незначительное влияние; «+++» – существенное влияние; «+++» – сильное влияние.

- выравнивание химического состава и температуры в структуре заготовки [320, 321];
- разрушение фронта кристаллизации [322, 323];
- циркуляция неметаллических и шлаковых включений из жидкой стали к поверхности раздела шлак-металл [324, 325];
- форсирование столкновения включений, их коагуляция и увеличение скорости удаления из металла.

Принудительное перемешивание может остановить процесс роста зоны столбчатых кристаллов и способствовать началу образования зоны равноосных кристаллов [326], что положительно скажется на качестве заготовок и проката [316].

На основании данных, приведенных в таблице 1.3, установили вероятность появления дефектов поверхности и макроструктуры непрерывно-литых слитков при использовании различных систем электромагнитного перемешивания. По результатам проведенного анализа сделали вывод, что максимальное влияние на качество поверхности и макроструктуры НЛЗ оказывает комплексное использование систем ЭМП - в кристаллизаторе, в зоне вторичного охлаждения и в зоне окончания затвердевания. После изучения применяемой технологии непрерывного литья, оценив требования к качеству заготовок и учитывая влияние различных систем ЭМП на образование дефектов поверхности и макроструктуры заготовок, приведенных в таблице 1.3, возможно определить рациональное количество и место расположения систем электромагнитного перемешивания для данной конкретной МНЛЗ. Однако при этом, как было сказано ранее, следует учитывать и экономические аспекты, т.е. возникающие текущие и капитальные затраты на установку и эксплуатацию систем ЭМП. Поэтому при использовании одной системы ЭМП наиболее рациональным является использование системы ЭМП в кристаллизаторе. Прямая во внимание доказано

Учитывая все возрастающие требования к качеству непрерывно-литых заготовок и принимая во внимание сравнительные результаты опытных работ по применению ЭМП при непрерывной разливке сортовых и блюмовых стальных

заготовок, в представленной работе остановились на изучении систем электромагнитного перемешивания с вращающимся магнитным полем.

Большинство основных зарубежных поставщиков устройств ЭМП для непрерывной разливки стали, например, «Danieli–Rotelec», «ABB», «SMS-Elotharm», «Ergolines», «Primetals», «Kemeida Electric» и др., в основном предлагают системы электромагнитного перемешивания с расположением статора вне корпуса кристаллизатора [316, 327], недостатки которых достаточно подробно отражены в таблице 1.2. В этом случае статор ЭМП снаружи охватывает корпус кристаллизатора (рисунок 1.4), при этом корпуса кристаллизаторов и статоров изготавливают из немагнитной стали аустенитного класса.



Рисунок 1.4 – Система ЭМП в кристаллизаторе при внешнем расположении статора

Внешнее расположение статора ЭМП приводит к существенному увеличению межполюсного расстояния магнитной системы и, значит – к увеличению габаритов статора, его массы и, следовательно – увеличению нагрузки на механизм качания, если статор установлен на его качающуюся раму. Увеличение межполюсного расстояния, в свою очередь, приводит к снижению величины индукции и, соответственно, к уменьшению скорости движения расплава. При внешнем расположении статора требуется отдельный контур охлаждения специально подготовленной водой [328], что ведет к росту

капитальных и текущих эксплуатационных затрат. Практика применения таких систем ЭМП демонстрирует, что снижение требований к качеству охлаждающей воды очень часто становится причиной выхода их из строя. Об этом свидетельствуют результаты их эксплуатации на МНЛЗ Магнитогорского металлургического комбината, Таганрогского металлургического завода, «Северстали», Волжского трубного завода, «Ижстали», Оскольского электрометаллургического комбината и других заводов (рисунки 1.5–1.7).



Рисунок 1.5 – Устройство ЭМП наружного исполнения, вышедшее из строя на МНЛЗ-1 АО «ОЭМК»



Рисунок 1.6 – Статор ЭМП наружного исполнения, вышедший из строя на МНЛЗ-3 ПАО «Ижсталь»



Рисунок 1.7 – Устройство ЭМП наружного исполнения, вышедшее из строя на МНЛЗ-2 ПАО «Тагмет»: слева – со срезанной верхней частью корпуса; справа – статор без корпуса

Кроме того, большинство статоров ЭМП иностранного производства выполнены в неразборных корпусах. В этом случае дорогостоящий ремонт статоров должен производиться только на зарубежных заводах–изготовителях.

Отдельно следует отметить, что применение унифицированных систем ЭМП с внешним расположением статора, в некоторых случаях, когда наименьшее сечение производимых заготовок значительно отличается от наибольшего, снижает положительные эффекты от применения электромагнитного перемешивания при производстве заготовок минимального формата.

Создавая и внедряя в промышленное производство индукторы ЭМП и системы питания, управления и АСУ для предприятий черной металлургии, конструкторы руководствуются отечественным опытом создания и эксплуатации ЭМП, каждый раз сталкиваясь с проблемами решения многопрофильных задач, главными из которых являются:

- расстояние от индуктора ЭМП до жидкой фазы слитка;
- толщина закристаллизовавшейся корки слитка в месте установки устройства ЭМП;

- электротехническая характеристика материала, из которого изготовлены стенки, через которые индуктор взаимодействует со стальным расплавом;
- толщина вышеупомянутой стенки;
- формат слитка как по размерам, так и по форме – круг, квадрат, прямоугольник (блюм, сляб);
- электротехнические параметры перемешивателя;
- необходимость использования одного типа индуктора и систем его питания и управления для производства заготовок различных форматов, т.е. универсальность системы ЭМП;
- потребность в установке индуктора ЭМП на расстоянии от мениска кристаллизатора, исключающем интенсивное перемешивание расплава в зоне мениска, покрытого слоем шлакообразующей смеси;
- необходимость поддержания скорости движения расплава в зоне перемешивания в пределах, обеспечивающих как улучшение качества металла, так и исключающих появление дефектов в виде отрицательной ликвации («белой полосы»);
- необходимость использования имеющейся мощности энерго– и водоснабжения;
- необходимость замены индуктора ЭМП конструкции инофирмы на индуктор отечественной конструкции, т.е. потребность в решении задачи–интегрирования последнего в существующие системы питания, управления и АСУ ТП.

На основании проведенного теоретического анализа и данных промышленной эксплуатации существующих систем ЭМП и кристаллизаторов, сформулированы цель и задачи исследований.

Целью работы является разработка научных основ совершенствования систем электромагнитных перемешивателей и кристаллизаторов сортовых и блюмовых МНЛЗ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- провести анализ действующих систем электромагнитного перемешивания и конструкции кристаллизаторов зарубежных производителей, применяемых в настоящее время на российских металлургических заводах;

- разработать теоретические методы совершенствования систем электромагнитного перемешивания жидкой стали в сортовых и блюмовых МНЛЗ;

- разработать методы физического моделирования для обоснования конструкции устройств электромагнитного перемешивания и технологии непрерывной разливки;

- разработать принципы конструирования устройств электромагнитного перемешивания и кристаллизаторов МНЛЗ;

- опробовать и внедрить разработанные устройства ЭМП и конструкции кристаллизаторов на машинах непрерывного литья сортовых и блюмовых заготовок.

## Выводы по главе 1

1. В результате выполненного анализа известных способов физического воздействия на непрерывно отливаемые стальные сортовые и блюмовые заготовки установлено, что одним из наиболее рациональных и технологичных методов улучшения качества является электромагнитное перемешивание. Выполнена классификация серии зарубежных устройств электромагнитного перемешивания и выявлены тенденции их развития.

2. На основании выполненных исследований на российских металлургических заводах установлены основные причины выхода из строя статоров ЭМП зарубежных производителей, главными из которых являются снижение требований к качеству охлаждающей ЭМП воды и сбои в работе систем охлаждения, что является следствием неразборного корпуса статора из аустенитной стали и необходимости в отдельном контуре охлаждения специально подготовленной деминерализованной водой. Также определены конструктивные недостатки применяемых гильзовых кристаллизаторов, влияющих на качество непрерывно-литых заготовок.

3. На основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований различных систем электромагнитного перемешивания установлено, что для уменьшения количества дефектов и повышения качества непрерывно-литых заготовок выбор количества и места установки систем ЭМП необходимо проводить с учетом конструктивных особенностей МНЛЗ, конкретных условий эксплуатации и вида дефекта.

4. В настоящее время практически невозможно провести непосредственное измерение скорости турбулентных потоков жидкой стали при электромагнитном перемешивании на сортовых и блюмовых МНЛЗ. Поэтому для получения представлений о реальной картине циркуляции жидкого металла, создаваемой конкретным перемешивателем, необходимо применять математическое и физическое моделирование магнитогидродинамических процессов.

5. Показано, что в современной научной литературе отсутствует анализ тенденций развития систем ЭМП на МНЛЗ. Кроме того, практически отсутствуют работы по экспериментальным исследованиям магнитогидродинамических процессов, протекающих при электромагнитном перемешивании с использованием материалов, наиболее близких по магнитогидродинамическим параметрам к жидкой стали. В описанных теоретических исследованиях не рассматриваются процессы, протекающие при одновременном наложении электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе и электромагнитного тормоза в районе мениска металла.

Таким образом, работа, направленная на разработку научных основ совершенствования систем электромагнитных перемешивателей и кристаллизаторов сортовых и блюмовых МНЛЗ, в настоящее время приобретает особую актуальность.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Разработать теоретические методы совершенствования систем электромагнитного перемешивания жидкой стали в МНЛЗ.

2. Разработать методы физического моделирования для обоснования устройств и технологии непрерывной разливки,

3. Разработать принципы проектирования и конструкции устройств электромагнитного перемешивания и кристаллизаторов сортовых и блюмовых МНЛЗ.

4. Разработать методологию конструирования и опробования систем электромагнитного перемешивания в сортовых и блюмовых МНЛЗ.

5. Опробовать и внедрить разработанные устройства ЭМП и конструкции на машинах непрерывного литья.

## **ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОЙ СТАЛИ СОРТОВЫХ И БЛЮМОВЫХ МНЛЗ**

### **2.1. Оценка воздействия постоянного магнитного поля и электромагнитного перемешивания на жидкий металл в кристаллизаторе МНЛЗ**

По мнению ряда исследователей, для улучшения структуры заготовки необходимо интенсивное её перемешивание, но в зоне мениска кристаллизатора требования к характеру перемешивания должны быть другие [329-332]. Величина рациональной скорости движения металла должна удовлетворять нескольким условиям:

- быть выше некоей минимальной величины, при которой шлак и неметаллические включения начинают центрифугироваться в осевую зону мениска;

- не превышать определённую максимальную величину, в противном случае завихрение поверхности мениска может быть настолько глубоким, что невозможно будет удалять шлак с поверхности мениска;

- избегать появления негативных металлургических эффектов в виде отрицательной ликвации и пор вдоль фронта кристаллизации;

- избегать чрезмерной интенсивности перемешивания, которая может привести к образованию поверхностных дефектов, вызванных неустойчивостью мениска (плёны, заливины, ужимины и т.п.);

- уменьшать скорость движения расплава в районе мениска при разливке «под уровень», так как защитная шлаковая смесь может быть затянута в металл, что приведет к росту балла по точечной неоднородности и снижению качества макроструктуры заготовок.

Кроме того, в районе мениска в кристаллизаторе под воздействием интенсивного ЭМП происходит размывание погружных стаканов.

Исследованиями установили, что для получения «спокойного» мениска металла в кристаллизаторе необходимо расположить статор максимально ниже. Но в отдельных случаях, например, из-за конструкции кристаллизатора или использования короткой гильзы длиной 700 мм, невозможно отдалить статор от мениска на требуемое расстояние. Это особенно часто происходит при производстве круглых заготовок большого сечения. Поэтому возможно принятие решения о независимом управлении потоками расплава в районе мениска, что будет способствовать повышению качества круглой заготовки.

Известно двухуровневое перемешивающее устройство «DualMEMS» (таблица 1.2), в котором реализовано автономное управление гидродинамикой расплава на разных уровнях кристаллизатора. Данный результат был получен путем интегрирования в единый комплекс электромагнитного перемешивания двух катушек ЭМП. В данной системе одну катушку расположили в нижней части кристаллизатора, а другую — в районе мениска. Питание катушек ЭМП, образующих самостоятельные магнитные поля, производят автономно друг от друга. Настройку электротехнических параметров и режимов электромагнитного перемешивания устройств ЭМП также производят автономно друг от друга.

Установлено, что такая конструкция двухуровневого ЭМП обладает рядом недостатков. Для успокоения мениска в кристаллизаторе верхний статор обычно вращают в сторону противоположную направлению вращения основного нижнего статора. Кроме усложнения и удорожания всей системы, возможно возникновение движения расплава в районе мениска, приводящее к отрицательным металлургическим результатам. По мнению ряда исследователей, такая конструкция ЭМП в кристаллизаторе дает неблагоприятный эффект перемешивания даже по сравнению с однокатушечной системой электромагнитного перемешивания.

Наиболее «спокойный» мениск в кристаллизаторе может быть обеспечен при использовании электромагнитного тормоза (ЭМТ) на постоянном токе, позволяющего в 2–3 раза уменьшить скорости потоков расплава в районе мениска.

Из литературных источников известны несколько конструкций электромагнитного тормоза, применяемых в кристаллизаторах слябовых и тонкослябовых МНЛЗ.

Практически все работы, связанные с влиянием стационарных и нестационарных магнитных полей на кристаллизационные свойства жидких металлов, являются экспериментальными. Теоретических работ в этом направлении, практически, нет, что затрудняет понимание связи свойств формируемой структуры с внешними и внутренними параметрами, определяющими кинетику и термодинамику процесса затвердевания.

В связи с этим в настоящей работе выполнили теоретическое исследование магнитогидродинамических процессов при воздействии на жидкий металл в кристаллизаторе МНЛЗ в условиях наложения постоянного магнитного поля и электромагнитного перемешивания.

Были поставлены следующие задачи:

– рассчитать воздействие объемной электромагнитной силы, профиль распределения скоростей и среднюю скорость ламинарного течения несжимаемого жидкого металла между параллельными плоскостями при действии на него постоянного магнитного поля –  $H_0$  (А/м) в направлении, перпендикулярном плоскостям, если металл имеет конечную проводимость –  $\sigma$  (См) и магнитную проницаемость –  $\mu$ , близкую к единице;

– найти величину –  $H_x$  (поле «сноса») в направлении скорости течения металла;

– связать рассчитанные свойства с процессом кристаллизации металла.

Для решения данной задачи взяли за основу систему МГД–уравнений из работы [333].

В случае несжимаемой проводящей жидкости, имеющей  $\mu \approx 1$ , система уравнений имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{div} \vec{H} = 0, \text{div} \vec{V} = 0, \\ \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{H} = (\vec{H} \nabla) \vec{V} + \frac{c^2}{4\pi\sigma} \Delta \vec{H} \\ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} = \frac{1}{\rho} \nabla \left( P + \frac{H^2}{8\pi} \right) + \frac{1}{4\pi\rho} (\vec{H} \nabla) \vec{H} + \nu \Delta \vec{V} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{H} = (\vec{H} \nabla) \vec{V} + \frac{c^2}{4\pi\sigma} \Delta \vec{H} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} = \frac{1}{\rho} \nabla \left( P + \frac{H^2}{8\pi} \right) + \frac{1}{4\pi\rho} (\vec{H} \nabla) \vec{H} + \nu \Delta \vec{V} \quad (2.3)$$

где  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$  – вектор Набла (градиент);  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  – оператор

Лапласа;  $\vec{V}$  – вектор скорости, м/с;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$  – кинематическая

вязкость, м<sup>2</sup>/с; третье слагаемое в правой части уравнения (2.3) есть

$f = \frac{1}{c} [\vec{j} \vec{H}] = \frac{1}{4\pi} [\text{rot} \vec{H} \cdot \vec{H}] = -\frac{1}{\pi} \text{grad} H^2 + \frac{1}{4\pi} (\vec{H} \nabla) \vec{H}$  – объемная плотность сторонних

сил, Н/м<sup>3</sup>, в данном случае электромагнитных, входящих в первое слагаемое правой части уравнения (2.3).

Для того, чтобы общую систему МГД–уравнений (2.1–2.3) привязать к задаче, выбрали систему координат, связанную с неподвижными параллельными пластинами, между которыми течет с заданной скоростью жидкий металл, как показано на рисунке 2.1.

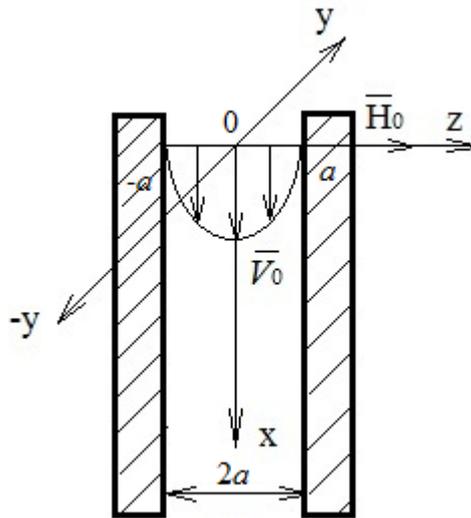


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение течения жидкого металла с заданной скоростью

Для определения профиля скоростей в несжимаемой вязкой проводящей и парамагнитной жидкости металла, текущей между параллельными плоскостями, а

также величины магнитного поля в направлении  $x$  (поле «сноса») сделали ряд дополнительных предположений:

- а) скорость жидкости имеет везде одинаковое направление (по оси  $x$ );
- б) она зависит только от  $z$ ;
- в) то же относится к  $H_x$ ,
- г) градиент давления  $150-410x$  является постоянным для поддержания стационарного течения.

Кроме того, из уравнения (2.1) следует, что  $\text{div}\vec{V} = 0$ , а из  $\text{div}\vec{H}$  получили  $H_z = H_0$ .

С учетом данных предположений и допущений уравнения (2.2) и (2.3) после некоторых преобразований для  $x$ -компоненты свели к следующим:

$$\begin{cases} H_0 \frac{dV}{dt} + \frac{c^2}{4\pi\sigma} \frac{d^2 H_x}{dz^2} = 0, & (2.4) \\ \eta \frac{d^2 V}{dz^2} + \frac{H_0}{4\pi} \frac{dH_x}{dz} = \text{const} = \frac{dP}{dx}, & (2.5) \end{cases}$$

где  $P(x) = p + \frac{H_x^2}{8\pi}$ ,  $p$  – гидростатическое давление жидкого металла,  $\text{Н/м}^2 = \text{Па}$ , удовлетворяющее следующему условию:

$$-\frac{dP}{dx} = -\frac{dp}{dx} = \text{const}, \text{ т.е. гидростатическое давление вдоль оси } x \text{ есть}$$

величина постоянная.

Решение системы уравнений (2.4) и (2.5) проводили методом исключения.

После однократного дифференцирования уравнения (2.5) по  $(d/dz)$ , выразив  $\frac{d^2 H_x}{dz^2}$  и подставив это выражение в уравнение (2.4), получили дифференциальное уравнение относительно скорости:

$$\frac{dV}{dz} - \frac{c^2 \eta}{\sigma H_0^2} \frac{d^3 V}{dz^3} = 0, \quad (2.6)$$

где  $c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}}$  – скорость света, м/с;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная, Ф/м;  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $\eta$  – динамическая вязкость, кг/м·с.

$$k^2 = \frac{c^2 \eta}{\sigma H_0^2} \quad \left( k = \frac{c}{H_0} \sqrt{\frac{\eta}{\sigma}} \right)$$

Отношение  $G = \frac{a}{k} = \frac{aH_0}{c} \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}}$  – является критерием степени влияния

магнитного поля на течение жидкого металла.

Граничные условия, соответствующие поставленной задаче, имеют следующий вид:

1)  $V=0$  при  $z = \pm a$ , где  $2a$  – расстояние между пластинами (рисунок 2.1), а плоскость  $z=0$  расположена между ними;

2)  $H_x=0$  при  $z = \pm a$ , так как вне жидкого металла имеется неизменное внешнее поле  $H_0$ , а тангенциальная к границе компонента  $\vec{H}$  непрерывна.

Применяя данные граничные условия к уравнению (2.6), получили следующее решение для скорости течения жидкого металла:

$$V = V_0 \frac{ch\left(\frac{a}{k}\right) - ch\left(\frac{z}{k}\right)}{ch\left(\frac{a}{k}\right) - 1}. \quad (2.7)$$

Магнитное поле «сноса» –  $H_x$  нашли из уравнения, полученного после преобразований (2.5):

$$\frac{d^2 H_x}{dz^2} = -\frac{4\pi\eta}{H_0} \frac{d^3 V}{dz^3},$$

С учетом выражения для скорости (2.7):

$$H_x = -V_0 \frac{4\pi}{c} \sqrt{\sigma\eta} \cdot \frac{(z/a) \cdot sh\left(\frac{a}{k}\right) - sh\left(\frac{z}{k}\right)}{sh\left(\frac{a}{k}\right) - 1}, \quad (2.8)$$

где  $V_0$  – скорость жидкого металла в средней плоскости  $z=0$ ;  $sh$  и  $ch$  – гиперболические  $\sin$  и  $\cos$ .

Из уравнения (2.8) следует, что величина поля «сноса» определяется скоростью течения металла в плоскости  $z=0$  и зависит от проводимости и вязкости жидкого металла. Кроме этого, при заданных  $\sigma$  и  $\eta$  в случае:

- а) при  $\left(\frac{a}{k}\right) \ll 1$ ,  $H_x = 0$  (обычная гидродинамика);  
 б) при  $\left(\frac{a}{k}\right) = \frac{aH_0}{c} \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}} \gg 1$

$$H_x = -V_0 \frac{4\pi}{c} \sqrt{\sigma\eta} \left( \frac{z}{a} - e^{-\frac{(a-|z|)}{k}} \right) \quad (2.9)$$

Среднюю скорость течения жидкого металла нашли так:

$$\bar{V} = \frac{1}{2a} \int_{-a}^a V dz = -\frac{dP}{dx} \frac{ak}{\eta} \left( \operatorname{cth} \left( \frac{a}{k} \right) - \frac{k}{a} \right). \quad (2.10)$$

Таким образом:

- а) при  $\left(\frac{a}{k}\right) \ll 1$ ,  $\bar{V} = -\frac{dP}{dx} \frac{a^2}{3\eta}$  – соответствует обычной гидродинамике;

- б) при  $\left(\frac{a}{k}\right) \gg 1$ ,  $\bar{V} = -\frac{dP}{dx} \frac{ac}{H_0 \sqrt{\sigma\eta}}$  – обратно пропорциональна величине

магнитного поля;

- в) при  $\left(\frac{a}{k}\right) = \frac{aH_0}{c} \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}} \gg 1$ , т.е.  $H_0$  – велико при заданных  $\sigma$  и  $\eta$ , профиль скоростей согласно (2.7) имеет вид, показанный на рисунке 2.2.

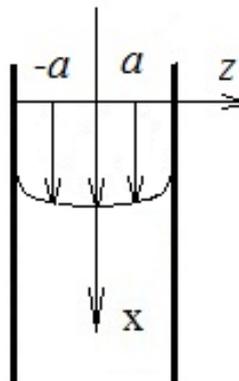


Рисунок 2.2 – Профиль скоростей текущего металла, при больших  $H_0$  и заданных  $\sigma$  и  $\eta$

На характер изменения профиля скоростей, как следует из отношения  $a/k$ , влияет не только величина магнитного поля –  $H_0$ , но также и проводимость, и вязкость жидкого металла. При заданной величине  $H_0$  происходит уменьшение вязкости и увеличение проводимости, профиль скоростей приближается к плоскому.

Анализируя полученные результаты решения, сделали предположение, что выравнивание профиля скоростей слоев текущего со скоростью  $V$  жидкого металла, при включении магнитного поля в направлении  $\vec{H}_0 \perp \vec{V}_x$  происходит за счет следующих процессов:

1) плотность потока импульсов  $j_p = -\eta \frac{dV}{dz}$  атомов из более быстрых слоев

текущего жидкого металла передается в медленные слои, увеличивая суммарный импульс медленного слоя;

2) медленные слои обогащаются атомами быстрых слоев, что приводит к росту средней кинетической энергии атомов этого слоя, а значит температуры слоя;

3) перенос импульса из более быстрых слоев жидкого металла в медленные приводит к увеличению скорости отвода тепла от средней линии в сторону плоскостей  $z = \pm a$ , увеличивая при этом градиент температуры вблизи фронта кристаллизации.

Процессы 1–3 способствуют тому, что градиент скоростей атомов между слоями текущего жидкого металла, становится постоянным, вплоть до границы контакта жидкого металла с поверхностью плоскости, ограничивающей этот металл, (или поверхностью фронта кристаллизации, растущего к средней линии между пластинами). Вследствие чего сила трения  $f_{тр} = -\eta \frac{dV}{dz} S$ , между слоями текущего металла всегда больше на фронте кристаллизации, чем в объеме жидкого металла. Поэтому площадь контакта жидкого металла  $S$  с плоскостью гораздо больше с полем  $H_0$ , чем без него, что увеличивает процесс переноса атомов из расплава в сторону фронта кристаллизации.

Таким образом, наложение магнитного поля напряженностью  $H_0$  перпендикулярно направлению течения жидкого металла, ограниченного жесткими плоскостями, приводит к выравниванию профиля скоростей, уменьшению средней скорости и появлению магнитного поля «сноса»  $H_x$ .

Изменение профиля скоростей текущего металла и средней скорости должно изменить значения кинетических коэффициентов, входящих в определение тепловых, диффузионных и импульсных потоков между слоями текущего металла, поскольку  $\lambda$ ,  $\eta$  и  $D$ , согласно молекулярной теории явлений переноса имеют следующие выражения:

$$\lambda = \frac{1}{3} c_v \rho \langle V \rangle l, \quad (2.11)$$

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle V \rangle l, \quad (2.12)$$

$$D = \frac{1}{3} \langle V \rangle l, \quad (2.13)$$

где  $c_v$  – удельная теплоемкость жидкого металла, Дж/кг·К;  $\rho$  – плотность жидкого металла, кг/м<sup>3</sup>;  $\langle V \rangle$  – средняя скорость атомов жидкого металла, м/с;  $\langle l \rangle$  – средняя длина свободного пробега атомов, м.

Таким образом, поскольку, включение магнитного поля влияет на значение коэффициентов теплопроводности, динамической вязкости жидкого металла и коэффициент диффузии атомов расплава в сторону фронта кристаллизации и обратно, то должно отражаться на скорости зарождения центров кристаллизации, их росте, а также на линейной скорости роста толщины закристаллизовавшегося металла (скорости движения фронта кристаллизации).

В работах [334, 335] показано, что скорость зарождения центров кристаллизации определяется следующим уравнением:

$$V_{\text{зцк}} = k_1 e^{-E/RT} \cdot e^{-B\sigma_K^3/T(\Delta T)^2} \quad (2.14)$$

$$B = 32 \left( \frac{\mu_m}{\rho} \right)^2 \cdot \frac{T_{пл}^2}{q_{пл}^2} \cdot \frac{1}{R},$$

где  $E$  – энергия активации диффузии атомов из расплава к центру кристаллизации (зародышу), эВ;  $\sigma_K$  – коэффициент поверхностного натяжения на фронте кристаллизации, Н/м;  $T$  – температура расплава, К;  $\Delta T$  – температура переохлаждения от равновесной для двух фаз, К;  $R$  – газовая постоянная, Дж/К·моль;  $k_1$  – постоянный коэффициент;  $\mu_m$  – молярная масса, кг/моль;  $T_{пл}$  – температура плавления, К;  $q_{пл}$  – скрытая теплота фазового перехода  $L \rightarrow S$ , Дж/кг.

Первая экспонента –  $e^{-E/RT}$  определяет величину диффузионного потока атомов из расплава к зародышу и обратно. При включении поля  $H_0$  коэффициент диффузии уменьшается, что замедляет рост зародышей.

Вторая экспонента –  $e^{-A_{кр}/RT}$  определяет величину вероятности образования зародыша, где  $A_{кр} = 32 \left( \frac{\mu_m}{\rho} \right)^2 \cdot \sigma_K^3 \cdot \frac{T_{пл}^2}{q_{пл}^2} \cdot \frac{1}{(\Delta T)^2}$  – это работа образования критического зародыша.

При включении поля  $q_{пл} = q_s + \frac{H^2 \mu_m \mu_0}{2}$  возрастает на величину запасенной магнитной энергии в расплаве, а величина  $\Delta T$  возрастает, так как в соответствии с работой [335] температура равновесия фаз смещается в сторону увеличения, в связи с чем  $A_{кр}$  уменьшается, а вероятность образования центров кристаллизации возрастает.

Таким образом, действие магнитного поля на текущий со скоростью  $V_x$  расплав металла, оказывает положительное влияние на формирование большего числа в единицу времени на единице площади зародышей, формирующих мелкозернистый кристалл.

После того, как вся площадь будет покрыта слоем кристаллитов, начнет формироваться второй слой. Быстрота формирования всех последующих слоев будет определяться линейной скоростью роста кристаллов, которая, согласно [313]

$V_{лк} \sim e^{-D\sigma_K^3/T\Delta T}$ , т.е. зависит от  $\Delta T$  (величины переохлаждения) в первой степени.

Поэтому для заданной  $\Delta T$  имеем  $V_{\text{зцк}} > V_{\text{лк}}$ , и полученный кристалл должен иметь зерна мельче, чем в том случае, если бы, магнитное поле отсутствовало.

Но линейная скорость роста кристалла, полученная из уравнения теплового баланса, в соответствии с работой [199], на фронте кристаллизации зависит не только от величины переохлаждения, а еще и от градиента температуры в направлении от фронта кристаллизации к расплаву или скорости отвода тепла от фронта кристаллизации к стенке кристаллизатора:

$$V_{\text{лк}} = \frac{1}{\rho q_s} \lambda \frac{dT}{dz} = \frac{1}{\rho q_s S} \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{\rho q_s} c_v \eta \frac{dT}{dz} \quad (2.15)$$

В начальный момент времени кристаллизации  $\frac{dT}{dz} \approx \frac{T_p - T_\kappa}{a}$  и  $\frac{dQ}{dt}$  – отвод тепла от стенки кристаллизатора (плоскости) в единицу времени не изменяется при наложении магнитного поля, а изменяются  $\lambda$  и  $q_s$ , как было указано выше, соответственно изменяется  $V_{\text{лк}}$ . Данная скорость меньше с полем, чем без него. По мере роста слоя закристаллизованного металла градиент температуры растет, т.к.  $\frac{dT}{dz} \approx \frac{T_p - T_\kappa}{a - \delta}$ , где  $\delta$  – толщина закристаллизованного металла, м. При этом  $V_{\text{лк}}$  начинает расти, если температура на фронте кристаллизации не равна температуре на стенке кристаллизатора.

Объемную электромагнитную силу (ОЭМС)  $\vec{f}$ , действующую на единицу токонесущего объема жидкости, в произвольной точке определили по формуле [336, 337]

$$\vec{f} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{J} \times \vec{H}, \quad (\text{Н/м}^3), \quad (2.16)$$

где  $\vec{J}$  — индуцированная плотность тока в этой точке, А/м<sup>2</sup>;  $\vec{H}$  — значение напряженности магнитного поля, создаваемого внешними токами, А/м,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  В·с/(А·м) – универсальная магнитная постоянная.

В проводящей жидкости, движущейся со скоростью  $\vec{V}$ , согласно закону Фарадея, возникает дополнительная Э.Д.С. при изменении магнитного потока за

счет движения проводника (при неизменном магнитном поле). Возникает «эффективная» напряженность электрического поля создающая ток проводимости:

$$\vec{E}_{эф} = (\vec{E} + \mu_0 \cdot \vec{V} \times \vec{H}), \text{ (В/м)}, \quad (2.17)$$

Так как внешние источники Э.Д.С. отсутствуют, то  $\vec{E}=0$ . Пользуясь обобщенным законом Ома, определили плотность тока как

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}_{эф} = \sigma \cdot \mu_0 \cdot \vec{V} \times \vec{H}, \text{ (А/м}^2\text{)}. \quad (2.18)$$

При движении металла в направлении, перпендикулярном направлению магнитного поля, по порядку величины оценили максимальные ОЭМС, рассматривая уравнения (2.16) – (2.18), получили

$$f \sim \mu_0^2 \cdot \sigma \cdot V \cdot H^2, \text{ (Н/м}^3\text{)}. \quad (2.19)$$

Постоянное магнитное поле оказывает тормозящее действие на любое движение, в котором есть ненулевая проекция, направленная перпендикулярно вектору магнитной индукции, в том числе на вращательное движение металла в районе мениска и на струю металла, выходящую из погружного стакана, уменьшая глубину ее проникновения. Электромагнитная сила прямо пропорциональна скорости и квадрату напряженности магнитного поля (2.19). При  $\vec{V}=0$  сила равна нулю, поэтому полное торможение невозможно.

Оценили ОЭМС по порядку величины: для электропроводности жидкой стали  $\sigma \sim 10^6 [\text{Ом} \cdot \text{м}]^{-1}$ , скорости металла порядка 0,1 м/с и напряженности поля порядка  $10^4$ – $10^5$  А/м, получили диапазон сил  $f \sim 10$ – $1000$  Н/м<sup>3</sup>.

Из уравнения (2.19) установили, что объемная электромагнитная сила пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля, она существенно меньше объемной гравитационной силы  $f_g = \rho \cdot g \sim 7 \cdot 10^4$  Н/м<sup>3</sup> ( $\rho=7000$  кг/м<sup>3</sup>), однако электромагнитная сила может быть сравнима и даже существенно превышать вязкостные силы.

Под действием объемных электромагнитных сил возникает эффект Гартмана, то есть уплощение профиля скорости при наложении постоянного магнитного поля. При неизменном среднем расходе жидкости скорость в центре потока

уменьшается, а вблизи стенок увеличивается. Градиенты скорости жидкости уменьшаются, а при турбулентном течении снижается коэффициент турбулизации потока.

Рассмотрели случай, когда стенки кристаллизатора электроизолированы от жидкого металла, например, за счет твердой корочки шлака и (или) воздушного зазора. В этом случае при ламинарном течении потока локальные вертикальные проекции скоростей определили как [337]:

$$V_x = V \frac{ch(Ha) - ch\left(Ha \cdot \frac{y}{a}\right)}{Ha \cdot ch(Ha) - sh(Ha)} Ha, \text{ (м/с)}, \quad (2.20)$$

где  $V$  – средняя скорость потока, м/с;  $y$  – горизонтальная ось;  $sh$  и  $ch$  – гиперболические  $\sin$  и  $\cos$ ;  $Ha$  – число Гартмана, квадрат которого определяет отношение электромагнитных и вязкостных сил:

$$Ha^2 = \frac{\sigma \cdot B^2 L^2}{\rho \cdot \nu}, \quad (2.21)$$

$L$  – характерный размер, в данном случае  $L=a$  – половина расстояния между стенками,  $B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H$  – индукция магнитного поля, Тл.

Коэффициент гидравлического сопротивления (трения) при движении между плоскопараллельными пластинами при ламинарном течении в отсутствии поля [209]

$$\lambda_0 = \frac{6}{Re}, \quad (2.22)$$

а при наличии магнитного поля

$$\lambda \approx \frac{2 \cdot Ha}{Re}, \quad (2.23)$$

Анализ формулы показывает, что при снятии магнитного поля ( $Ha \rightarrow 0$ ), то полученное выражение 2.23. совпадает с 2.22  $\lambda = \lambda_0$ , и мы вернемся к движению без поля.

Оценив относительное изменение коэффициента гидравлического сопротивления  $k = \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{Ha}{3}$ : при  $H \sim 10^4 - 10^5$  А/м,  $a \sim 0,1$  м,  $\nu \sim 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, получили

$k \sim 5 - 50$ . Поэтому гидравлическое сопротивление под действием электромагнитных сил становится сравнимым с вязкостным гидравлическим сопротивлением при  $H \sim 10^4$  А/м.

Рассмотрели случай, когда стенки кристаллизатора имеют электропроводность, то есть имеется электрический контакт между жидким металлом и медным кристаллизатором. Тогда коэффициент сопротивления плоскопараллельного течения между двумя проводящими стенками существенно зависит от относительной электропроводности  $\alpha = \sigma_{cm} \cdot \delta_{cm} / (\sigma \cdot a)$  материала стенок и жидкого металла, где  $\sigma_{cm}$  – эффективная электропроводность материала стенки,  $\delta_{cm}$  – толщина стенки. Из-за того, что жидкий металл непосредственно не контактирует с медной стенкой, в качестве электропроводности стенки надо брать некую эффективную электропроводность, а не электропроводность меди.

В этом случае относительное изменение коэффициента гидравлического сопротивления:

$$k = \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{Ha^2}{3 \cdot F \cdot (Ha - th(Ha))}, \quad (2.24)$$

где  $F = \frac{1 + \alpha}{Ha \cdot \alpha + th(Ha)}$ .

На рисунке 2.3 показана зависимость  $k(Ha)$  при разных  $\alpha$ . Видно, что при электропроводящих стенках относительный коэффициент гидравлического сопротивления пропорционален квадрату числа Гартмана и существенно зависит от  $\alpha$ , при этом величина  $k$  может достигать довольно больших величин.

Например, если эффективная электропроводность стенки будет такой же, что и жидкого металла, при  $a=0,1$  м и при толщине медной стенки  $\delta_{cm}=0,02$  м относительная проводимость  $\alpha=0,2$ . В этом случае имеем при  $H \sim 10^4$  А/м –  $k=18$ , а при  $H \sim 10^5$  А/м –  $k=1300$ .

Для кристаллизатора с ЭМП, предназначенного для получения заготовок диаметром равным 130 мм, была измерена индукция магнитного поля в районе действия ЭМТ с помощью магнитометра ИМАГ-400Ц, имеющего максимальную

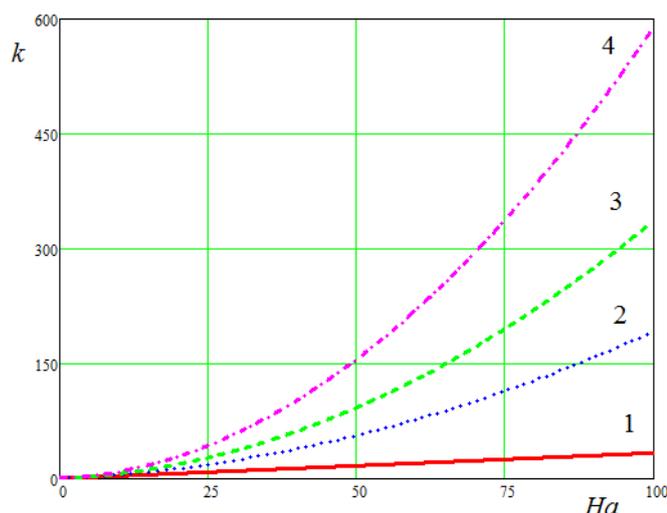


Рисунок 2.3 – Зависимость относительного коэффициента гидравлического сопротивления плоскопараллельного течения между двумя проводящими стенками от числа Гартмана при относительной проводимости материала стенок и жидкого металла  $\alpha$ , равной 0 (1), 0,05 (2), 0,1 (3), 0,2 (4)

погрешность  $\pm 1\%$ . Она составила  $B=0,05-0,07$  Тл или  $H=4 \cdot 10^4-5,5 \cdot 10^4$  А/м.

Электропроводность расплавов всех ШОС зависит, в основном, от температуры и содержания оксидов щелочных металлов [338]

$$\sigma_{\text{шл}} = 3,47(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) + 0,124t - 141,2, \quad (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}, \quad (2.25)$$

где  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  – содержание соответствующих компонентов в расплаве, %;  $t$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ . Для содержания щелочных металлов в шлаке 4 % при температуре  $t=1500$   $^{\circ}\text{C}$  имеем  $\sigma_{\text{шл}}=59$   $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ .

Видно, что шлак имеет довольно низкую электропроводность и, хотя эффективную электропроводность из-за контакта шлака с медной стенкой можно

оценить как  $\sigma_{\text{эф}} \sim \sigma_{\text{шл}} \cdot \frac{d}{\delta_{\text{шл}}}$ , получаемая относительная электропроводность  $\alpha$

материала стенок и жидкого металла близка к нулю.

Определили относительное увеличение коэффициента гидравлического сопротивления для разработанной конструкции электромагнитного тормоза. Для

$a=65$  мм,  $H=5,5 \cdot 10^4$  А/м получили  $k = \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{Ha}{3} \approx 18$ .

На основании проведенного магнитогидродинамического описания состояния текущего жидкого металла в поперечном магнитном поле ( $\vec{H}_0 \perp \vec{V}$ ) установлено [339]:

1. Магнитное поле выравнивает профиль скоростей слоев текущего металла практически на всем поперечном сечении.

2. Наличие магнитного поля уменьшает среднюю скорость слоев текущего металла, т.е. притормаживает его, увеличивая при этом время нахождения жидкого металла в кристаллизаторе.

3. За счет течения металла появляется магнитное поле «сноса» –  $H_x$ , которое изменяет результирующее поле  $H$  ( $H = \sqrt{H_0^2 + H_x^2}$ );

4. Магнитное поле приводит к выравниванию профиля скоростей и к увеличению скорости у фронта кристаллизации, вследствие чего, потоки тепла, массы и импульсов увеличиваются в направлении к фронту кристаллизации.

5. Действующее на текущий расплав магнитное поле, существенно влияет на кинетику кристаллизации жидкого металла: т.е. на формирование большего числа в единицу времени на единице площади зародышей, формирующих мелкозернистый кристалл.

6. При электромагнитном торможении металла объемная электромагнитная сила пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля. Для существующих конструкций электромагнитных тормозов электромагнитная сила существенно меньше объемной гравитационной силы, однако сравнима и даже существенно может превышать вязкостные силы, что определяется величиной числа Гартмана.

7. Тормозящая объемная электромагнитная сила пропорциональна квадрату величины напряженности внешнего магнитного поля и существенно зависит от наличия электрического контакта между жидким металлом и медным кристаллизатором. Использование ШОС с высокой электропроводностью позволит повысить эффективность электромагнитного торможения.

8. Получено значение относительного увеличения коэффициента гидравлического сопротивления, равное 18, для разработанной конструкции электромагнитного тормоза двухуровневой системы электромагнитного воздействия, встраиваемой в корпус кристаллизатора сортовой МНЛЗ, производящей трубные заготовки диаметром 130 мм.

Решенная выше задача может быть существенно расширена по своему значению, если на текущий металл будет действовать не только постоянное магнитное поле, но и вращающееся. Появляется вращающий момент электромагнитных сил, способных дробить растущие дендриты, измельчая тем самым структуру формируемого слитка.

В связи с чем сформулировали следующую задачу провести теоретическую оценку величины механического вращательного момента, действующего со стороны вращающегося магнитного поля на единицу стационарного объема расплавленного металла (магнетика), находящегося внутри статора цилиндрической формы радиусом  $R$  и высотой  $L$ . Статор четырехполюсный (число пар полюсов – 2). Ток через обмотки полюсов – двухфазный. Ток  $I_2$  сдвинут по фазе на  $\pi/4$  относительно тока  $I_1$ .

Рассмотрели характер вращения магнитного поля  $H$ , создаваемого двухфазным током, сдвинутым по фазе на  $\pi/4$  или на  $90^\circ$ , представленным на рисунке 2.4.

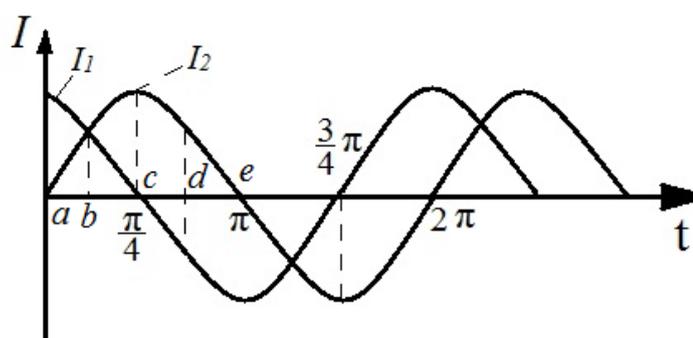


Рисунок 2.4 – Временная зависимость токов  $I_1$  и  $I_2$ , протекающих по парам обмоток 1 и 2

Если пропустить ток  $I_1$  по одной, а ток  $I_2$  по другой паре катушек, расположенных на железном кольце под углом  $90^\circ$ , как изображено на рисунке 2.5, то внутри кольца будет существовать вращающееся магнитное поле, на котором пунктирными линиями изображено направление силовых линий вращающегося магнитного поля, а стрелкой изображено направление поля в данный момент времени.

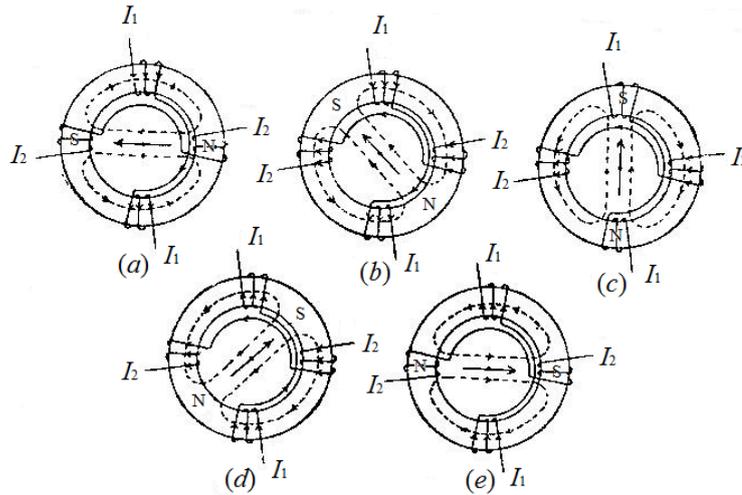


Рисунок 2.5 – Картина вращающегося магнитного поля: *a* –  $I_1$  достиг наибольшего значения,  $I_2 = 0$ ; *b* –  $I_1 = I_2$  *c* –  $I_1 = 0$ ,  $I_2$  равен амплитуде; *d* –  $I_2 = I_1$ , но ток  $I_1$  имеет обратное направление; *e* –  $I_1$  равен амплитуде, и ток  $I_2 = 0$

На рисунке 2.5 изображены разные моменты за полупериоды изменения тока; переход от одного положения магнитного поля к другому совершается постепенно и непрерывно.

Рассмотрели двухфазное вращающееся магнитное поле с частотой вращения  $n_1$ , об./мин:

$$n_1 = \frac{f_1}{p} 60, \quad (2.16)$$

где  $f_1$  – частота переменного тока (Гц);  $p$  – число пар полюсов.

Пусть  $f_1 = 50$  Гц,  $p = 2$ , тогда

$$n_1 = \frac{50}{2} 60 = 1500 \text{ (об/мин)} \quad (2.17)$$

Пусть замкнутый сердечник является частью статора, а катушки намотаны на его четыре полюса. Пространство между полюсами заполнено магнетиком так, что он может свободно вращаться на оси, проходящей через центр цилиндрического статора (рисунок 2.6).

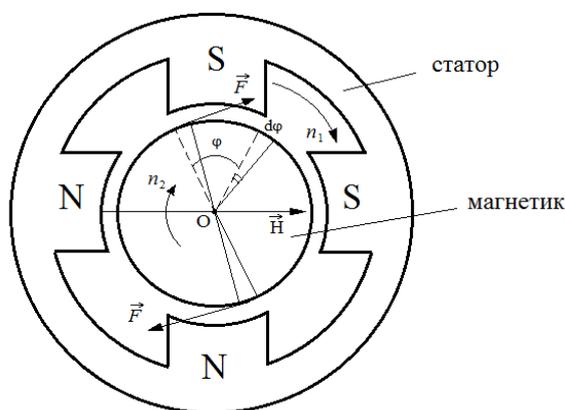


Рисунок 2.6 – Относительное расположение статора и цилиндрического магнетика:  $n_1$  – скорость вращения поля, об/мин;  $n_2$  – скорость вращения жидкого металла, об/мин;  $d\varphi$  – угловой сдвиг жидкого металла за время  $dt$

После включения двухфазного тока, вращающееся магнитное поле индуцирует в поверхностном слое цилиндрического магнетика токи. На рисунке 2.6 показали относительное расположение статора и жидкого металла-магнетика без указания особенностей их конструкции.

Очевидно, что  $n_1 > n_2$ , так как в противном случае, если  $n_1 = n_2$ , изменение магнитного потока в магнетике будет отсутствовать. Индуцируемые токи будут иметь такое направление, чтобы препятствовать причине их вызвавшей, т.е. при росте основного тока  $I_1$  в статоре, индукционный ток будет такого направления, магнитное поле от которого будет направлено против основного поля. Таким образом, напротив северного полюса статора индуцируется южный полюс в магнетике, что приведет к возникновению касательной силы, сдвигающей элемент ферромагнетика. Эти силы для противоположных полюсов статора будут направлены в разные стороны, создавая вращательный механический момент, действующий на магнетик.

Провели оценку величины механического вращательного момента, действующего на магнетик. Для этого использовали поясняющий рисунок 2.7.

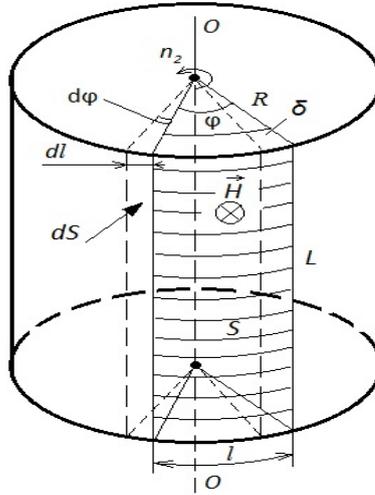


Рисунок 2.7 – Цилиндр магнетика, находящийся между полюсами статора

Заштрихованная площадь цилиндра соответствует площади полюса статора:

$$S = l \cdot L$$

Вся эта площадь пронизывается силовыми линиями магнитного поля статора –  $H(t)$ . Поле вращается относительно ротора с частотой  $(n_1 - n_2)$ . При этом изменение магнитного потока будет:

$$d\Phi = BdS = \mu\mu_0 HdS, \quad (2.18)$$

где  $dS = L \cdot dl = LRd\varphi = LR \frac{2\pi(n_1 - n_2)}{60} dt$ , м<sup>2</sup>;  $\mu$  – магнитная проницаемость магнетика.

Окончательно получили

$$d\Phi = \mu\mu_0 HLR \frac{2\pi(n_1 - n_2)}{60} dt, \quad (2.19)$$

$$n_2 = n_1(1 - s) = \left( \frac{f_1 60}{p} (1 - s) \right), \quad (2.20)$$

где  $f_1$  – частота тока, Гц;  $p$  – число пар полюсов;  $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$  – скольжение или запаздывание частоты вращения магнетика относительно вращения магнитного поля.

Электродвижущая сила индукции в направлении образующей цилиндра магнетика по модулю будет:

$$\varepsilon_{\text{инд}} = \frac{d\Phi}{dt} = \mu\mu_0 HLR \frac{2\pi(n_1 - n_2)}{60} = \frac{\pi}{30} \mu\mu_0 HLR s n_1. \quad (2.21)$$

При этом ток индукции:

$$I_{\text{инд}} = \frac{\varepsilon_{\text{инд}}}{r}, \quad (2.22)$$

где  $r$  – сопротивление «замкнутой» полей  $H$ , Ом, за время  $dt$ , с, площади  $dS$ , м<sup>2</sup>,  $\delta$  – глубина проникновения поля в магнетик, (м). Тогда согласно рисунку 2.6:

$$r = \rho \frac{L}{dl \cdot \delta} = \rho \frac{2L}{\pi \delta R S}, \quad (2.23)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление магнетика, Ом·м.

Ток индукции, при этом будет:

$$I_{\text{инд}} = \frac{\mu\mu_0 \pi \delta H S s^2 n_1}{60 \rho}, \quad (2.24)$$

где  $S = \pi R^2$  – площадь торца магнетика, м<sup>2</sup>.

Сила Ампера  $F_A$ , Н, действующая со стороны магнитного поля на  $I_{\text{инд}}$ :

$$F_A = I_{\text{инд}} \cdot B \cdot L = \frac{\mu\mu_0 H^2 \pi \delta s^2 V n_1}{60 \rho}, \quad (2.25)$$

где  $V = S \cdot L$  – объем магнетика, охватываемого статором, м<sup>3</sup>.

Вращательный механический момент  $M$ , Н/м<sup>3</sup>, действующий на единицу объема магнетика, будет:

$$M = \frac{F_A}{dV} = F_A \cdot R = \frac{\mu\mu_0 H^2 \pi \delta s^2 n_1}{60\rho} R. \quad (2.26)$$

Напряженность магнитного поля статора  $H$ , А/м, рассчитали с помощью теоремы о его циркуляции, т.е.

$$\int_L H dl = \sum_i I_i w_i,$$

где  $I_i$  – ток, текущий в обмотке статора, А;  $w_i = N_i/l_i$  – число витков на единицу длины обмотки.

Полученный результат решения поставленной выше задачи, конечно может быть не точным, а оценочным, поскольку при решении этой задачи не были учтены многие факторы, влияющие на конечный результат. Во-первых, магнитное поле, формируемое полюсами статора, не все по величине взаимодействует с магнетиком, а частично рассеивается в существующих зазорах между полюсом и «телом» магнетика. Во-вторых, расчёт проводили для покоящегося объема жидкого металла относительно статора. При текущем металле необходимо учитывать возникающее магнитное поле «сноса»  $H_x$ . На интенсивность вращения жидкого металла под действием вращательного момента также будут оказывать влияние его вязкость, профиль скоростей слоев текущего металла и линейная скорость кристаллизации.

Результат решения позволил качественно понять механизм взаимодействия вращающегося магнитного поля с жидким магнетиком и утверждать, что вращающий момент [339]:

- 1) пропорционален квадрату величины напряженности бегущего магнитного поля;
- 2) квадратично зависит от величины скольжения поля;
- 3) пропорционален глубине проникновения магнитного поля в магнетик;
- 4) обратно пропорционален удельному сопротивлению вращаемого жидкого металла.

## 2.2. Исследование электромагнитного перемешивания, встроенного в кристаллизаторы МНЛЗ

С использованием системы «Ansys Multiphysics» выполнили математическое моделирование вращающегося магнитного поля в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ и турбулентного течения расплава при воздействии электромагнитных сил. Все рассчитанные зависимости гидродинамики расплава кристаллизующейся непрерывной заготовки при ЭМП проверяли на адекватность результатам физического моделирования, рассмотренным далее в третьей главе, по критерию Фишера.

На рисунках 2.8 и 2.9 приведены результаты математического моделирования МГД-процессов в низкоуглеродистой стали при ЭМП в кристаллизаторе сечением 125x125 мм для максимальных горизонтальных скоростей вихревого течения в центральном сечении статора при наложении вращающегося электромагнитного поля [340].

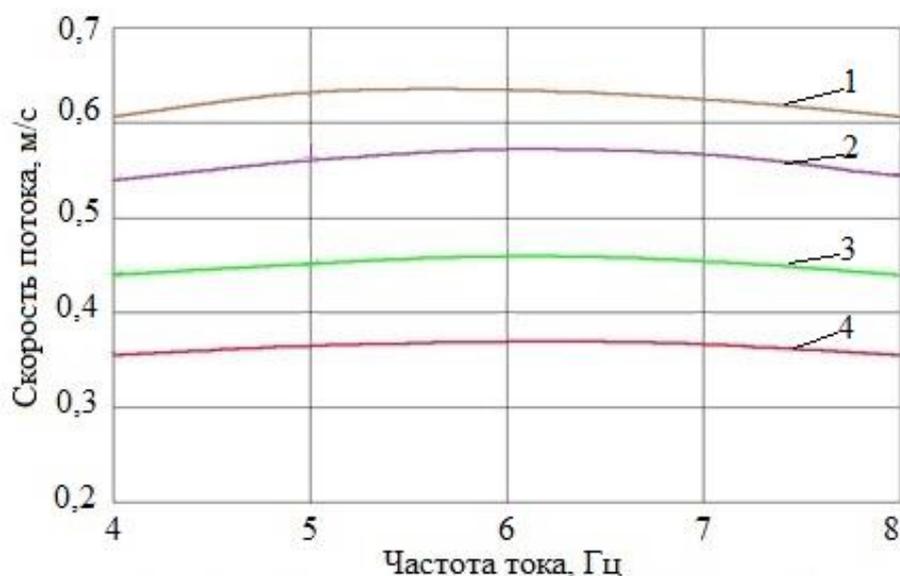


Рисунок 2.8 – Зависимость скорости потока расплава от частоты при токах фазы 150 (1), 115 (2), 100 (3) и 78 А (4)

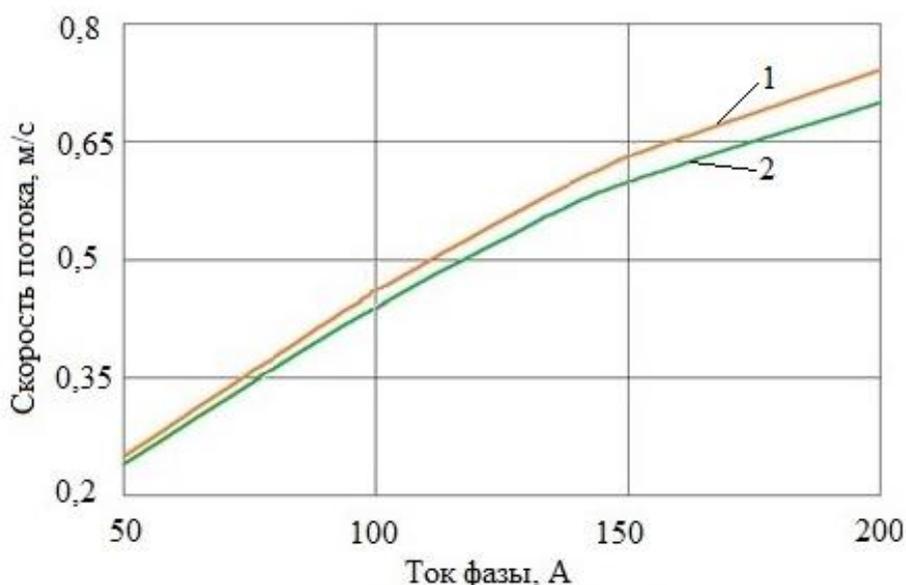


Рисунок 2.9 – Зависимость скорости потока расплава от тока фазы при частотах тока 6 (1) и 8 Гц (2)

На основании проведенных исследований установлено влияние основных электротехнических параметров ЭМП (частоты и тока фазы статора) на гидродинамику жидкой фазы кристаллизующейся НЛЗ.

Выявлено, что скорости потоков в центральном сечении исследуемого статора возрастают с увеличением тока фазы и достигают максимального значения при оптимальной частоте 6 Гц.

В процессе проведенных опытных разливок стали на машинах горизонтального непрерывного литья (ГМНЛЗ), а также другими исследователями было установлено, что горизонтальная разливка имеет свои особенности:

- в процессе затвердевания корки заготовки в верхней зоне кристаллизатора образующаяся корка имеет более тонкие стенки, чем в его нижней зоне, что приводит к образованию газового зазора, существенно снижающего теплоотвод от кристаллизующегося металла и порождающего запаздывание процесса затвердевания корки в верхней зоне кристаллизатора;

- конвективные потоки горячего расплава, размывают верхние участки корки и снижают скорость затвердевания, а фронт кристаллизации смещается вверх и становится не симметричным по отношению к оси слитка;

– качество заготовок, производимых на ГМНЛЗ, снижается вследствие того, что немаetalлические включения и газовые пузыри всплывают и как бы прижимаются к верхней поверхности.

Одним из вариантов модернизации ГМНЛЗ для повышения качества заготовок может быть встраивание устройства электромагнитного перемешивания металла, для осуществления которого исследовали различные варианты ЭМП, способные изменить условия затвердевания и создать принудительное движение расплава.

С целью разработки рациональной конструкции статора ЭМП в кристаллизаторе горизонтальной МНЛЗ выполнили математическое моделирование с использованием системы «Ansys Multiphysics» (рисунки 2.10 и 2.11) [341].

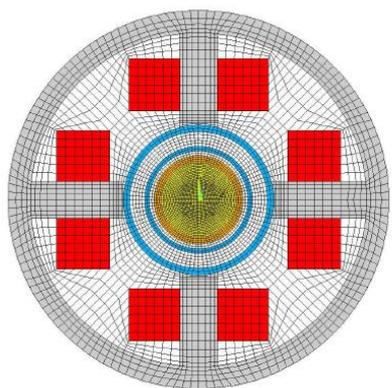


Рисунок 2.10 – Модель для расчёта электромагнитных сил в заготовке диаметром 80 мм, толщина стенки гильзы 8 мм

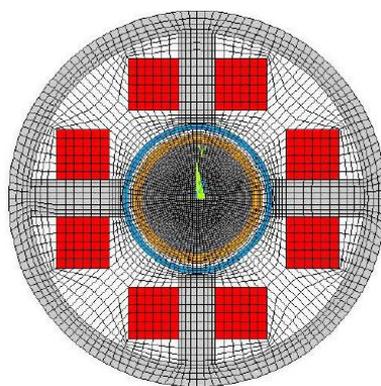


Рисунок 2.11 – Модель для расчёта электромагнитных сил в заготовке диаметром 120 мм, толщина стенки гильзы 10 мм

Произведенные расчёты позволяют моделировать статор в натуральную величину и определять создаваемое им электромагнитное поле (рисунок 2.12) и силы вращения, действующие на жидкую сталь (рисунок 2.13).

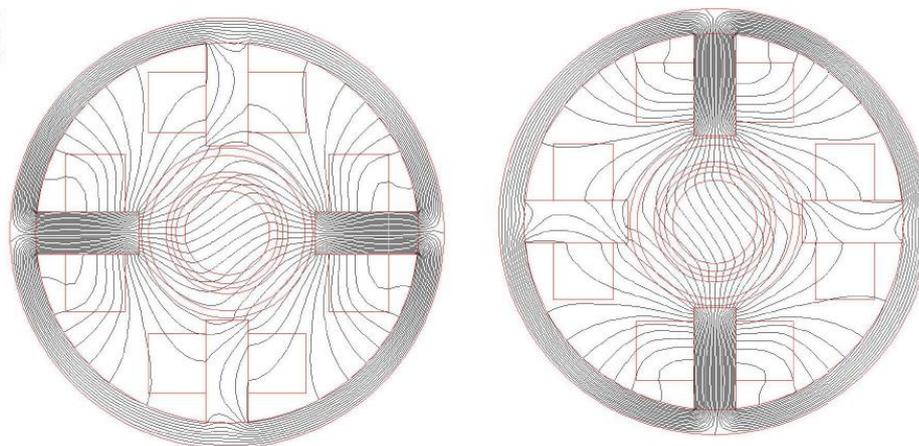


Рисунок 2.12 – Магнитное поле статора, пронизывающее медную гильзу и заготовку диаметром 80 мм в различные моменты времени: слева – ток в фазе А максимален, справа – ток в фазе В максимален

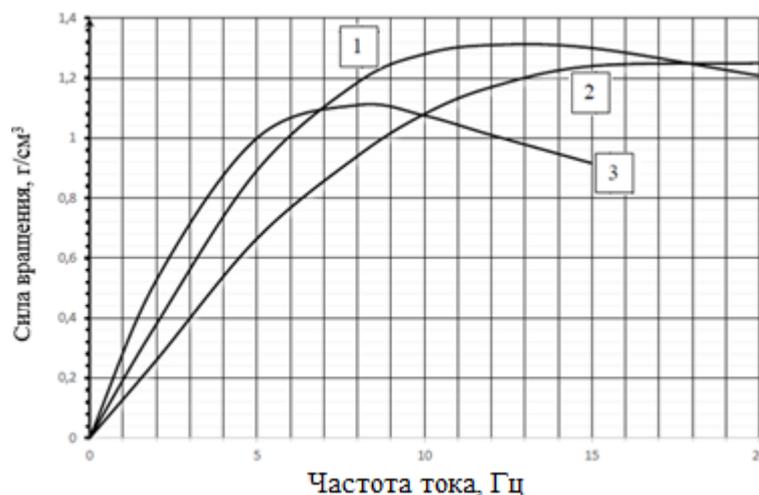


Рисунок 2.13 – Зависимость силы вращения жидкой фазы от частоты питающего тока для заготовок диаметром 100 (1), 80 (2) и 120 мм (3)

Приведенное на рисунке 2.12 магнитное поле показывает, как создаваемое статором вращающееся магнитное поле пронизывает жидкую фазу заготовки, заставляя её асинхронно вращаться.

На рисунке 2.13 приведен характер изменения сил вращения в зависимости от частоты питания статора при значении фазного тока 150 А. Коррекцию полученных результатов при трехмерном моделировании магнитного поля статора не проводили.

По результатам моделирования для разрабатываемой конструкции статора ЭМП в кристаллизаторе МНЛЗ горизонтального типа установили рациональные режимы электромагнитного перемешивания при литье заготовок диаметром, мм:

- 80 с толщиной стенок медной гильзы 8 мм: частота 15 Гц, фазный ток 150 А;
- 100 с толщиной стенок 8 мм: частота 13 Гц, фазный ток 150 А;
- 120 с толщиной стенок 10 мм: частота 8 Гц, фазный ток 150 А.

Выявлено, что максимальные силы вращения возникают в области магнитопровода с катушкой и расположены на расстоянии 10 мм от внутренней поверхности медной гильзы, толщина которой равна 8 мм для заготовок диаметром 80 и 100 мм, а для диаметра 120 мм толщина составляет 10 мм.

Кроме того, установлено, что значение рациональной частоты не зависит от величины фазного тока. В центре заготовки величина силы вращения равна нулю.

В процессе исследований установлено, что в зависимости от требуемого металлургического эффекта (например, устранение спаев на поверхности заготовок) при рациональной частоте питания величиной фазного тока можно регулировать интенсивность перемешивания.

### **2.3. Исследование электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе наружного исполнения**

С целью разработки конструкции статора ЭМП в кристаллизаторе наружного исполнения для производства круглых заготовок диаметром 150–410 мм провели математическое моделирование МГД-процессов стального расплава с использованием известных двумерных конечно-элементных моделей.

Статор ЭМП работает следующим образом. Катушки полюсов, соединенные в фазе между собой последовательно, образуют трехфазную обмотку статора ЭМП. При питании обмоток трехфазной системой токов, сдвинутых по фазе на 120 электрических градусов, в полости статора возбуждается двухполюсное магнитное поле, вращающееся вокруг вертикальной оси заготовки (рисунок 2.14).

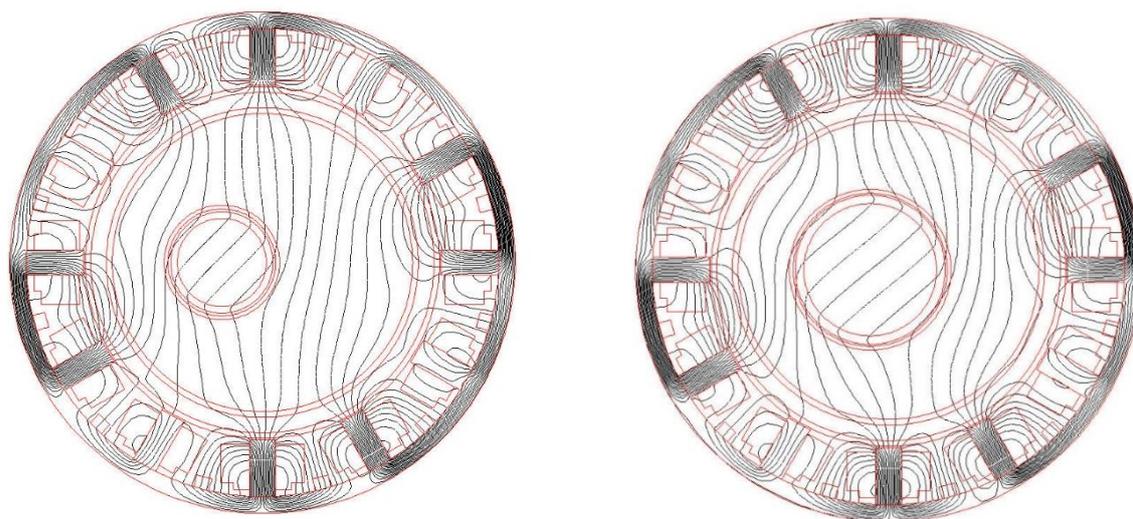


Рисунок 2.14 – Магнитное поле в момент времени, при максимальном токе в фазе А: для заготовок диаметром 228 (слева) и 340 мм (справа)

В жидкой фазе заготовки наводятся вихревые токи, взаимодействующие с магнитным полем. В результате в заготовке возникает поле принудительных электродинамических сил. Под действием этих сил жидкий металл в заготовке приходит в движение, создающее положительные металлургические эффекты.

В разработанном устройстве ЭМП медная гильза кристаллизатора располагается несимметрично относительно статора: чем меньше диаметр слитка, тем дальше ось слитка отстоит от центра статора.

Например, у гильзы для заготовки диаметром 228 мм смещение от центра статора составляет 106 мм, а для диаметра 340 мм – 47 мм. Это приводит к несимметрии сил вращения (рисунки 2.14–2.16) и к несимметрии гидродинамики жидкого расплава в сечении заготовки [342].

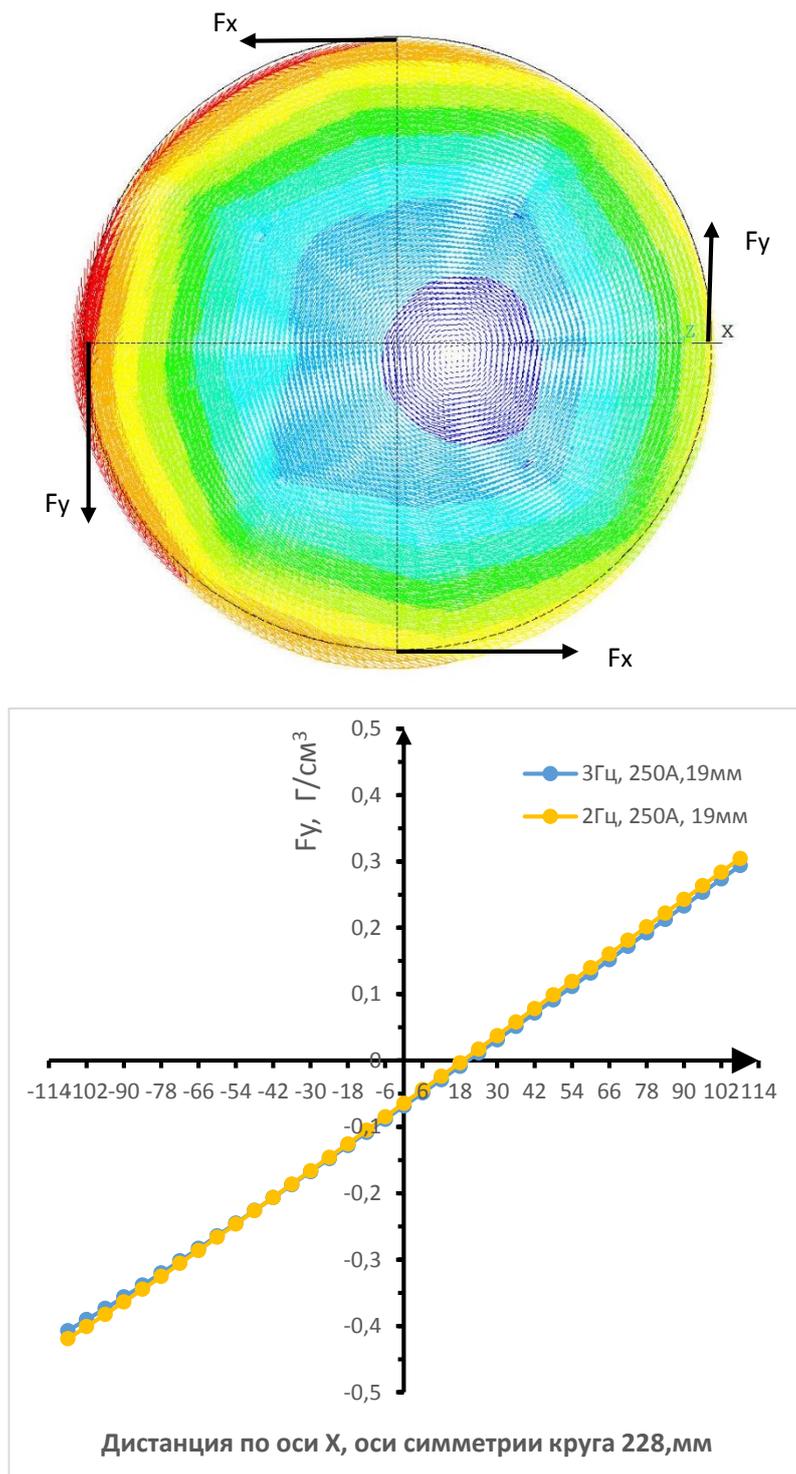


Рисунок 2.15 – Поле удельных сил вращения ( $\text{г/см}^3$ ) в заготовке диаметром 228 мм, расположенном на расстоянии 106 мм от центра статора

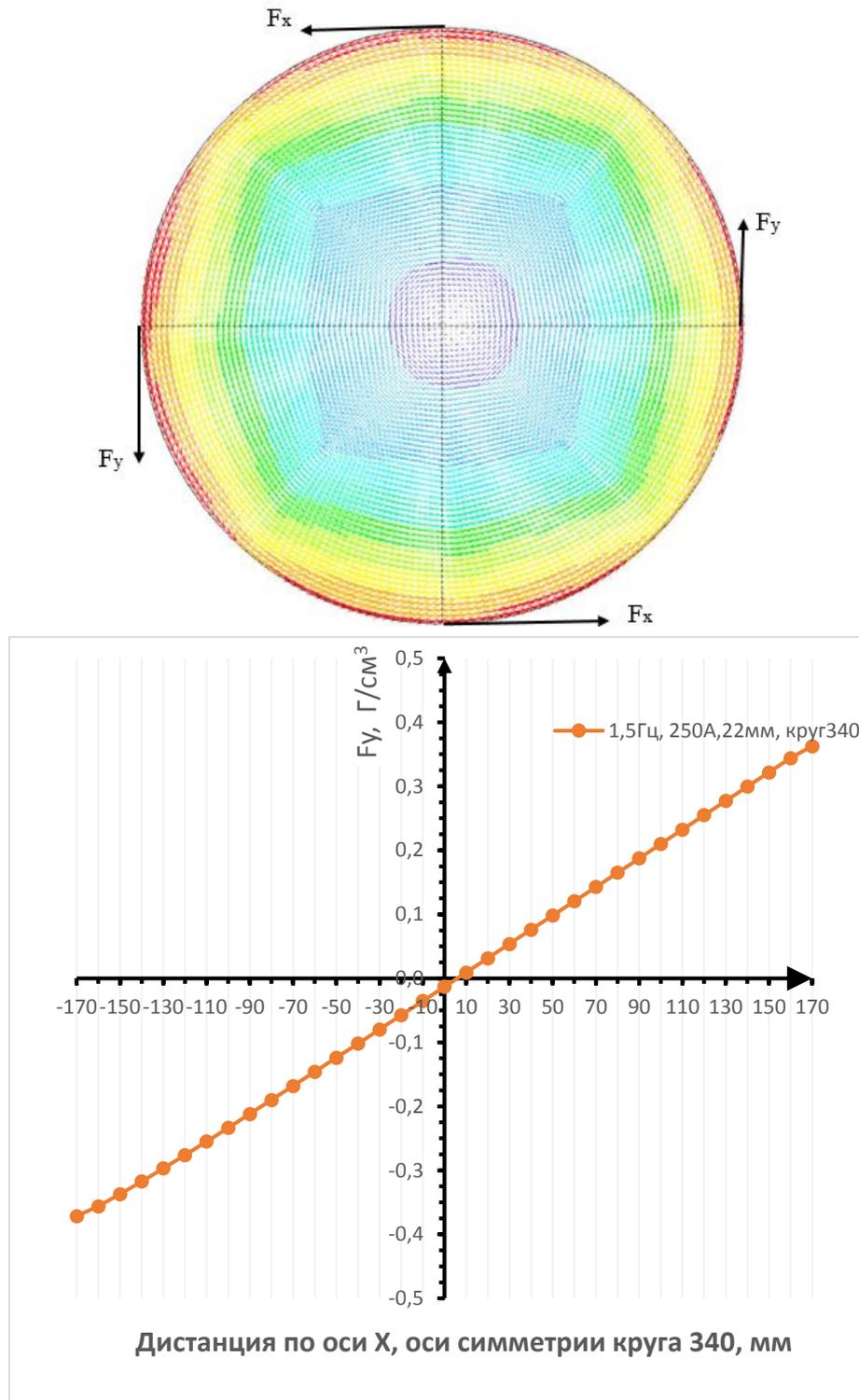


Рисунок 2.16 – Поле удельных сил вращения ( $\text{Г/см}^3$ ) в заготовке диаметром 340 мм, расположенном на расстоянии 47 мм от центра статора

Толщина стенок медных гильз кристаллизатора также существенно влияет на величину интенсивности электромагнитного перемешивания. Чем толще стенка, тем сильнее экранирование магнитного поля статора. Поэтому рациональная частота питания статора в кристаллизаторе, при которой достигается

максимальные значения сил вращения, снижается.

На рисунках 2.17 и 2.18 приведены расчётные зависимости максимальных сил вращения стального расплава от рациональной частоты тока для заготовок диаметром 228 и 340 мм.

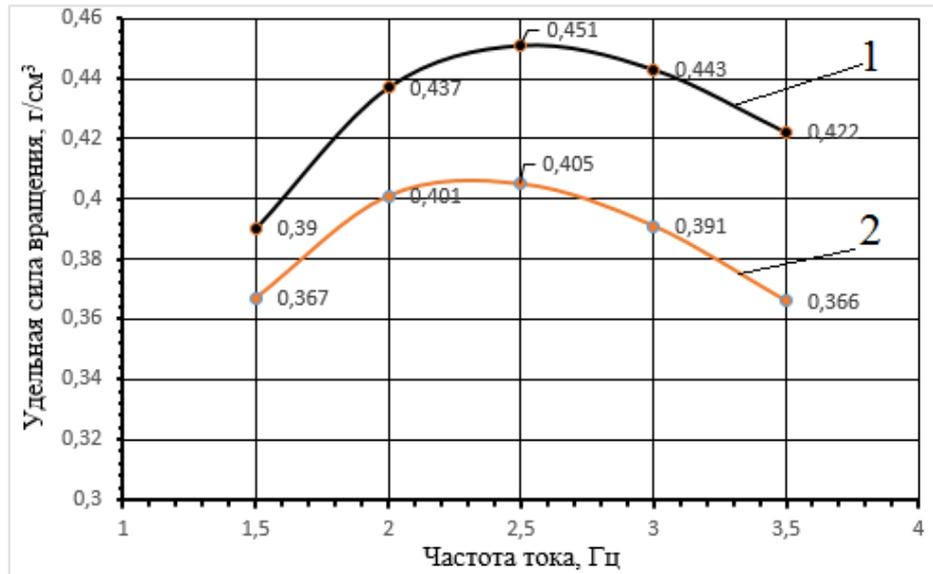


Рисунок 2.17 – Зависимость силы вращения в заготовках диаметром 228 мм от частоты при токе фазы 250 А (стенки гильзы толщиной: 17 (1) и 19 мм (2))

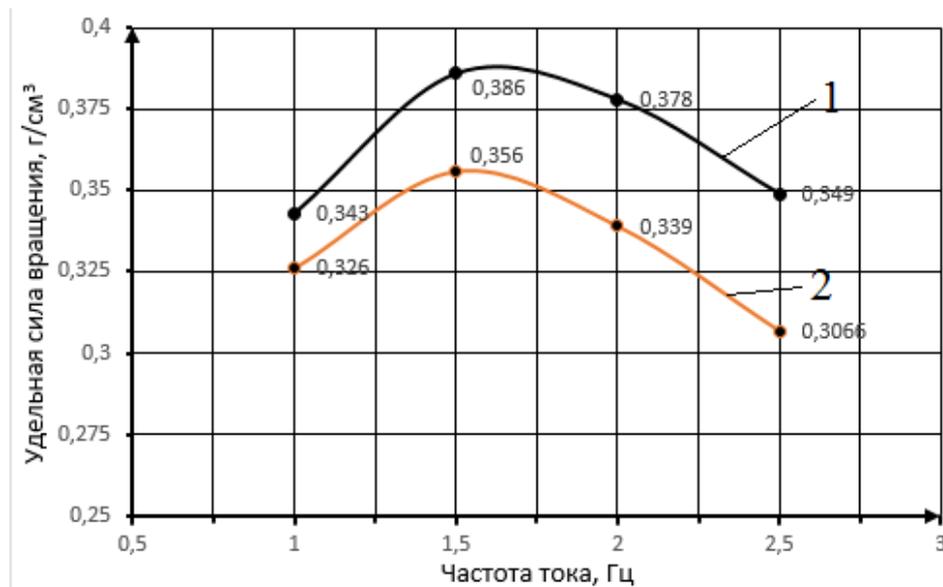


Рисунок 2.18 – Зависимость силы вращения в заготовках диаметром 340 мм от частоты при токе фазы 250 А (стенка гильзы толщиной: 20 (1) и 22 мм (2))

По результатам проведенного моделирования определили рациональные режимы электромагнитного перемешивания для всего размерного сортамента

производимых заготовок. В соответствии с результатами моделирования установлены рациональные частоты питающего тока для ЭМП в кристаллизаторе наружного исполнения для заготовок диаметром 228 и 340 мм, обеспечивающие эффективный диапазон скоростей движения жидкого металла 0,3-0,56 м/с, при этом рациональная частота питающего тока для заготовок диаметром 228 мм при стенке гильзы 19 мм составила 2,25 Гц, при толщине 17 мм – 2,5 Гц. То же для диаметра 340 мм при стенке гильзы 22 мм – 1,5 Гц, при 20 мм – 1,75 Гц [343].

Приведенные расчёты показали, что данное устройство ЭМП позволяет достичь рационального диапазона скоростей движения расплава, обеспечивающих достижение необходимого качества непрерывно-литых заготовок.

#### 2.4. Исследование двухуровневого электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания машины полунепрерывного литья заготовок

На основе программного продукта «Ansys Multiphysics» провели расчёты разрабатываемых статоров в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания машины полунепрерывного литья заготовок и создаваемых ими полей скоростей стального расплава. На рисунке 2.19 привели рассчитанное поле скоростей в поперечном сечении круглой заготовки диаметром 250 мм в центральной плоскости статора ЭМП (а) и на уровне мениска в кристаллизаторе (б) без учета шлакового гарнисажа (ток фазы 200 А, частота тока 4 Гц) [344].

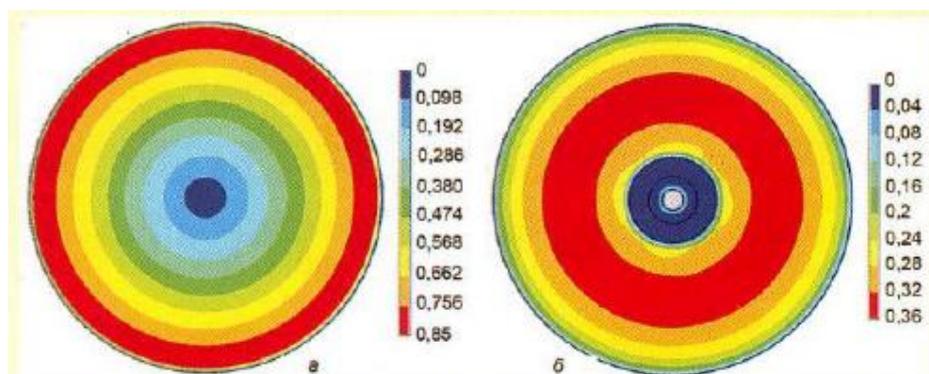


Рисунок 2.19 – Горизонтальное поле скоростей (м/с) в поперечном сечении заготовок диаметром 250 мм с ЭМП: а) центральная плоскость статора; б) на уровне мениска кристаллизатора

В расчётной области длиной 2 м, образованной закристаллизовавшейся коркой слитка и прямоточным погружным стаканом кристаллизатора, провели исследование электромагнитного перемешивания. Ось статора располагалась на удалении 400 мм от мениска металла в кристаллизаторе. Как уже было ранее сказано в этой главе, рациональная частота питающего тока зависит от наличия и конфигурации проводящих сред в зазоре между полюсами электромагнитной системы, в частности от толщины стенок медной гильзы и рубашки охлаждения, поскольку они экранируют магнитное поле. Выявлено (рисунок 2.20), что максимальные скорости жидкой фазы 0,85 и 0,65 м/с достигаются у фронта затвердевания заготовок диаметром 250 и 360 мм при фазном токе 200 А и частоте 3,5–5,0 Гц и 1,5–2,5 Гц соответственно.

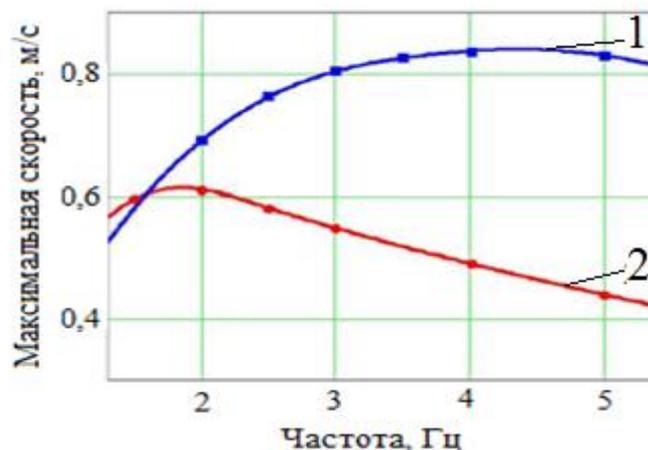


Рисунок 2.20 – Зависимость максимальных скоростей потоков при ЭМП в кристаллизаторе от частоты в заготовках диаметром 250 (1) и 360 мм (2)

В зоне окончания затвердевания максимальные скорости перемешивания 0,5–1,0 м/с достигаются у фронта кристаллизации при фазном токе 200 А и частоте тока 7–9 Гц [341].

В процессе исследований регулирование скорости перемешивания осуществляли изменением величины тока фазы, при этом скорость перемешивания прямо пропорциональна току статора.

На основании исследования полей скоростей вдоль вертикальной технологической оси МПНЛЗ при использовании ЭМП (рисунок 2.21) установили, что при ЭМП в кристаллизаторе в центральной плоскости статора замедляется скорость струи стального расплава, поступающего из погружного стакана в кристаллизатор.

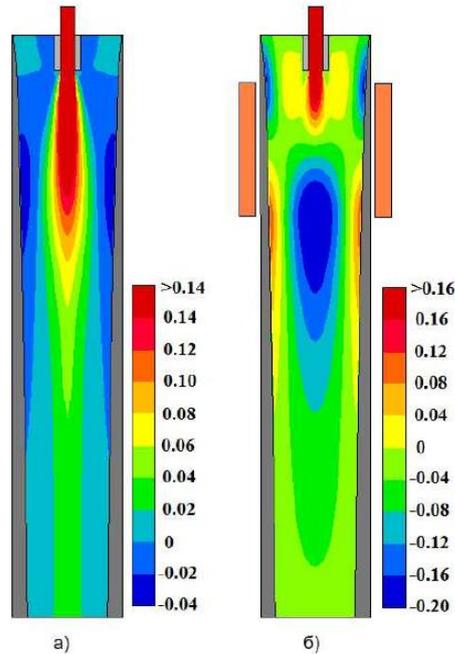


Рисунок 2.21 – Вертикальное поле скоростей (м/с) в заготовке диаметром 250 мм:  
 а) без ЭМП; б) с ЭМП в кристаллизаторе (ток фазы 200 А, частота 2 Гц)  
 (положительные значения скоростей при движении металла по направлению  
 вытягивания слитка)

Установлено, что при ЭМП вращательное движение металла проникает на глубину до 1,5 м от мениска в кристаллизаторе. Данное распределение потоков жидкого металла приводит к выравниванию градиента температурного поля в жидкой фазе блюмовых заготовок и быстрому снятию перегрева (рисунок 2.22).

В соответствии с расчётной информацией о затвердевании полунепрерывной заготовки в зависимости от скорости вытягивания выявили требуемое положение жидкой фазы слитка, составляющей 20—40 %, с целью перемещения кареток со статорами ЭМП вдоль оси слитка со скоростью, соответствующей скорости кристаллизации заготовки [344].

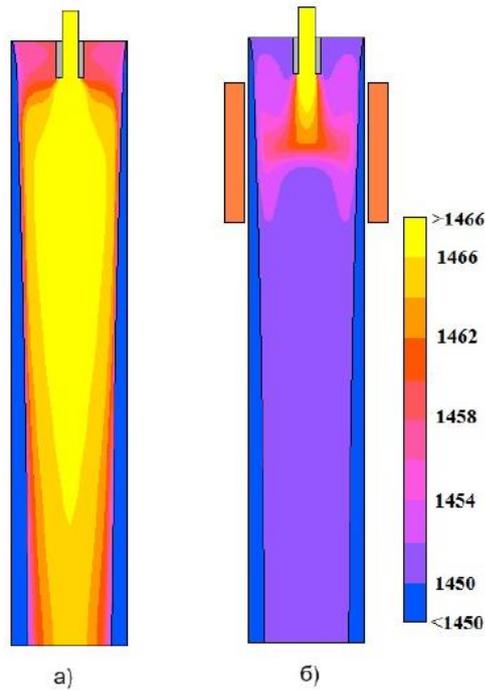


Рисунок 2.22 – Температурные поля ( $^{\circ}\text{C}$ ) движения расплава в жидкой фазе заготовки диаметром 250 мм: а) без ЭМП; б) с ЭМП в кристаллизаторе (ток фазы 200 А, частота 4 Гц)

## 2.5. Инженерная методика расчёта электротехнических параметров статора и максимальной скорости расплава при электромагнитном перемешивании

В представленной методике (рисунок 2.23) для определения максимального значения скорости движения расплава при ЭМП использовали индукцию вращающегося магнитного поля в центре статора.

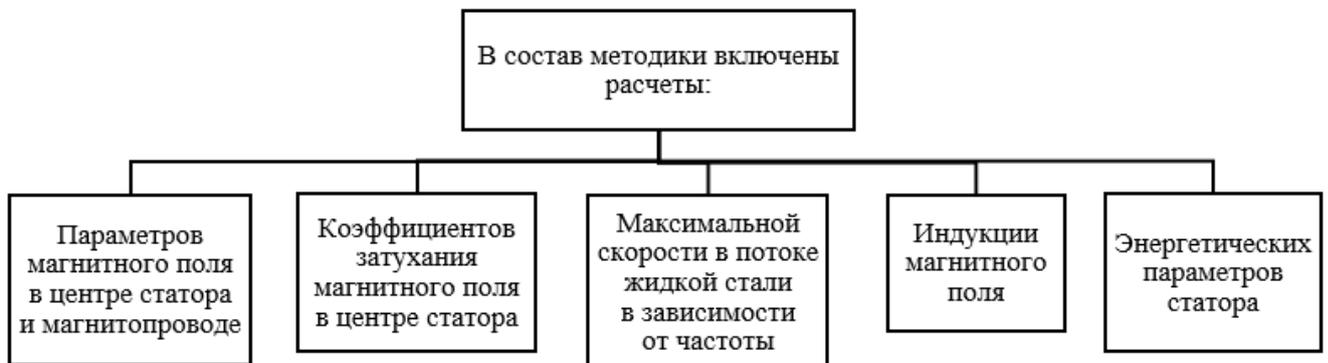


Рисунок 2.23 – Состав методики расчёта электротехнических параметров статора и максимальной скорости расплава

**Параметры магнитного поля в центре статора и магнитопроводе при частоте тока равной 0 Гц определяли по следующей методике:**

1. По исходным и конструктивным параметрам статора определили амплитудное значение магнитодвижущей силы (МДС), соответствующей одному полюсу магнитного поля:

$$F = \frac{(m \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot w \cdot K_y)}{\pi \cdot n}, \quad (2.28)$$

где  $m$  – количество фаз;  $I$  – ток фазы, А;  $w$  – число витков фазы;  $n$  – количество пар полюсов;  $K_y = \cos 180^\circ \cdot (\tau - \frac{y}{2\tau})$  – коэффициент укорочения обмотки;  $\tau = \frac{(\pi \cdot \delta)}{2}$  – полюсное деление;  $y$  – ширина катушки, м;  $\delta$  – расстояние между полюсами, м.

2. МДС в воздушном зазоре установили по выражению:

$$F_\delta = F / K_\mu, \quad (2.29)$$

где  $K_\mu = 1,05-1,15$  – коэффициент насыщения магнитной системы, значение которого принимали предварительно;

3. Индукцию магнитного поля в центре статора вычислили по формуле:

$$B_\delta = \frac{\mu_0 \cdot F \cdot \delta}{0,5 \cdot \delta \cdot K_1}, \text{ Тл}, \quad (2.30)$$

где  $\mu_0 = 1,2566 \cdot 10^{-6}$  – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м;  $K_1 = 1,35-1,42$  – коэффициент, учитывающий неравномерное распределения индукции в зазоре между полюсами при разливке сортовых заготовок;

4. Индукцию магнитного поля в полюсе у рабочей поверхности определили по выражению:

$$B_{n.min} = K_2 \cdot B_\delta, \quad (2.31)$$

где  $K_2 = 2,16-2,3$  – коэффициент, принимающий в расчет увеличение индукции у поверхности полюса, по сравнению с индукцией в центре статора (для сортовых заготовок);

5. Индукцию магнитного поля в полюсе у ярма определили из выражения:

$$B_{n.max} = K_3 \cdot B_{n.min} \quad (2.40)$$

где  $K_3 = 2,4-3,1$  – коэффициент, учитывающий возрастание индукции в полюсе у ярма за счет потоков рассеяния полюса;

6. Индукцию магнитного поля в среднем сечении по высоте полюса установили из выражения:

$$B_{n.c.p.} = 0,5 \cdot (B_{n.min} + B_{n.max}); \quad (2.41)$$

7. Индукцию магнитного поля в ярме статора рассчитали по формуле:

$$B_{я} = \frac{B_{n.max} \cdot B_n}{2 \cdot h_{я}}, \quad (2.42)$$

где  $h_{я}$  – высота ярма, м;

8. Расчётную напряженность магнитного поля в полюсе определили из выражения:

$$H_n = \frac{(H_{n.min} + 4 \cdot H_{n.c.p.} + H_{n.max})}{6}, \text{ А/м}; \quad (2.43)$$

9. МДС, приходящуюся на полюс, установили из выражения:

$$F_n = H_n \cdot h_n, \quad (2.44)$$

где  $h_n$  – высота полюса, м;

10. МДС, соответствующую ярму статора, рассчитали по формуле:

$$F_{я} = H_{я} \cdot l_{я}, \quad (2.45)$$

где  $l_{я}$  – длина ярма, м:  $l_{я} = \frac{\pi \cdot (\delta + 2 \cdot H_n + H_{я})}{4}$ ;

11. МДС на один полюс магнитного поля определили из выражения:

$$F = F_{\delta} + F_n + F_{я}; \quad (2.46)$$

12. При совпадении значения магнитодвижущей силы со значением МДС в (2.28), считали, что предварительно принятый коэффициент насыщения магнитной цепи  $K_{\mu}$  в формуле (2.29) определен верно, так же как и величины индукции в отдельных элементах магнитопровода статора. При отклонении МДС корректировали значение  $K_{\mu}$  и проводили новый расчёт магнитной системы.

**Коэффициенты затухания магнитного поля в центре статора определяли по следующей методике:**

1. Удельную электропроводность медной гильзы кристаллизатора при температуре наружной поверхности 150 °С определили из выражения:

$$\gamma_{150} = \frac{\gamma_{20}}{[1 + \alpha \cdot (T - 20)]}, \quad (2.47)$$

где -  $\gamma_{20}$  – электропроводность гильзы при комнатной температуре 20 °С, См;  $\alpha = 0,004$  1/град – температурный коэффициент сопротивления;  $T = 150$  °С – рабочая температура гильзы при непрерывной разливке стали;

2. Эквивалентную электропроводность, учитывающую совместное влияние гильзы и рубашки охлаждения рассчитали по формуле:

$$\gamma_3 = \frac{(\Delta_z \cdot \gamma_{150} + \Delta_p \cdot \gamma_p)}{\Delta_z}, \quad (2.48)$$

где  $\Delta_z$  – толщина стенки гильзы, м;  $\Delta_p$  – толщина стенки рубашки охлаждения, м;  $\gamma_p = 0,8 \cdot 10^6$ , См – электропроводность рубашки охлаждения (материал – аустенитная нержавеющая сталь);

3. Расчётный наружный размер гильзы определили из выражения:

$$d = K_d \cdot (A + 2\Delta_z), \quad (2.49)$$

где  $K_d = 3,4-1,4A$ ;  $A$  – сторона заготовки квадратного сечения, м;

4. Коэффициент ослабления магнитного поля из-за наличия гильзы и рубашки охлаждения свели к следующему выражению:

$$K_r = \frac{1}{(K \cdot \sqrt{1 + \frac{d^2 \cdot \Delta_z^2}{4 \cdot \eta^4}})}, \quad (2.50)$$

где  $K = 1,91 - 6,2A$ ;  $\eta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \gamma_3 \cdot f}}$ ;  $f$  – частота тока, Гц;

5. Коэффициент ослабления магнитного поля из-за наличия массивного магнитопровода определили из выражения:

$$K_m = 1 - 0,031 \cdot f \quad (2.51)$$

**Максимальная скорость стального расплава** в зависимости от частоты тока составила:

$$V_{\max} = K_4 \cdot K_5 \cdot d_{\text{вн}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (1 - e^{-3,6\sqrt{C}}) \cdot f(c); \quad (2.52)$$

где  $K_4 = 0,92 + 0,016 \cdot f$  – коэффициент, корректирующий положение максимума скорости;  $K_5 = 4,8 - 25,2 \cdot A$ ;  $d_{\text{вн}}$  – наружный диаметр жидкой фазы заготовки в кристаллизаторе, м;  $c = \frac{\gamma_{\text{см}} \cdot (B_0)^2}{4} \cdot \pi \cdot f \cdot q_{\text{см}}$ ;  $\gamma_{\text{см}}$  – удельная электропроводность жидкой стали, См;  $q_{\text{см}}$  – плотность жидкой стали, кг/м<sup>3</sup>;  $e = 2,71823$  – основание натурального логарифма;  $f(c) = 0,3$  при  $c \leq 0,1$ .

По приведенным выражениям рассчитали значения функций  $B=f(f)$  и  $V=f(f)$  в диапазоне частот от 3 до 10 Гц.

С ростом частоты увеличивается плотность вихревых токов в жидкой стали, что ведет к возрастанию объемной плотности силы и, соответственно, значения максимальной скорости расплава. Одновременно при увеличении частоты тока уменьшается индукция магнитного поля вследствие экранирования гильзы и рубашки охлаждения, приводящего к уменьшению объемной плотности силы и значения  $V_{\text{max}}$ . Изначально с увеличением частоты тока определяющее значение имеет первый фактор, затем второй. Таким образом существует оптимальная частота тока, при которой скорость  $V_{\text{max}}$  имеет наибольшее значение.

**Расчёт индукции магнитного поля при оптимальной частоте производили по следующим выражениям:**

$$\text{– в центре статора:} \quad B_0 = \frac{B_{\delta}}{K_{\Gamma}} \cdot K_m; \quad (2.53)$$

$$\text{– в полюсе у рабочей поверхности:} \quad B_{n.\text{min}} = K_2 \cdot B_0; \quad (2.54)$$

$$\text{– в полюсе у ярма:} \quad B_{n.\text{max}} = B_{n.\text{min}} \cdot \left(1 + \frac{K_3 - 1}{K_{\Gamma}}\right); \quad (2.55)$$

– в среднем сечении по высоте полюса:

$$B_{n.\text{cp.}} = 0,5 \cdot (B_{n.\text{min}} + B_{n.\text{max}}); \quad (2.56)$$

$$\text{– в ярме статора:} \quad B_{\text{я}} = B_{n.\text{max}} \cdot \left(\frac{B_n}{2 \cdot H_{\text{я}}}\right). \quad (2.57)$$

**Расчёт энергетических параметров статора при оптимальной частоте производили по следующей методике:**

– определили активное сопротивление обмотки фазы статора при температуре 20 °С:

$$R_{об-20} = 0,0175 \cdot \left( \frac{l_{cp} \cdot W}{S_{жс}} \right), \quad (2.58)$$

где 0,0175 Ом·мм<sup>2</sup>/м – удельное сопротивление меди при 20 °С;  $l_{cp}$  – средняя длина витка катушки полюса, м;  $S_{жс}$  – сечение медной жилы обмоточного провода катушки, мм<sup>2</sup>;

– установили активное сопротивление обмотки фазы статора при рабочей температуре медной жилы обмоточного провода:

$$R_{об-T} = R_{об-20} \cdot [1 + \alpha \cdot (T-20)]; \quad (2.59)$$

– вычислили активную мощность, приходящуюся на обмотку статора:

$$P_{об} = m \cdot I^2 \cdot R_{об-T}; \quad (2.60)$$

– определили активную мощность, приходящуюся на массивные полюса статора:

$$P_n = p_{уд} \cdot B_{n.ср.}^2 \cdot G_n, \quad (2.70)$$

где  $p_{уд}$  – удельные потери в массивном магнитопроводе при оптимальной частоте;  $G_n$  – вес полюсов статора;

– рассчитали активную мощность, приходящуюся на массивное ярмо статора:

$$P_я = p_{уд} \cdot B_я^2 \cdot G_я, \quad (2.71)$$

где  $G_я$  – вес ярма статора;

– активную мощность, приходящуюся на магнитопровод статора рассчитали по формуле:

$$P_m = P_n + P_я, \quad (2.72)$$

– для НЛЗ сечением 125x125 мм зависимость активной мощности, выделяющейся в гильзе, от частоты имеет следующее значение, Вт:

$$P_2 = 270 + 682,5 \cdot f, \quad (2.73)$$

где 270 Вт – потери активной мощности в медной гильзе при частоте тока 4 Гц;

– электромагнитную мощность, передаваемую стальному расплаву определили из выражения:

$$P_{эм} = F_{эм} \cdot V, \quad (2.74)$$

где  $F_{эм} = (B_0 \cdot K_I)^2 (A^2 \cdot L_n) \cdot \gamma_{cm} \cdot V_s$  – электромагнитное усилие;  $V$  – скорость поля;  $V_s$  – скорость скольжения;  $L_n$  – длина полюса, м;

– активную мощность статора рассчитали по формуле:

$$P = P_{об} + P_m + P_2 + P_{эм}; \quad (2.75)$$

– рассчитали активное сопротивление фазы статора:

$$R = \frac{P}{m \cdot I^2}; \quad (2.76)$$

– электродвижущая сила, наведенная в обмотке фазы статора вращающимся магнитным потоком немагнитного зазора, составила:

$$E = 4,44 \cdot B_{min} \cdot b_n \cdot L_n \cdot f \cdot w \cdot K_{II}, \quad (2.77)$$

где  $l_n$  – длина полюса, м;  $K_{II}$  – коэффициент, учитывающий увеличение тока по длине полюса с учетом рассеяния;

– главное индуктивное сопротивление статора, соответствующее магнитному потоку в немагнитном зазоре определили из выражения:

$$x_r = \frac{E}{I} \quad (2.78)$$

– индуктивное сопротивление фазы статора установили по формуле:

$$X = X_r \cdot \left(1 + \frac{K_3 - 1}{K_r}\right); \quad (2.79)$$

– значение полного сопротивления фазы статора определили из выражения:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad (2.80)$$

– напряжение фазы статора рассчитали по формуле:

$$U = I \cdot Z; \quad (2.81)$$

– определили полную мощность статора

$$S = m \cdot I \cdot U \quad (2.82)$$

При разработке методики расчета электротехнических параметров статора приняты во внимание материалы работы [235].

Созданная инженерная методика предоставляет возможность проведения расчётов электротехнических параметров статора электромагнитного

перемешивания и максимальной скорости движения расплава с учетом корректировок, полученных в результате исследования статора на физической модели, рассмотренного в третьей главе.

## Выводы по главе 2

1. В результате теоретических исследований движения жидкого металла в поперечном магнитном поле установлено:

– магнитное поле выравнивает профиль скоростей металла практически на всем поперечном сечении;

– наличие магнитного поля уменьшает среднюю скорость слоев текущего металла, т.е. притормаживает его, увеличивая при этом время нахождения перегретого жидкого металла в кристаллизаторе;

– магнитное поле приводит к выравниванию профиля скоростей и к увеличению скорости у фронта кристаллизации, вследствие чего, потоки тепла, массы и импульсов увеличиваются в направлении к фронту кристаллизации;

– действующее на текущий расплав магнитное поле, существенно влияет на кинетику кристаллизации жидкого металла, т.е. на формирование большего числа в единицу времени на единице площади зародышей, формирующих мелкозернистый кристалл;

– тормозящая объемная электромагнитная сила пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля. Для существующих конструкций ЭМТ электромагнитная сила существенно меньше объемной гравитационной силы, однако сравнима и даже существенно может превышать вязкостные силы, что определяется величиной числа Гартмана;

– наличие электрического контакта между жидким металлом и медным кристаллизатором с использованием ШОС с высокой электропроводностью позволит повысить эффективность электромагнитного торможения;

– получено значение относительного увеличения коэффициента гидравлического сопротивления, равное 18, для разработанной конструкции электромагнитного тормоза двухуровневого электромагнитного перемешивателя, встраиваемого в корпус кристаллизатора сортовой МНЛЗ, производящей трубные заготовки диаметром 130 мм.

2. На основании анализа взаимодействия бегущего магнитного поля с жидким металлом установлено:

2.1. Вращающий момент электромагнитных сил, возникающих под действием бегущего магнитного поля:

- пропорционален квадрату величины напряженности бегущего магнитного поля;
- квадратично зависит от величины скольжения поля;
- пропорционален глубине проникновения магнитного поля в магнетик;
- обратно пропорционален удельному сопротивлению вращаемого жидкого металла.

2.2. Скорость движения жидкой стали ( $V$ ) при электромагнитном перемешивании в зависимости от электротехнических параметров устройства, которая адаптируется по результатам экспериментальных исследований (глава 3), можно представить в виде функции  $V = k \cdot f(\bar{W})$ , где  $\bar{W}$  – вектор электротехнических параметров,  $k$  – эмпирический коэффициент. Эту формулу можно использовать при разработке исходных данных при проектировании.

3. По результатам исследования статора ЭМП в кристаллизаторе МНЛЗ горизонтального типа установлены рациональные режимы электромагнитного перемешивания при литье круглых заготовок диаметром 80, 100 и 120 мм.

4. Выявлено, что максимальные силы вращения при горизонтальном непрерывном литье возникают в области под серединой полюса и расположены на расстоянии 10 мм от внутренней поверхности медной гильзы, толщина 8-10 мм для заготовок диаметром 80, 100 и 120 мм.

5. Установлены рациональные частоты питающего тока для ЭМП в кристаллизаторе наружного исполнения для заготовок диаметром 228 и 340 мм, обеспечивающие эффективный диапазон скоростей движения жидкого металла 0,3-0,56 м/с для достижения необходимого качества непрерывно-литых заготовок.

7. Установлены рациональные режимы электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе машины полунепрерывного литья при литье заготовок диаметром 250 и 360 мм.

8. По результатам проведенных исследований разработана инженерная методика определения электротехнических параметров статора ЭМП и максимальной скорости движения расплава, которая включает следующие расчеты:

- параметров магнитного поля в центре статора и магнитопроводе;
- коэффициентов затухания магнитного поля в центре статора;
- максимальной скорости в потоке жидкой стали в зависимости от частоты;
- индукции магнитного поля;
- энергетических параметров статора.

Созданную инженерную методику следует применять с учетом корректировок, полученных в результате исследования статора на физической модели, рассмотренного в третьей главе.

## ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ СТАЛЬНОГО РАСПЛАВА НА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

### 3.1. Моделирование электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ

Одним из недостатков непрерывного литья заготовок сортового сечения «открытой» струей является то, что в кристаллизатор вместе со стальным расплавом попадают неметаллические включения (НВ) и пузырьки воздуха. Из-за небольшого радиуса сортового кристаллизатора газовые пузыри не успевают всплывать на мениск и оседают на стороне малого радиуса заготовки. Поэтому подповерхностная зона практически всех сортовых заготовок поражена НВ, подкорковыми пузырями, а также точечной неоднородностью. При последующей прокатке литой заготовки указанные дефекты её подповерхностного слоя выкатываются на поверхности проката и значительно снижают его качество. Перечисленные выше проблемы ограничивают сортамент сталей, разливаемых на сортовых МНЛЗ и не позволяют в полной мере использовать преимущества непрерывно-литого металла. При применении ЭМП неметаллические включения начинают вымываться из фронта затвердевания и перемещаются к центру мениска в кристаллизаторе, а высокие скорости конвективных потоков в жидком металле устраняют «запутывание» газов на фронте кристаллизации и сокращают число подкорковых пузырей. Такой механизм действия ЭМП в кристаллизаторе обеспечивает существенное улучшение качества НЛЗ [345].

Основные электрические параметры устройств электромагнитного перемешивания меняются в широких пределах. Для ЭМП в кристаллизаторе с целью снижения потерь, связанных с наличием между статором и расплавом медных стенок кристаллизатора и корки заготовки, применяют токи низкой частоты (1–20 Гц). Другими важными электрическими параметрами являются сила

тока, число фаз, количество полюсов на одну фазу, напряжение, потребляемая и активная мощность и др.

Металлургический эффект от электромагнитного перемешивания находится в непосредственной связи с гидродинамическими процессами в жидкой лунке в условиях наложения ЭМП, а именно, характере потоков и их скоростью.

В первой главе этой работы отмечалось, что для получения требуемых металлургических результатов по качеству поверхности и макроструктуре непрерывно-литых заготовок статор ЭМП должен обеспечивать линейную скорость движения расплава в диапазоне 0,3-1,0 м/с. В настоящее время практически не представляется возможным провести непосредственное измерение скорости турбулентных потоков жидкой стали при электромагнитном перемешивании на сортовых и блюмовых МНЛЗ. Поэтому для получения представлений о реальной картине циркуляции жидкого металла, создаваемой конкретным перемешивателем и подтверждения результатов, полученных расчетным путем, необходимо применять физическое моделирование магнитогидродинамических процессов.

Физическое моделирование МГД-процессов при ЭМП в кристаллизаторе для заготовок сечением 125x125 мм проводили на модели в масштабе М 1:1 с использованием низкотемпературного сплава Роузе в качестве моделирующей жидкости [346]. Основные сравнительные магнитогидродинамические параметры сплава Роузе (Bi=50%, Pb=28%, Sn=22%) и низкоуглеродистой стали приведены в таблице 3.1.

Измерение скоростей движения расплава производили с помощью трубок Пито и разработанных механических датчиков [346].

На рисунках 3.1 и 3.2 представлена схема стенда для физического моделирования электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ. Стенд для физического моделирования включает статор электромагнитного перемешивания в натуральную величину для заготовок сечением 125x125 мм. Конструктивные и электротехнические параметры статора представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.1 – Основные сравнительные магнитогидродинамические параметры сплава Роузе и низкоуглеродистой стали

№ п/п	Параметр	Значение	
		Сплав Роузе (125 °С)	Низкоуглеродистая сталь (1540 °С)
1.	Удельная электропроводность, См/м	$1 \times 10^6$	$0,735 \times 10^6$
2.	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$9,4 \times 10^3$	$7,2 \times 10^3$
3.	Динамическая вязкость, Па·с	0,007	0,005
4.	Кинематическая вязкость, м <sup>2</sup> /с	$0,74 \times 10^{-6}$	$0,62 \times 10^{-6}$

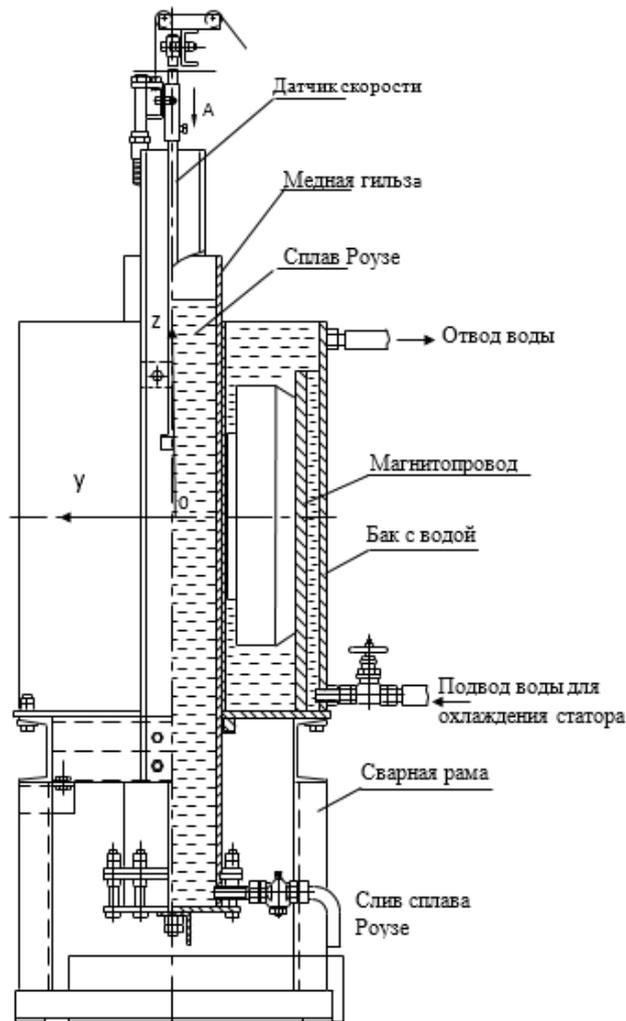


Рисунок 3.1 – Схема стэнда для физического моделирования МГД-процессов при ЭМП в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ

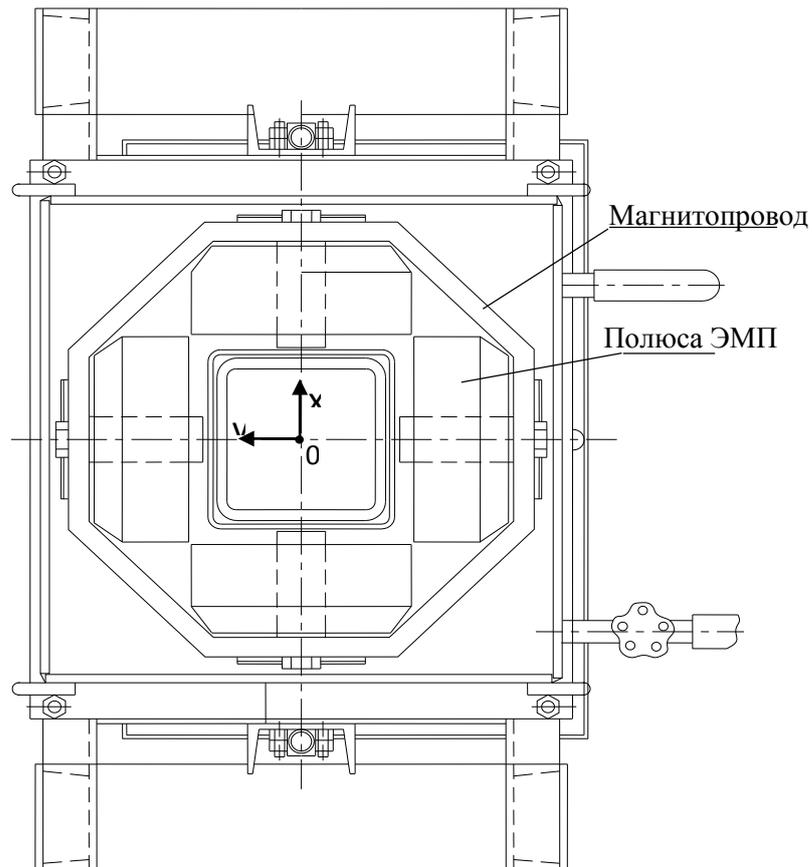


Рисунок 3.2 – Вид сверху на стенд для физического моделирования

Таблица 3.2 – Конструктивные и электротехнические параметры статора ЭМП для физического моделирования

№ п/п	Параметр	Значение
1	2	3
1.	Число полюсов, шт.	4
2.	Габаритные размеры полюса, мм:	
2.1.	Ширина	45
2.2.	Длина	260
2.3.	Высота	104
3.	Толщина корпуса (ярма магнитопровода), мм	16

1	2	3
4.	Материал полюсов и корпуса	Сталь 20
5.	Число витков катушки полюса, шт.	86
6.	Обмоточный провод	Водопогружной с двойной изоляцией
7.	Диаметр провода, мм	4,5
8.	Расстояние между полюсами, мм	172.5
9.	Материал гильзы	M1ф
10.	Толщина стенки гильзы, мм	9
11.	Материал рубашки охлаждения	12X18H10T
13.	Толщина стенки рубашки охлаждения, мм	5
14.	Расход воды на охлаждение статора, л/мин	6–12
15.	Максимальный ток фазы, А	150
16.	Диапазон частоты тока, Гц	3–8
17.	Максимальная активная мощность, кВт	21

Магнитная система статора ЭМП для квадратной заготовки содержит ярмо и две пары полюсов с катушками, образуя двухфазную электрическую машину. Оси пар полюсов взаимно перпендикулярны, а синусоидальные токи их катушек равны и сдвинуты по фазе на 90 электрических градусов. Наложение магнитных полей, возбуждаемых токами катушек, создает вращающееся магнитное поле в объеме между полюсами, которое приводит во вращение жидкий металл.

Стенд для физического моделирования сконструировали следующим образом. На закрепленную сварным соединением подставку из швеллеров, установили открытый сверху полый сосуд квадратной формы, через который подавали охлаждающую статор воду. Внутреннюю стенку сосуда, имитирующую рубашку охлаждения гильзы кристаллизатора, изготовили из нержавеющей стали аустенитного класса. В сосуд поместили магнитопровод восьмигранной формы

(рисунок 3.3), являвшийся ярмом статора и соответствовавший по форме и размерам корпусу кристаллизатора промышленной МНЛЗ.



Рисунок 3.3 – Магнитопровод статора для физического моделирования

Четыре полюса статора с катушками из водопогружного провода крепили к магнитопроводу болтовыми соединениями. Известно, что при ЭМП в кристаллизаторе в зависимости от толщины стенки гильзы, необходимая для рациональных скоростей частота тока находится в интервале 1-20 Гц, поэтому сердечники полюсов и ярмо статора выполнили нешихтованными, чем значительно упростили конструкцию статора. Повышенные потери мощности, возникающие в массивном магнитопроводе, отводили посредством водяного охлаждения. Во внутреннюю полость сосуда поместили медную гильзу кристаллизатора, закрепленную на подставке и закрытую снизу болтовым соединением дном (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Гильза кристаллизатора для физического моделирования

Гильзу заполнили сплавом Роузе с температурой плавления  $96\text{ }^{\circ}\text{C}$ , имитирующим жидкую сердцевину стальной заготовки. Гранулы сплава Роузе поместили в полость гильзы и расплавляли, в основном, за счет нагрева медной гильзы до  $120\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$  в режиме работы статора при токе фазы  $100\text{-}150\text{ A}$  и частоте  $6\text{-}8\text{ Гц}$ . К подставке и внешним стенкам сосуда болтовым соединением закрепили две вертикальные стойки, на которых при помощи ползунов установили рамку с двумя степенями свободы для крепления датчиков, измеряющих магнитное поле и скорости движения расплава.

Общий вид стенда для физического моделирования МГД-процессов при ЭМП в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ представлен на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Общий вид стенда для физического моделирования МГД-процессов при ЭМП в кристаллизаторе

### **3.2. Методы и результаты измерения параметров электромагнитного перемешивания на жидкометаллической модели**

Измерение индукции магнитного поля во внутреннем пространстве статора производили специальным прибором на основе датчика Холла с пределами измерения 0-100-200 мТ и точностью измерения 3%.

Измерение скорости движения сплава производили с помощью разработанных и изготовленных механических датчиков. Дополнительные контрольные замеры скорости потока для сравнения с показаниями скорости механического датчика проводили с использованием трубки Пито.

Датчик для измерения средней горизонтальной скорости вихревого потока жидкого сплава представлял собой медную трубку диаметром 10 мм с

толщиной стенки 2 мм с установленными в ней сверху и снизу фторопластовыми втулками-подшипниками. В трубке в подшипниках вращался стержень из стальной немагнитной проволоки диаметром 2,5 мм, на нижнем конце которого закрепили лопасть с двумя, расположенными диаметрально противоположно, лопатками. Лопасть выполнили из немагнитной стали толщиной 0,35 мм. В конструкции предусмотрели возможность закрепления двух лопастей для увеличения количества лопаток до четырех. Лопастей различались по наружным размерам с целью измерения скорости на различных радиусах в одном сечении гильзы. Угловую скорость измеряли путем определения числа оборотов валика в единицу времени. По числу оборотов в секунду и среднему диаметру лопасти вычисляли среднюю линейную скорость на соответствующем радиусе.

Измерение окружной линейной скорости в разных точках потока обеспечивали использованием механического датчика давления с корпусом в виде медной трубки с фторопластовыми подшипниками и внутренним стержнем. На нижнем конце стержня закрепили лопасть с одной лопаткой. На верхнем конце трубки в качестве опоры для пластины с нанесенной шкалой установили втулку. Другой конец противодействующей пружины зафиксировали через вспомогательный рычаг на внутреннем стержне с закрепленным стрелочным указателем. Угол отклонения стрелочного указателя прямо пропорционален давлению на площадку лопатки. Зависимость между линейной скоростью  $V$  и усилием давления  $F_p$  на площадку характеризуется коэффициентом лобового сопротивления данной формы лопатки площадью  $S$  [347]

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot F_p}{c \cdot S \cdot \rho}}, \quad (3.1)$$

где  $\rho$  – плотность расплава;  $c$  – коэффициент лобового сопротивления.

Лопатку изготовили в виде прямоугольника с соотношением сторон 1:2. Для пространственного обтекания такой пластинки потоком в трубе справочное значение коэффициента лобового сопротивления составило 1,16 [348]. При вычислении скорости по выражению (3.1) в исследуемой модели это дало

представление о приближенной к фактической величине скорости. Вследствие этого произвели тарирование механического датчика давления, в результате установили непосредственную зависимость между давлением на лопатку и фактической скоростью потока.

Для тарирования датчика использовали микродвигатель типа ДВУ с постоянными магнитами, для которого сняли зависимость момента на валу двигателя от тока якоря при скорости вращения 2-3 об/с, что соответствовало скорости вращения сплава на модели при номинальных параметрах статора ЭМП. Затем вал микродвигателя соединили с верхним концом внутреннего стержня механического датчика давления. Конец медной трубки с лопастью поместили в расплав. По току микродвигателя определяли развиваемый им момент, а по моменту и среднему радиусу лопатки – усилие давления  $F_p$ , приходящееся на лопатку. При этом выявили число оборотов  $n$  лопасти по метке на валу микродвигателя за время  $t$ , фиксируемое по секундомеру. По этим данным установили линейную скорость движения лопатки  $V = 2\pi Rn/t$ , в результате определили зависимость между усилием давления на лопатку  $F_p$  и ее линейной скоростью движения в расплаве, что соответствовало зависимости усилия давления на лопатку при ЭМП от линейной скорости потока расплава  $V$ . Полученная экспериментальная зависимость  $F_p = (V)$  дала возможность установить по выражению (3.1) коэффициент лобового сопротивления 1,495 для потока жидкого металла в исследуемой модели.

Определение скорости вертикальных потоков выполнили с использованием разработанного механического датчика. Корпус датчика изготовили из трубки диаметром 10 мм из немагнитной аустенитной стали. В корпус установили подшипники скольжения в виде втулок, в нижней части - из фторопласта, сверху - из латуни для оси из немагнитной стали диаметром 2 мм. На нижнем конце оси закрепили пластинку диаметром 20 мм, воспринимающую давление от скоростного вертикального потока. Усилие давления воспринималось пружиной, один конец которой, вверху навернули на резьбовую часть латунной втулки и таким образом закрепили стационарно, а другой – на резьбовую часть втулки,

припаянной к оси. В качестве измерительного механизма вертикального перемещения оси использовали зубчатый механизм манометра с круговой шкалой и пружиной выбора зазора. Для снижения пульсаций малоинерционного измерительного механизма на оси закрепили демпфер по принципу цангового зажима. В корпусе датчика на разных уровнях выполнили сливные отверстия. Тарирование датчика произвели с помощью мерных грузов. Зависимость между скоростью вертикального потока и давлением на пластинку определили ту же, что и для вычисления линейной окружной скорости по давлению на лопатку.

При разработке методов измерения параметров электромагнитного перемешивания на жидкометаллической модели приняты во внимание материалы работы [235].

Анализ общих уравнений магнитной гидродинамики позволяет определить влияние тока фазы статора и частоты перемешивания на скорость движения расплава. Существует рациональная частота питающего тока при которой обеспечивают получение максимальной объемной электромагнитной силы и достижения максимальной скорости в потоке жидкой стали. Пример расчёта максимальной скорости в потоке в зависимости от частоты приведен во второй главе. При разработке устройств ЭМП и их внедрении в промышленное производство следует стремиться к такой рациональной, экономически оправданной частоте и к силе тока, которая обеспечивает при данной частоте получение объемной силы и скорости потоков, достаточных для получения положительных металлургических эффектов.

На рисунках 3.6 и 3.7 приведены сравнительные результаты физического и математического моделирования гидродинамики в кристаллизаторе сечением 125x125 мм для максимальных горизонтальных скоростей вихревого течения в центральном сечении статора при наложении вращающегося электромагнитного поля [340]. Результаты математического моделирования были рассмотрены ранее во второй главе.

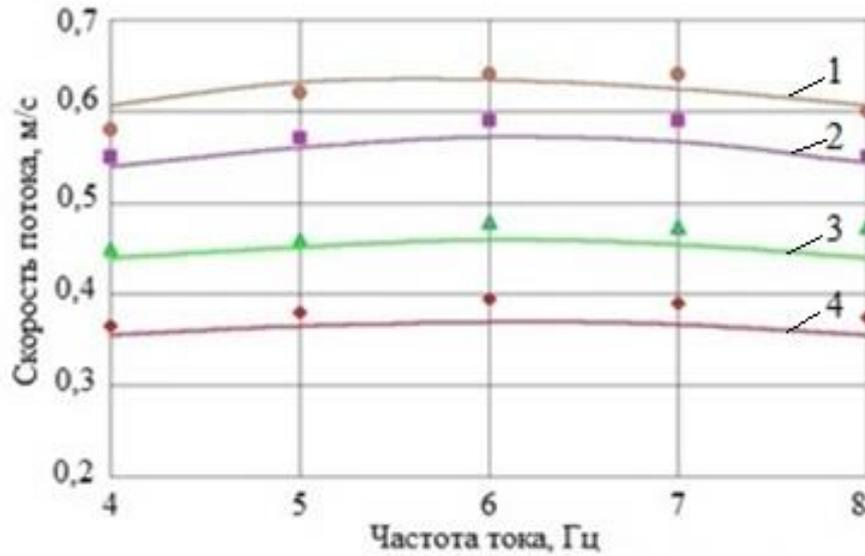


Рисунок 3.6 – Зависимость максимальных скоростей потоков от частоты при токах фазы 150 (1), 115 (2), 100 (3) и 78 А (4).

Сплошные линии – математическая модель, знаки – эксперимент

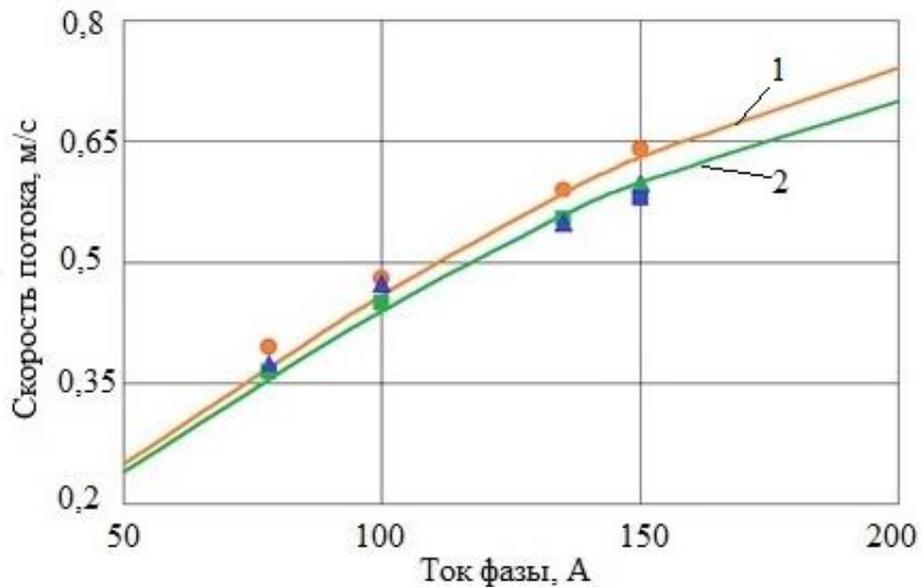


Рисунок 3.7 – Зависимость максимальных скоростей потоков от тока фазы при частотах тока 6 (1) и 8 Гц (2). Сплошные линии – математическая модель,

знаки – эксперимент

Рассчитанные значения скоростей расплава кристаллизующейся непрерывной заготовки при ЭМП проверили на адекватность результатам физического моделирования по критерию Фишера.

Расчётное значение критерия Фишера определяли по формуле:

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \quad (3.2)$$

Для нашего ряда (рисунок 3.6) расчётный  $F=362,3159$ .

$$F_{табл.}=2,1009.$$

Поскольку фактическое значение  $F > F_{табл.}$  результаты математического моделирования признали адекватными результатам физического моделирования.

По результатам сравнительного анализа сделали вывод, что физическое моделирование с использованием сплава Роузе может применяться для оценки полей скоростей и структуры течения расплава при ЭМП в кристаллизаторах сортовых и блюмовых МНЛЗ.

Основываясь на результатах проведенных исследований определили влияние частоты и тока фазы статора на протекание МГД-процессов в жидкой фазе кристаллизующейся непрерывно-литой заготовки при ЭМП в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ.

В результате экспериментальных исследований электромагнитного перемешивания в кристаллизаторах сортовой МНЛЗ для заготовок сечением 125x125 мм установлено, что скорость движения расплава 0,55-0,65 м/с достигается при токе фазы 150 А и частоте тока 6-7 Гц.

В ходе проведения испытаний опытной системы ЭМП рассмотрели влияние работы встроенного электромагнитного перемешивания на тепловой режим кристаллизатора. С этой целью провели измерение нагрева воды, охлаждающей полюса статора электромагнитного перемешивателя. Расход охлаждающей воды  $Q$  во время эксперимента был равен 0,5 л/с, её температура на входе в кристаллизатор составляла 6 °С. Температура охлаждающей воды на выходе из корпуса при номинальном режиме перемешивания (ток фазы статора 150 А и частота 5 Гц) составила 9 °С, т.е, перепад температуры от потерь ЭМП при номинальном режиме перемешивания составил 3 °С. На промышленной сортовой МНЛЗ расход воды, охлаждающей кристаллизатор значительно выше и составляет 90 м<sup>3</sup>/ч или 25 л/с,

температура охлаждающей воды на входе не превышает 40 °С. Установили, что при таком расходе и работе статора в номинальном режиме нагрев воды от потерь в ЭМП составит 0,02 °С. По результатам эксперимента сделали вывод, что влияние работы ЭМП на тепловой режим кристаллизатора даже при возрастании частоты перемешивания до 10 Гц и увеличения температуры обмотки из-за роста температуры охлаждающей воды, будет незначительным.

### 3.3. Моделирование электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания машины полунепрерывного литья заготовок

При разработке конструкции двухуровневого электромагнитного перемешивания использовали математическое и физическое моделирование. Математическое моделирование было рассмотрено ранее во второй главе.

Физическое моделирование МГД–процессов при ЭМП в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания (ЗОЗ) МПНЛЗ проводили на низкотемпературном сплаве Роузе в центральной лаборатории металлургического завода «Электросталь». Схема стенда для физического моделирования представлен на рисунке 3.8.

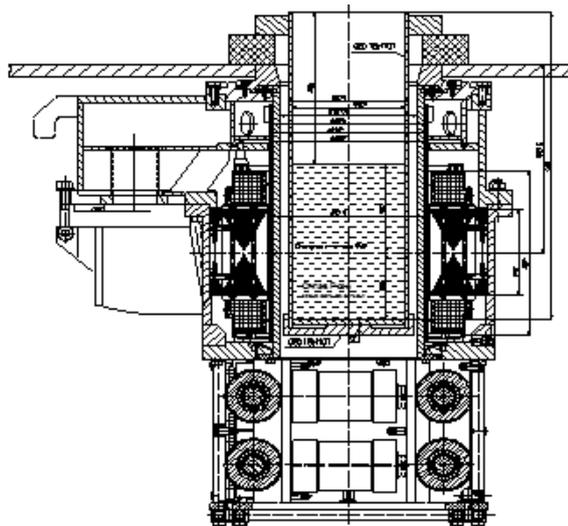


Рисунок 3.8 – Схема стенда для физического моделирования ЭМП в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания круглых заготовок

Масса и геометрические размеры стенда полностью соответствовали кристаллизатору промышленной блюмовой МНЛЗ со встроенным статором ЭМП с катушками водопогружного исполнения.

В кристаллизатор, со встроенным статором ЭМП, установленный на МПНЛЗ, поместили стакан из нержавеющей стали со сплавом Роузе. Внутренний диаметр стакана составлял 325 мм, толщина стенок – 12 мм. Сплав Роузе нагревали до жидкого состояния, включали статор ЭМП в кристаллизаторе и, изменяя электротехнические параметры перемешивания, исследовали гидродинамику расплава. Во время испытаний ток фазы изменяли в диапазоне 50-150 А, с шагом 25 А, частота тока составляла 2 и 4 Гц.

Исследование МГД–процессов при ЭМП в ЗОЗ проводили по следующей методике: внутрь стакана, помещенного в кристаллизатор, поочередно вставляли трубы из немагнитной нержавеющей стали внутренними диаметром 75, 100 и 140 мм и толщиной стенки 6 мм, чем отделяли центральную жидкую зону круглой заготовки от корки слитка, что моделировало состояние слитка в зоне окончания затвердевания. После проведения видеосъемки вращения моделирующей жидкости, зафиксировали турбулентное вращение расплава со скоростью 0,5–1,5 м/с (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Вид сверху на стенд для физического моделирования МГД-процессов при ЭМП в кристаллизаторе

По результатам физического моделирования доказали возможность регулирования скорости вращения расплава в требуемом для достижения положительных металлургических результатах диапазоне скоростей 0,5–1,0 м/с изменением величины фазного тока статора. Кроме того, исследовали изменение скорости турбулентного течения расплава при ЭМП в кристаллизаторе при постоянном токе фазы 50 А и частотах 2 и 4 Гц.

По итогам экспериментальных исследований получены закономерности, подтверждающие результаты теоретических исследований, рассмотренные во второй главе, в том, что рациональная частота питающего тока зависит от наличия и конфигурации проводящих сред в зазоре между полюсами электромагнитной системы, в частности от толщины стенок медной гильзы и рубашки охлаждения, поскольку они экранируют магнитное поле. В данном конкретном случае при преодолении электромагнитным полем медной гильзы диаметром 250 мм, толщиной стенки 19 мм при уменьшении частоты тока с 4 до 2 Гц удалось достичь более интенсивного перемешивания.

Полученные результаты исследований использованы при адаптации инженерной методики расчёта электротехнических параметров статора ЭМП, рассмотренной во второй главе.

### Выводы по главе 3

1. Разработаны физические модели МГД-процессов при ЭМП, происходящих в кристаллизаторах сортовой и блюмовой машин непрерывного и полунепрерывного литья заготовок в виде лабораторных стендов в масштабе М 1:1 с использованием в качестве моделирующей жидкости низкотемпературного сплава Роузе.

2. В результате экспериментальных исследований электромагнитного перемешивания в кристаллизаторах сортовой МНЛЗ для заготовок сечением 125x125 мм установлено, что скорость движения расплава 0,55-0,65 м/с достигается при токе фазы 150 А и частоте тока 6-7 Гц. По итогам экспериментальных исследований получили закономерности, подтверждающие результаты теоретических исследований.

3. В результате физического моделирования электромагнитного перемешивания в кристаллизаторах блюмовой машины полунепрерывного литья заготовок диаметром 250 мм установлено, что скорость движения расплава 0,85 м/с достигается при токе фазы 200 А и частоте тока 4 Гц.

4. В результате исследований установлено, что влияние работы ЭМП на тепловой режим кристаллизатора сортовой МНЛЗ незначительно даже при возрастании частоты перемешивания до 10 Гц и увеличения температуры обмотки из-за роста температуры охлаждающей воды. В частности, при расходе воды на охлаждение кристаллизатора 90 м<sup>3</sup>/ч и работе статора в режиме 150 А и 6 Гц нагрев воды от потерь в ЭМП составил 0,02 °С.

5. Полученные результаты исследований использованы при адаптации инженерной методики расчёта электротехнических параметров статора ЭМП (глава 2).

## **ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ СОРТОВЫХ И БЛЮМОВЫХ МНЛЗ**

### **4.1. Системы электромагнитного перемешивания, встроенные в кристаллизаторы МНЛЗ**

Во ВНИИМЕТМАШ в течение многих лет разрабатывали и разрабатывают в настоящее время не только концепцию электромагнитного перемешивания металла в машинах непрерывного литья заготовок, производящих сортовые и блюмовые заготовки, но и различные конструкции электромагнитных перемешивателей. В основу концепции заложен принцип максимально возможного приближения полюсов статора к жидкой фазе слитка для достижения высокой скорости перемешивания при низкой потребляемой мощности [349]. Этого достигли, в основном, за счёт того, что электромагнитное перемешивающее устройство, создающее вращающее магнитное поле, встраивали в корпус кристаллизатора. Отличительная особенность и преимущество конструкции этих кристаллизаторов-ЭМП состоит в том, что охлаждение катушек полюсов статора обеспечивают водой, предназначенной для охлаждения медных рабочих стенок кристаллизатора. В этом случае не требуется отдельный дополнительный контур охлаждения статора специально подготовленной водой, что существенно снижает общие капитальные и текущие эксплуатационные расходы [349-351].

#### **Система электромагнитного перемешивания в кристаллизаторах радиальных сортовых МНЛЗ**

С целью разработки и поставки промышленной системы ЭМП в кристаллизаторе для сортовой МНЛЗ Молдавского металлургического завода разработали три разные конструкции систем электромагнитного перемешивания, встроенных в кристаллизаторы, и провели исследование влияния ЭМП на макроструктуру и поверхность заготовок из разных групп марок стали.

**На первом этапе** испытаний применяли систему ЭМП с опытным кристаллизатором-электромагнитным перемешивателем для разливки заготовок сечением 135x135 мм; **на втором** – опытно-промышленный кристаллизатор с ЭМП для литья заготовок сечением 125x125 мм с установкой гильзы длиной 1000 мм. **Третий этап** включал разработку и поставку на «ММЗ» промышленной системы ЭМП в кристаллизаторе с гильзой длиной 800 мм сечением 125x125 мм. Основные сравнительные параметры использованных систем ЭМП в кристаллизаторе МНЛЗ Молдавского метзавода представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные сравнительные параметры систем ЭМП в кристаллизаторах МНЛЗ Молдавского метзавода

№ п/п	Параметр	Значение		
		3	4	
1.	Сечение заготовок, мм	135x135	125x125	
2.	Марки разливаемых сталей	низкоуглерод.	углеродистые, высокоуглерод., легированные	
3.	Радиус базовой поверхности, мм	6000		
4.	Длина медной гильзы, мм	800	800	1000
5.	Толщина стенки гильзы, мм	9,4	11,5	
6.	Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч	60–70	96–102	
7.	Материал рубашки охлаждения	стеклопластик	нержавеющая сталь	
8.	Число полюсов, шт.	4		
9.	Число фаз ЭМП, шт.	2		
10.	Температура медной обмотки в рабочем режиме, °С	н/д	74	
11.	Расстояние от верха гильзы до верхней кромки статора, мм	210	325	545
12.	Длина активной зоны статора, мм	280	410	
13.	Номинальное напряжение, В	380		

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4
14.	Диапазон тока фазы, А	20–200	
15.	Номинальный ток фазы, А	150	
16.	Частота тока, Гц	3–15	1–15
17.	Напряжение фазное в рабочем режиме (частота 6 Гц), В	90	190
18.	Индукция в центре кристаллизатора в рабочем режиме, Тл	0,05	0,07
19.	Мощность статора активная, кВт	11	25

Чтобы повысить достоверность испытаний, все кристаллизаторы-ЭМП спроектировали на базе существующих серийных кристаллизаторов с возможностью их установки на МНЛЗ Молдавского металлургического завода без изменения конструкции существующей рамы механизма качания и устройств подвода и отвода воды.

**Первый этап.** Корпус кристаллизатора-ЭМП для литья сортовых заготовок 135x135 мм переделали из корпуса серийного кристаллизатора, состоящего из опорной горизонтальной плиты и вертикальной цилиндрической части. В процессе испытаний внутреннюю полость цилиндрической части корпуса увеличили до диаметра 345 мм. В кристаллизаторе с ЭМП без каких-либо переделок применили медную рабочую гильзу длиной 800 мм и толщиной стенки 10 мм от стандартного кристаллизатора. В верхней полости корпуса кристаллизатора установили 2-х фазное, 4-х полюсное устройство электромагнитного перемешивания. При этом корпус кристаллизатора, изготовленный из углеродистой стали, выполнял функцию ярма магнитопровода статора, так как при низкой частоте перемешивания (номинальная частота 5 Гц) магнитопровод может быть выполненным нешихтованным. Все полюса статора состоят из нешихтованного сердечника и секционированной катушки, намотанной проводом с водостойкой изоляцией. Все межполюсные соединения статора выполнили внутри корпуса кристаллизатора и

вывели через уплотнения к клеммной коробке. Охлаждение полюсов статора производили той же водой, что охлаждает гильзу кристаллизатора. Для этого в поперечной перегородке корпуса кристаллизатора выполнили отверстия, через которые вода из нижней полости кристаллизатора перетекала в верхнюю полость и охлаждала полюса статора.

Для создания равномерного зазора 5 мм относительно наружной поверхности медной гильзы, разъемный стакан, в который устанавливали гильзу в серийном кристаллизаторе, заменили неразъемной рубашкой охлаждения из стеклопластика толщиной 6 мм.

На опорной плите корпуса кристаллизатора выполнили водозащищенную коробку для подсоединения гибких кабелей, идущих к источнику питания электромагнитного перемешивателя.

Устройство ЭМП работало следующим образом. Обмотки полюсов, установленные по большому и малому радиусам МНЛЗ и соединенные между собой последовательно, образуют обмотку одной фазы статора, а обмотки боковых полюсов— обмотку другой фазы. При питании обмоток двухфазной системой токов, сдвинутых по фазе на 90 электрических градусов, в полости кристаллизатора возбуждалось двухполюсное вращающееся вокруг продольной оси кристаллизатора магнитное поле, которое пересекает расплавленный металл в гильзе, саму гильзу и рубашку охлаждения.

Вращающееся магнитное поле, пересекая все участки с металлом, наводит вихревые токи, при которых возникает область управляемой принудительной циркуляции расплава под действием электродинамических сил. Под воздействием этих сил стальной расплав внутри гильзы приходит в турбулентное движение, приводящее к получению всех положительных металлургических эффектов, а именно – к улучшению качества заготовок.

В процессе исследований выявлено, что в разработанном статоре электромагнитного перемешивания вращающееся магнитное поле распределено неравномерно по внутреннему пространству гильзы, существенно усиливаясь в зоне осей полюсов и рассеиваясь за её границами. Вследствие этого усреднённые

скорости стального расплава в различных точках потока при перемешивании внутри гильзы пульсируют не только из-за переменной для потока металла площади поперечного сечения при прямоугольной форме заготовки, но и вследствие неоднородности распределения электродинамических сил, возникающих в заготовке.

**Второй этап.** С началом освоения производства на Молдавском метзаводе качественных и высокоуглеродистых марок стали, в том числе для пружинной, кордовой и канатной проволоки, возникла потребность в улучшении макроструктуры и поверхности непрерывно-литых заготовок из этих марок стали. Для решения этой задачи разработали кристаллизатор-электромагнитный перемешиватель для литья сортовых заготовок сечением 125x125 мм с установкой гильзы длиной 1000 мм. Корпус кристаллизатора с устройством ЭМП представляет собой модернизированный корпус для гильзы 800 мм (рисунок 4.1).

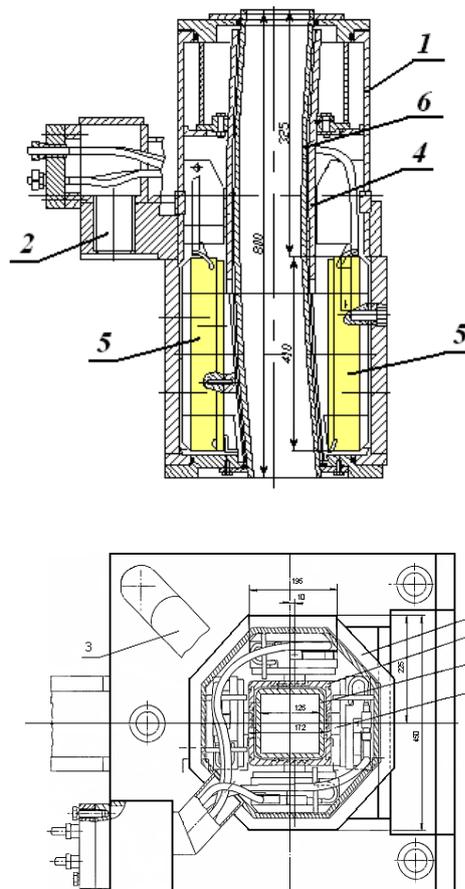


Рисунок 4.1 – Кристаллизатор с ЭМП для гильзы длиной 800 мм для литья заготовок сечением 125x125 мм

С целью применения гильзы длиной 1000 мм стандартный корпус кристаллизатора для гильзы 800 мм нарастили стаканом, увеличив его длину на 194 мм. На серийном корпусе кристаллизатора (поз. 1) расположены патрубки охлаждающей воды для её подвода (поз. 2) и отвода (поз. 3).

Внутреннюю водоохлаждаемую полость корпуса кристаллизатора (поз. 1) разделили рубашкой охлаждения (поз. 4) таким образом, что вода, поступающая из патрубка для подвода воды с проложенными в нем выводными концами от полюсов (поз. 5), вначале проходила через полость, занятую полюсами, охлаждая обмотку каждого полюса. После этого вода поступала в охлаждающие каналы между медной гильзой (поз. 6) и рубашкой охлаждения, изготовленной из аустенитной нержавеющей стали, затем охлаждала медную гильзу. Для уменьшения зазора между полюсами статора на их поверхности, обращенной к заготовке, поместили съемные накладки (поз. 7), заходящие в пазы рубашки и примыкающие к её поверхности с небольшим зазором.

В результате проведенных испытаний в 2000 г. приняли решение об оснащении промышленной МНЛЗ-2 «ММЗ» системой ЭМП в кристаллизаторах. Комплексная поставка включала разработку, изготовление и поставку кристаллизаторов с ЭМП и системы управления и питания.

**Третий этап.** Кристаллизатор с ЭМП (рисунок 4.2) для гильзы 800 мм (сечение заготовки 125x125) отличается от кристаллизатора с ЭМП для гильзы длиной 1000 мм расположением верхней границы полюсов статора: расстояние от мениска – 225 мм.



Рисунок 4.2 – Кристаллизатор с ЭМП для МНЛЗ Молдавского металлургического завода

Статор ЭМП, встроенный в кристаллизатор сортовой МНЛЗ, представляет собой погружную в охлаждаемую её воду электрическую машину. Для лучшей ремонтпригодности статор с двухфазными обмотками изготовили из четырех полюсов с установленными на них катушками обмотки фаз. Корпус кристаллизатора, изготовленный из углеродистой стали, использовали в качестве нешихтованного ярма статора, а ротором являлся стальной расплав затвердевающей заготовки. Полюс статора (рисунок 4.3) состоит из кожуха, обмотки и сердечника, прикрепленного к корпусу кристаллизатора.

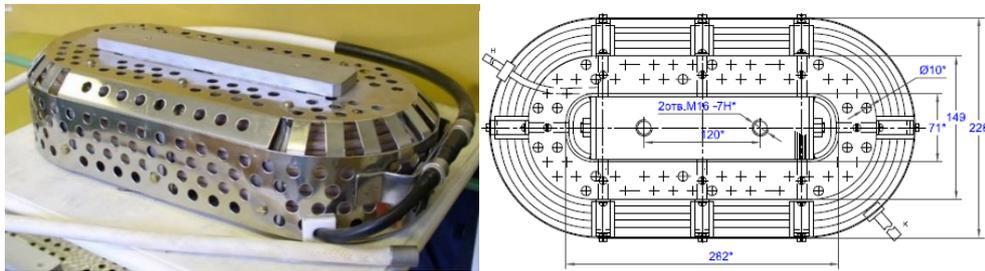


Рисунок 4.3 – Полюс статора: слева – в защитном кожухе, права – чертеж

Для уменьшения зазора между полюсами статора на их поверхности, обращенной к непрерывно-литой заготовке, установили накладки из ферромагнитной стали, заходящие в пазы рубашки охлаждения и с небольшим зазором примыкающие к её поверхности. Рубашку охлаждения медной гильзы изготовили из немагнитной стали аустенитного класса. Такая конструкция ЭМП обеспечила хорошее качество разливаемой стали различного сортамента (углеродистые, высокоуглеродистые, легированные). Сравнительные темплеты заготовок с ЭМП и контрольных без ЭМП приведены на рисунке 4.4.

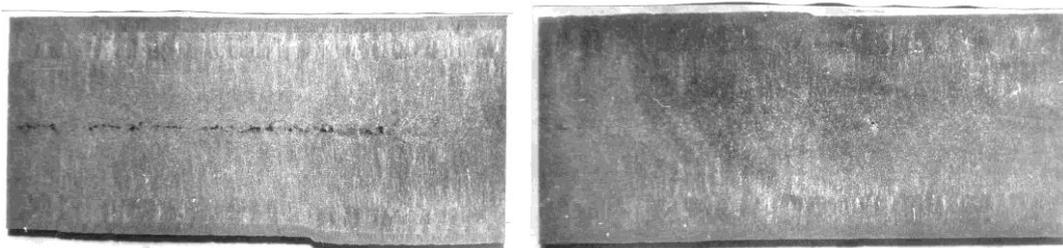


Рисунок 4.4 – Продольные темплеты плавки стали марки СтЗсп:  
слева – без ЭМП; справа – с ЭМП

## Система электромагнитного перемешивания в кристаллизаторах радиальных МНЛЗ, производящих круглые заготовки

На базе результатов моделирования двухуровневой системы ЭМП на МПНЛЗ и в соответствии с концепцией максимального приближения статора к жидкой фазе заготовок, разработали систему электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе для МНЛЗ завода «ТМК-Решица» (Румыния). Статор ЭМП встраивали в корпус кристаллизатора (рисунки 4.5 и 4.6) и охлаждали водой кристаллизатора. Технические характеристики этого статора ЭМП приведены в таблице 4.2.

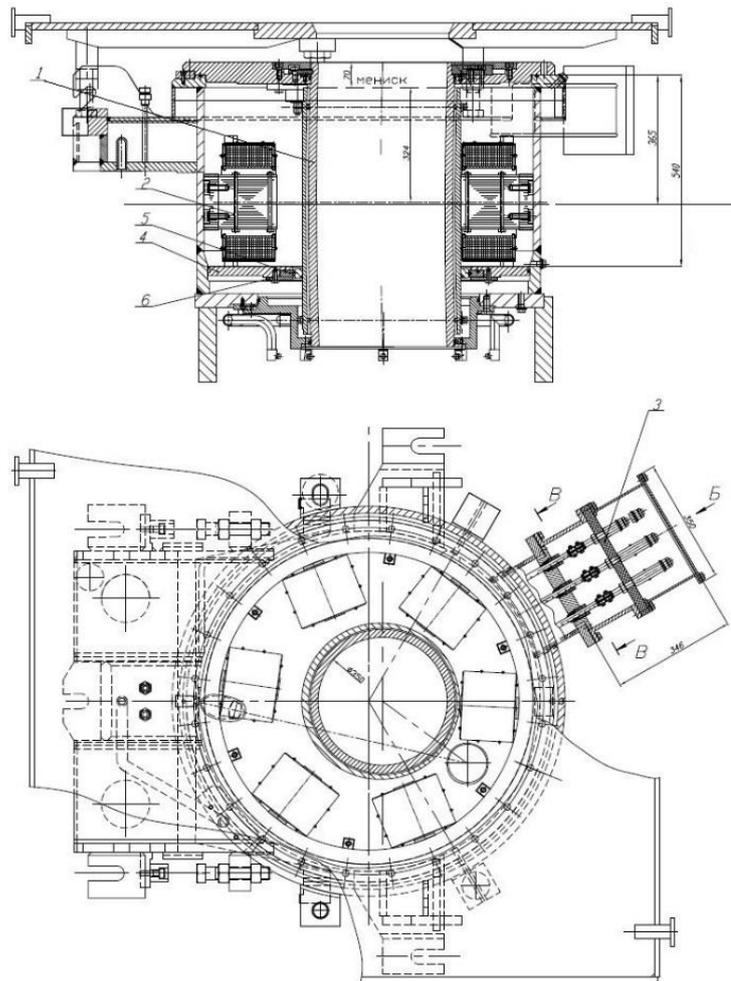


Рисунок 4.5 – Кристаллизатор с ЭМП для литья заготовок диаметром 177–350 мм: 1 – рубашка охлаждения, 2 – статор ЭМП, 3 – коробка выводов, 4 – диафрагма, 5 – пластина диафрагмы, 6 – крышка пластины

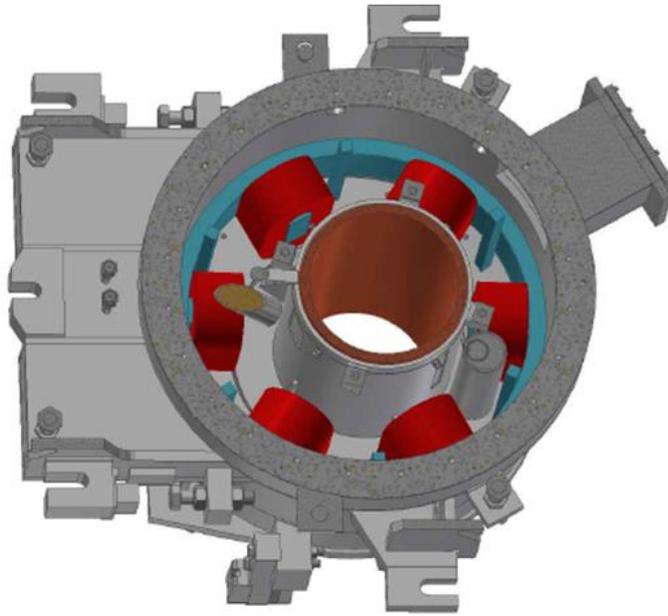


Рисунок 4.6 – Кристаллизатор с ЭМП для литья заготовок диаметром  
177–350 мм

Таблица 4.2 – Технические характеристики статора ЭМП для МНЛЗ завода  
«ТМК-Решица» (Румыния)

№ п/п	Параметр	Значение
1	2	3
1. Технические данные кристаллизатора		
1.1	Диаметры НЛЗ, мм	177, 220, 280, 350
1.2	Материал гильзы кристаллизатора	МС
1.3	Высота медной гильзы, мм	800
1.4	Расстояние между полюсами статора, мм	825
1.5	Толщина медной гильзы, мм	23
2. Технические данные статора		
2.1	Количество фаз, шт.	3
2.2	Количество полюсных катушек в фазе, шт.	2

1	2	3
2.3	Соединение полюсных катушек в фазе	последовательное
2.4	Диапазон частот питания, Гц	0,5–5,0
2.5	Максимальный ток фазы, А	250
2.6	Максимальная активная мощность, кВт	84
2.7	Коэффициент мощности	0,8–0,95
2.8	Охлаждение статора	водой кристаллизатора
2.9	Вес статора ЭМП, кг	450

### **Система электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе горизонтальной МНЛЗ**

С учетом проведенных исследований, рассмотренных в главах 2 и 3, разработали и поставили систему электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе горизонтальной МНЛЗ (Приложение 2). Эта машина предназначена для литья круглых заготовок диаметром 80–120 мм из высоколегированных, в том числе нержавеющей марок стали.

В кристаллизатор ГМНЛЗ встроили статор ЭМП (рисунок 4.7), включающий следующее электрооборудование: четыре электромагнитных полюса, междуполюсные соединения, герметизирующие узлы уплотнения выводных концов статора, коробку выводов статора с быстроразъемными соединениями для присоединения питающих кабелей [352].



Рисунок 4.7 – Двухфазный статор ЭМП для ГМНЛЗ

Статор ЭМП, примененный на этой ГМНЛЗ, является двухфазным статором переменного тока (аналогичный статору асинхронного двигателя) погружного типа с непосредственным охлаждением витков обмотки водой кристаллизатора. Питание статора обеспечивают от двухфазного преобразователя частоты, разработанного и изготовленного ЗАО «Электропривод и Силовая электроника» (г. Москва). Технические характеристики разработанной системы ЭМП в кристаллизаторе горизонтальной МНЛЗ приведены в таблице. 4.3.

Таблица 4.3 – Технические характеристики системы ЭМП в кристаллизаторе горизонтальной МНЛЗ

№ п/п	Параметр	Значение		
		3	4	5
1	2	3	4	5
1. Технические характеристики ГМНЛЗ				
1.1.	Диаметры заготовок, мм	80	100	120
1.2.	Вес плавки, т	0,8		
1.3.	Способ разливки	одиночными плавками		
1.4.	Марки разливаемых сталей	высоколегированные		
1.5.	Материал гильзы	М1р		
1.6.	Материал рубашки охлаждения	аустенитная сталь		
1.7.	Длина гильзы, мм	600		
1.8.	Толщина стенки гильзы, мм	8	8	10
2. Технические характеристики статора ЭМП				
2.1.	Тип обмотки	катушечная с явно выраженными полюсами		
2.2.	Тип обмоточного провода	водопогружной		
2.3.	Число фаз	2		
2.4.	Число полюсных катушек в фазе, шт.	2		

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3	4	5
2.5.	Соединение катушек полюсов в фазе	последовательное		
2.6.	Активное сопротивление катушки полюса при 20°C, Ом	0,064		
2.7.	Коэффициент мощности	0,5–0,6		
2.8.	Внешний диаметр статора, мм	410		
2.9.	Расстояние между полюсами статора, мм	166		
2.10.	Длина активной зоны статора, мм	170		
2.11.	Охлаждение обмоток статора	водой кристаллизатора		
2.12.	Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч	80–88	88–93	98–110
2.13.	Вес статора, кг	110		
3. Технические характеристики источника питания				
3.1.	Номинальное входное напряжение, В	380±10 %		
3.2.	Активная мощность, кВт	25		
3.3.	Полная мощность, кВА	50		
3.4.	Диапазон частот питания, Гц	3–20		
3.5.	Диапазон изменения тока фазы, А	0–250		
3.6.	Номинальное выходное напряжение фазы, В	100		

Основным элементом статора ЭМП (рисунки 4.8 и 4.9) является катушка с сердечником или полюс 1. Статор ЭМП содержит четыре полюса, установленных на цилиндрическом шихтованном ярме 2, изготовленном из углеродистой стали. Полюс прикреплен к ярму двумя болтами 3. Он состоит из шихтованного сердечника 4, катушки 5 и кожуха 6.

Обмотка изготовлена из специального водопогружного провода. В разработанных системах применили оригинальную конструкцию обмоток полюсов статоров из водопогружного провода – с изоляцией высокой электрической и

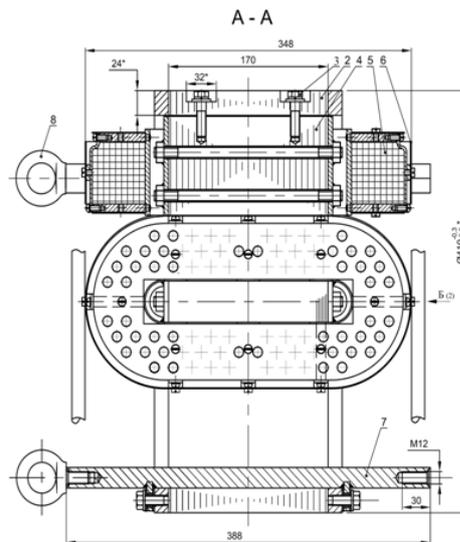


Рисунок 4.8 – Статор ЭМП (продольный разрез)

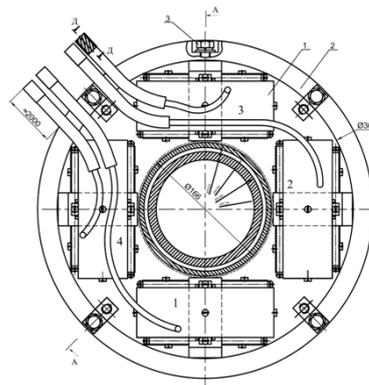


Рисунок 4.9 – Статор ЭМП (вид сверху)

механической прочности и повышенной теплостойкости, разработанного ВНИИ кабельной промышленности по заданию ВНИИМЕТМАШ. Конструкция обмоток полюсов статоров отличается тем, что происходит наружное охлаждение каждого витка обмотки водой кристаллизатора, в отличие от аналогов, выполненных из медных трубок или сплошных полюсов, охлаждаемых специально подготовленной дименерализованной водой.

Сопротивление электроизоляции провода в начальный период эксплуатации водопогружного статора превышает 500 МОм. Малая толщина такой изоляции обеспечивает высокий коэффициент теплообмена между медными проводниками

и технической водой, применяемой для охлаждения. Этим достигают высоких значений намагничивающей силы обмотки при малом занимаемом объеме. Катушка полюса защищена кожухом из аустенитной стали с отверстиями для прохождения охлаждающей воды, предохраняющим обмотку от механических повреждений при транспортировке и монтаже.

Конструкция обмотки предусматривает охлаждение водой каждого витка, для этого она разделена электроизоляционными прокладками на отдельные части. Между такими частями обмотки образованы каналы для протока воды.

На статоре ЭМП имеются опорные стойки 7, которые позволяют устанавливать статор отдельно от корпуса и производить различные технологические процедуры. С их помощью производят установку и выемку статоров ЭМП из корпуса кристаллизатора.

Катушки полюсов № 1 и № 3 (рисунок 4.10) размещены на противоположных сторонах внутренней части статора, соединены между собой последовательно и образуют обмотку фазы А, обмотки полюсов № 2 и № 4 – обмотку фазы В.

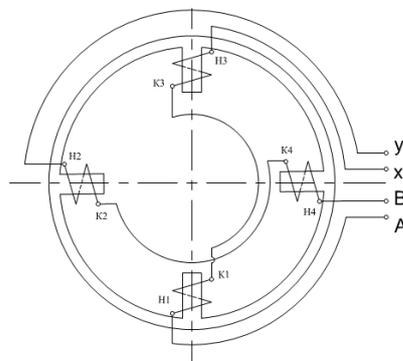


Рисунок 4.10 – Схема межполюсных соединений статора ЭМП

Изготовление статора ЭМП из отдельных полюсов улучшает его ремонтпригодность, так как при выходе из строя одного полюса не требуется демонтаж остальных полюсов. В этом случае следует заменить поврежденный полюс новым или заново выполнить намотку на полюс в электроцехе (ремонтном цехе) завода.

Статор ЭМП работает следующим образом. Двухфазная обмотка статора ЭМП при питании двухфазной системой токов, сдвинутых по фазе на 90 электрических градусов, в рабочей полости статора возбуждает двухполюсное магнитное поле, вращающееся вокруг продольной оси заготовки. Вихревые токи, возникающие в жидкой фазе, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем, создают поле принудительных электродинамических сил, величина которых зависит от частоты и величины тока, протекающего по обмотке.

Во всех металлических элементах, пересекаемых вращающимся магнитным полем, наводятся вихревые токи. Возникающие в жидкой фазе они, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем, создают поле принудительных электродинамических сил, скорость движения которых зависит от частоты и величины тока, протекающего по обмотке.

Вращение металла в кристаллизаторе обуславливает как наличие центробежных сил, которые прижимают жидкий металл к поверхности гильзы кристаллизатора, так и турбулизацию металла, что приводит к выравниванию температуры по всему сечению заготовки, улучшает теплоотдачу, и тем самым способствует образованию равномерной толщины корки по всему периметру сечения заготовки. Установку статора ЭМП в кристаллизатор (рисунки 4.11 и 4.12) производят при вертикальном расположении корпуса 1 (рисунок 4.11) и при снятом фланце корпуса.

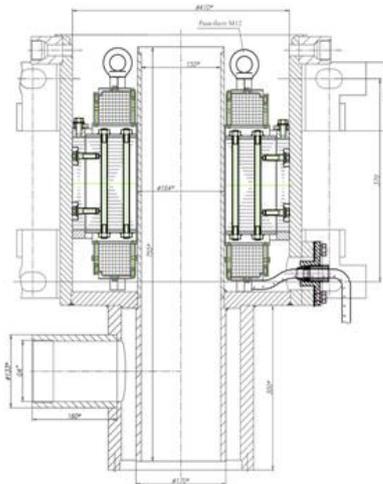


Рисунок 4.11 – Установка статора ЭМП в кристаллизатор ГМНЛЗ

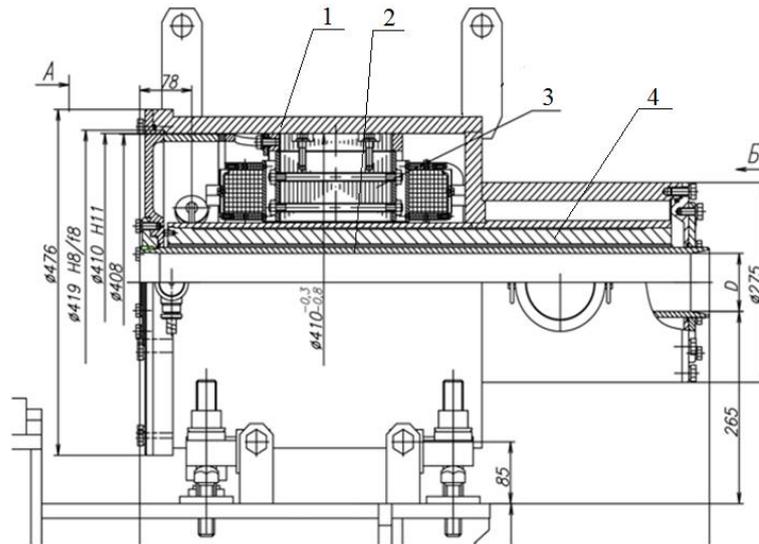


Рисунок 4.12 – Кристаллизатор с ЭМП горизонтальной МНЛЗ:

1 – сварной корпус, 2 – гильза, 3 – статор ЭМП, 4 – рубашка охлаждения

В корпусе 1 кристаллизатора статор 3 прижимают к боковой стенке корпуса 1 фланцем через три промежуточных кольца. Герметизацию соединения обеспечивают уплотнительными кольцами. Четыре выводных конца статора выводят из корпуса через уплотнительный узел.

Выводные концы статора на внешней стороне подводят к зажимам быстроразъемного соединения коробки выводов, установленной на раме ГМНЛЗ. С другой стороны коробки выводов подводят четыре силовых питающих кабеля от преобразователя частоты по кабельному каналу. Вода, поступающая в кристаллизатор, проходит вначале через полость, занятую статором ЭМП, охлаждая его обмотку. После этого вода проходит в щели между медной гильзой и рубашкой охлаждения, охлаждая медную гильзу, формирующую непрерывный слиток. При демонтаже кристаллизатора со встроенным статором ЭМП выводные концы статора отсоединяют от коробки выводов, отсоединяя заземление корпуса кристаллизатора, после чего кристаллизатор готов к демонтажу с ГМНЛЗ.

## Система двухуровневого электромагнитного воздействия в кристаллизаторах сортовых МНЛЗ

На основании теоретических расчётов, выполненных во второй главе, разработали комплекс оборудования электромагнитного перемешивания стального расплава, объединяющий в одну систему два комплекта электромагнитных индукторов, один из которых, расположенный в нижней части кристаллизатора, обеспечивает перемешивание жидкой фазы, второй, в районе мениска кристаллизатора – его успокоение, что позволяет более эффективно влиять на качество отливаемой заготовки. [353]. Эту систему ЭМП в кристаллизаторе спроектировали для улучшения качества поверхности и макроструктуры трубных заготовок диаметром 130, 170, 190 и 220 мм [354], производимых на модернизированной сортовой МНЛЗ-2 завода «Baku steel Company» [355, 356], в связи с чем, был заключен контракт на разработку и поставку двухуровневой системы ЭМП в кристаллизаторе с электромагнитным тормозом (Приложение 1).

Состав оборудования для двухуровневого электромагнитного воздействия в кристаллизаторе МНЛЗ можно разделить на две группы:

- статор ЭМП и электромагнитный тормоз, встраиваемые в существующий кристаллизатор, шкафы подключения промежуточные, термостойкие кабели;
- оборудование системы питания, включающее: два преобразователя частоты с выпрямительными агрегатами, силовые кабели. Технические характеристики системы ЭМП-ЭМТ приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Технические характеристики статора ЭМП и тормоза ЭМТ

№ п/п	Параметр	Значение
1	2	3
1. Технические данные кристаллизатора		
1.1	Диаметр заготовок, мм	130, 170, 190, 220
1.2	Материал гильзы кристаллизатора	Медь МС

Продолжение таблицы 4.4

1	2	3
1.3	Высота медной гильзы, мм	800
1.4	Максимальная толщина медной гильзы, мм	20
2. Технические данные статора ЭМП		
2.1	Число фаз, шт.	3
2.2	Число полюсных катушек в фазе, шт.	2
2.3	Расстояние между полюсами статора, мм	825
2.4	Соединение полюсных катушек в фазе	последовательное
2.5	Диапазон частот питания, Гц	0,5–10,0
2.6	Максимальное значение тока фазы на 1 ручей, А	250
2.7	Максимальная активная мощность, кВт	84
2.8	Коэффициент мощности	0,6–0,95
2.9	Охлаждение статора	водой кристаллизатора
2.10	Температура воды на входе, не более, °С	35–40
2.11	Вес статора ЭМП, кг	330
3. Технические данные тормоза ЭМТ		
3.1	Род тока	постоянный
3.2	Число электромагнитов	4
3.3	Соединение электромагнитов	последовательное
3.4	Омическое сопротивление цепи, Ом	0,2332
3.5	Значение тока на 1 ручей, макс., А	250
3.6	Напряжение, В	60
3.7	Потребляемая мощность, кВт	15
3.8	Охлаждение электромагнитов	водой кристаллизатора
3.9	Вес электромагнитного тормоза, кг	100

Статор ЭМП и электромагнитный тормоз удовлетворительно работают при высоком качестве воды, используемой для охлаждения медных гильз кристаллизатора. Компоновка системы ЭМП-ЭМТ в кристаллизаторе приведена на рисунках 4.13–4.16.

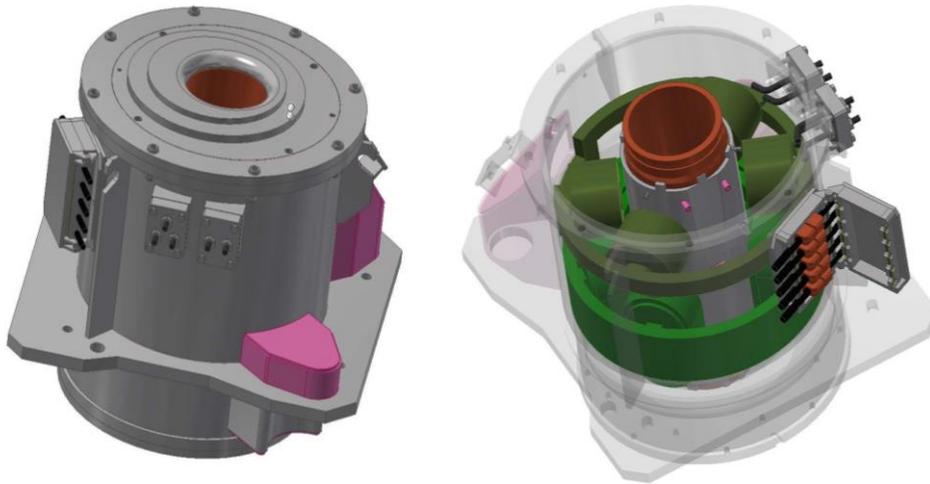


Рисунок 4.13 – Вид кристаллизатора со встроенной системой ЭМП-ЭМТ: вид на клеммную коробку и узлы уплотнения выводных концов (слева), компоновка статора ЭМП и тормоза ЭМТ в корпусе кристаллизатора (справа)

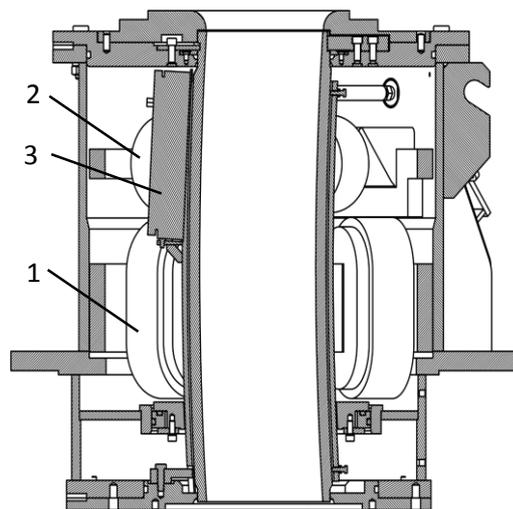


Рисунок 4.14 – Продольный разрез кристаллизатора со статором ЭМП в нижней и электромагнитным тормозом в верхней части кристаллизатора:

1 – статор ЭМП; 2 – тормоз ЭМТ; 3 – датчик уровнемера

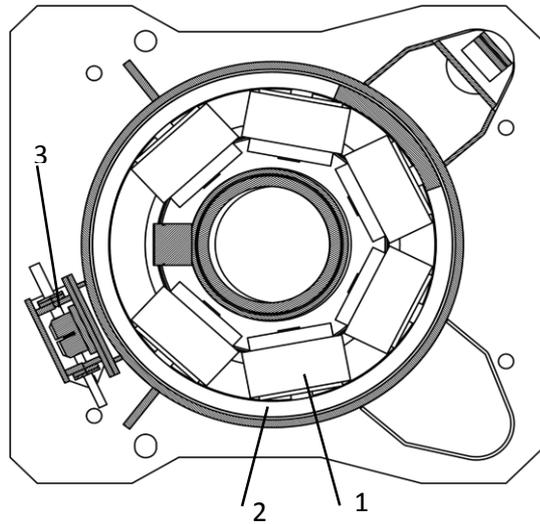


Рисунок 4.15 – Вид на трехфазный статор ЭМП сверху: 1 – шесть полюсов статора; 2 – цилиндрическое ярмо статора; 3 – клеммная коробка

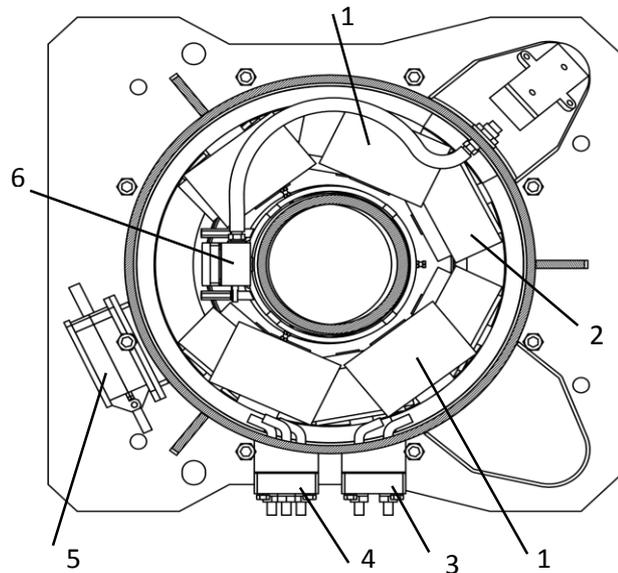


Рисунок 4.16 – Вид на четыре катушки электромагнитного тормоза: 1 – катушки ЭМТ; 2 – статор ЭМП; 3 – выводные концы ЭМТ; 4 – выводные концы ЭМП; 5 – клеммная коробка; 6 – датчик уровнемера

При этом статор ЭМП, тормоз ЭМТ и корпус кристаллизатора проектировали на максимальный размер заготовки. При переходе на меньший размер заготовки,

необходимо извлечь гильзу и рубашку охлаждения одного размера, и затем установить и закрепить снизу и сверху фланцами гильзу и рубашку меньшего размера.

Статор ЭМП, выполненный в трехфазном исполнении, содержит цилиндрическое ярмо из углеродистой стали, шихтованное из колец толщиной 2–3 мм, и шесть полюсов с катушками, намотанными непосредственно на сердечник полюса.

Полюса (зубцы) закреплены к шихтованному сердечнику болтовым соединением. Сердечник, изготовлен из углеродистой стали. По всему периметру сердечника с фиксированным шагом приварены ограничительные планки из немагнитной стали. Обмотку полюса укладывали между планками. В разработанных полюсах применили специальный водопогружной обмоточный провод, с двойной изоляцией, высокой теплостойкости и повышенной электрической и механической прочности. Сопротивление электроизоляции провода в начальный период эксплуатации статора составляет более 500 МОм. Для защиты полюсов от механических повреждений для каждой катушки изготовили предохранительный кожух из немагнитной стали. Каждая фаза содержит две катушки, соединенные последовательно. Максимальный ток, протекающий через катушку 250 А. Фазы обмотки соединены в звезду. Возможны два варианта соединения статорной обмотки в звезду – внутри статора или в клеммной коробке. Для монтажа и демонтажа статора предусмотрены стойки и рым-болты, ввертываемые в стойки.

При изготовлении статора из отдельных полюсов повышается ремонтпригодность, так как при поломке одного из полюсов не требуется демонтаж оставшихся полюсов статора ЭМП. В этом случае достаточно заменить поврежденный полюс новым в электроцехе (ремонтном цехе) завода.

Статор ЭМП работает следующим образом. Катушки полюсов, соединенные в фазе между собой последовательно, образуют трехфазную обмотку статора ЭМП (по аналогии со статором асинхронного двигателя). При питании обмоток трехфазной системой токов, сдвинутых по фазе на 120 электрических градусов, во

внутренней полости статора возбуждается магнитное поле, вращающееся вокруг вертикальной оси статора в плоскости перпендикулярной оси вытягивания. Во всех электропроводных элементах, расположенных во внутренней полости статора, пересекаемых вращающимся магнитным полем, наводятся вихревые токи, при взаимодействии которых с магнитным полем, возникают вращающиеся электродинамические силы. Под действием этих сил стальной расплав в заготовке приходит в движение, создающее положительные металлургические эффекты.

Тормоз ЭМТ (рисунок 4.17) состоит из четырех катушек, на стальные сердечники которых намотан тот же водопогружной провод, что использовали в статоре ЭМП.

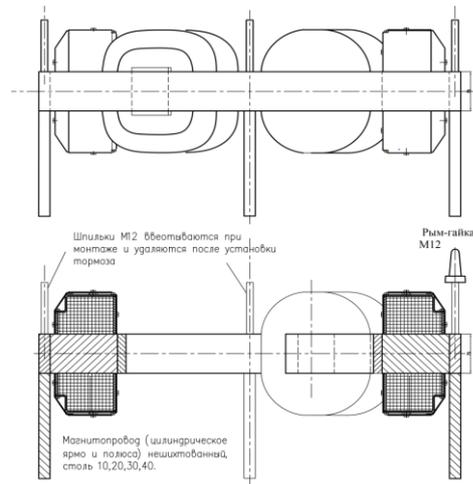


Рисунок 4.17 – Электромагнитный тормоз для подавления движений жидкого металла в районе мениска кристаллизатора

Катушки соединены последовательно и питаются постоянным током. Статор ЭМП совместно с тормозом ЭМТ, как единый самостоятельный узел, в собранном виде устанавливают в существующий корпус кристаллизатора (рисунок 4.18).

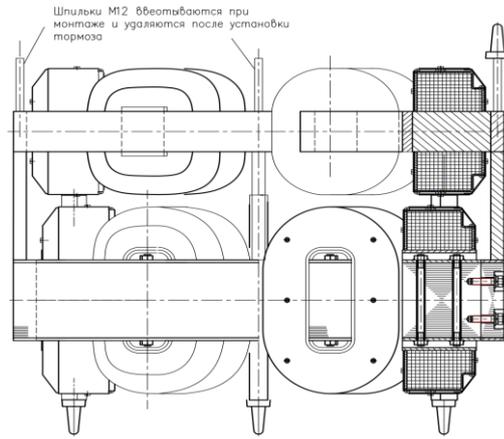


Рисунок 4.18 – Вид на систему ЭМП-ЭМТ перед установкой в корпус кристаллизатора

Принцип образования тормозной силы, препятствующей движению металла на мениске кристаллизатора, пояснён на рисунке 4.19.

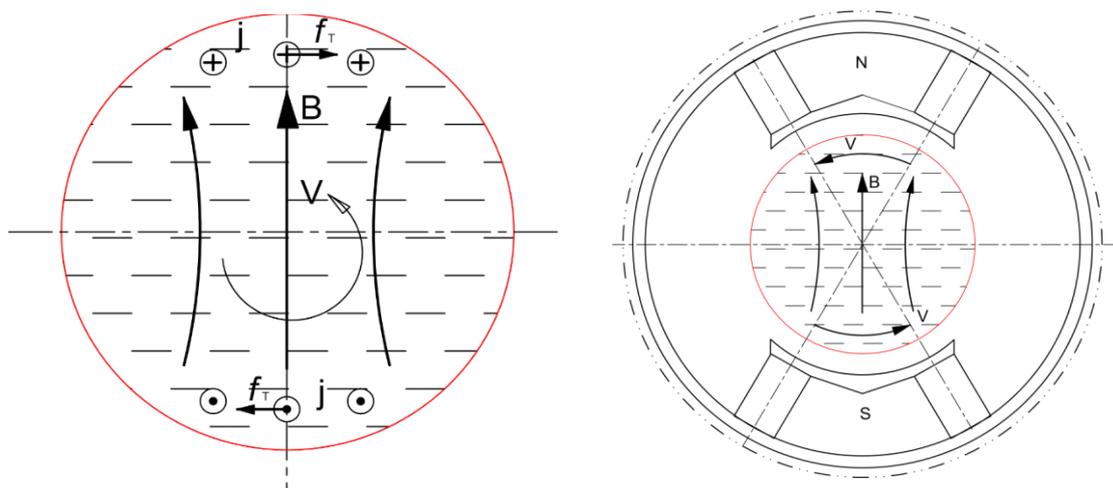


Рисунок 4.19 – Принцип образования тормозной силы при вращательном движении металла в районе мениска кристаллизатора

Воздействие постоянного магнитного поля на движущуюся проводящую среду проявляется через вихревые токи, возникающие под действием индуцируемой электродвижущей силы.

Вихревые токи при взаимодействии с магнитным полем порождают электромагнитную силу, направление которой противоположно направлению

движения. Постоянное магнитное поле оказывает тормозящее действие на любое движение, перпендикулярное вектору магнитной индукции, в том числе – на струю металла, выходящую из погружного стакана, уменьшая глубину её проникновения. Сила прямо пропорциональна скорости и индукции магнитного поля. При  $V=0$  сила равна нулю, в силу чего полное торможение невозможно.

Важной особенностью тормоза ЭМТ является то, что он охватывает область жидкой ванны непосредственно от мениска в кристаллизаторе и оказывает воздействие на начальное формирование твердой корки заготовки. Именно в этой области происходят наибольшие колебания поверхности металла, что приводит к захвату частиц шлакообразующей смеси и образованию подкорковых дефектов в виде газовых пузырей и шлаковых включений.

**Питание статора ЭМП и тормоза ЭМТ** осуществляется с помощью теплостойких кабелей от промежуточных шкафов подключения, установленных на разливочной площадке на отметке +6,550.

К промежуточным шкафам подключения статоров (один шкаф на каждый статор) подходят 12 силовых кабелей (по три фазы плюс земля – на статор) от преобразователей частоты (ПЧ), которые установлены в электропомещении, защищенном от заводской пыли и оборудованном принудительной вентиляцией с общим кондиционером для поддержания температуры, не превышающей 30 °С. Сечение и тип силовых кабелей выбирают из расчёта следующих энергосиловых параметров: ток фазы 250 А, напряжение 1000 В.

Два преобразователя частоты обеспечивают стабильную работу при входном напряжении 380 В, 50 Гц, выходном фазном токе 250 А и частоте тока 0,5–5,0 Гц.

Питание электромагнитного тормоза осуществляют от выпрямительного агрегата, обеспечивающего постоянный ток 250 А, при напряжении 60 В и мощности 15 кВт. Суммарный максимальный потребляемый двумя преобразователями частоты и выпрямительными агрегатами ток составлял 1000 А.

## **4.2. Система электромагнитного перемешивания в кристаллизаторах МНЛЗ наружного исполнения**

На сегодняшний день действующие в РФ промышленные МНЛЗ, предназначенные для производства высококачественной продукции, в основном, оснащены системами электромагнитного перемешивания, поставляемыми зарубежными фирмами. Эти системы в силу конструктивных особенностей (расположение за пределами кристаллизатора и использования для их охлаждения специально подготовленной, деминерализованной воды) отличает низкая надежность и высокое энергопотребление. Большинство статоров ЭМП иностранного производства выполнены в неразборных корпусах из аустенитной немагнитной стали. В этом случае дорогостоящий ремонт статоров должен производиться только на зарубежных заводах–изготовителях [357]. По имеющейся информации стоимость ремонта одного статора – по ценам 2018 года – составляла около 2,8 млн рублей.

После ряда обращений российских металлургических заводов с просьбой о ремонте этих, вышедших из строя систем, принимая во внимания результаты моделирования, рассмотренные во второй главе, создали системы ЭМП в кристаллизаторе наружного исполнения, в которых устранили указанные недостатки [358]. В рамках работы спроектировали и изготовили из отечественных материалов новое устройство ЭМП в кристаллизаторе наружного исполнения (далее ЭМПУ 880) для блюмовой МНЛЗ, предназначенное для производства круглых заготовок диаметром 150–410 мм из углеродистых и низколегированных трубных марок стали. При этом цена новой системы ЭМП не превышает стоимость ремонта одной импортной катушки электромагнитного перемешивания (Приложение 3).

Аналогом разработанного устройства в некоторой степени можно признать статор иностранного производства (рисунок 1.6), применяемый на ряде российских металлургических заводов. Иностраный статор состоит из 12 частей. Каждая часть состоит из шихтованного сердечника с катушкой, намотанной вокруг него. Катушка (рисунок 4.20) намотана из медной трубки прямоугольного сечения, по



Рисунок 4.20 – Катушка статора ЭМП наружного исполнения иностранных производителей

внутреннему каналу которой течет охлаждающая, специально подготовленная вода. Катушка намотана в 3 слоя по 17 витков в каждом. Двенадцать частей статора совместно образуют кольцевой магнитопровод с соленоидальной трехфазной обмоткой (по 4 катушки в фазе). Такая обмотка создает магнитное поле не только во внутренней области статора, но и во внешних боковой и торцевых сторонах. Для экранирования внешних переменных полей применили медные экраны толщиной 15 мм с торцов и с внешней цилиндрической боковой стороны. На рисунке 1.7 (справа) виден внешний цилиндрический медный экран, залитый вместе с катушками специальным компаундом (герметиком). Измерения показывают, что высота такого магнитопровода (вдоль оси статора) составляет 330–340 мм. В пределах этого размера и создаются силы, вращающие жидкую фазу заготовки. Применяемый в настоящее время статор иностранного производства периодически выходит из строя вследствие проникновения влаги внутрь корпуса и снижения из-за этого корпусной изоляции обмотки. Конструкция данного статора неразборная, ремонт возможен только у изготовителя и по его, специально для этого разработанной технологии. В конструкции применён дорогостоящий импортный герметик, повышающий эксплуатационные издержки.

Общий вид разработанного ЭМПУ 880 показан на рисунке 4.21, а его технические характеристики приведены в таблице 4.5.



Рисунок 4.21 – Общий вид ЭМПУ 880

Таблица 4.5 – Технические характеристики ЭМПУ 880

№ п/п	Параметр	Значение
1	2	3
1	Размеры	
1.1.	Диаметр наружный, наибольший, мм	1326
1.2.	Диаметр внутренний, мм	880
1.3.	Высота, мм	560
1.4.	Длина клеммной коробки, мм	315
1.5.	Ширина клеммной коробки, мм	580
2.	Вес, кг	1900
3.	Технические данные статора	
3.1.	Число фаз, шт.	3
3.2.	Число полюсных катушек в фазе, шт.	4

1	2	3
3.3.	Соединение полюсных катушек в фазе	последовательное
3.4.	Диапазон частот питания, Гц	1–5
3.5.	Максимальный ток фазы, А	250
3.6.	Максимальное линейное напряжение, В	415
3.7.	Максимальная активная мощность, кВт	190
3.8.	Коэффициент мощности	0,7–0,9
3.9.	Расход воды на охлаждение наибольший, л/мин	120
3.10.	Вес статора, кг	850

ЭМПУ 880 (рисунки 4.22–4.24) состоит из трехфазного водопогружного статора, встраиваемого в разборный корпус и фланца с приваренным к нему цилиндрическим кольцом, как показано на рисунке 4.24 [343].

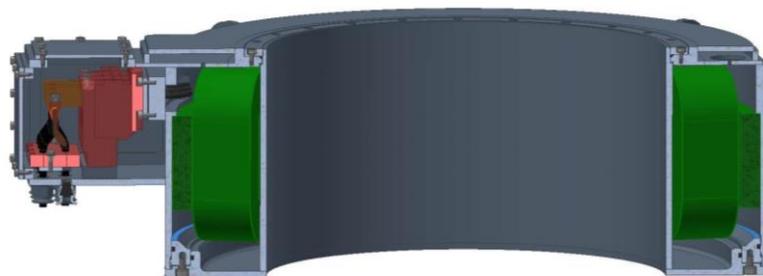


Рисунок 4.22 – Поперечное сечение ЭМПУ 880



Рисунок 4.23 – Вид на изготовленный статор (слева) и схему статора с коробкой выводов (справа)

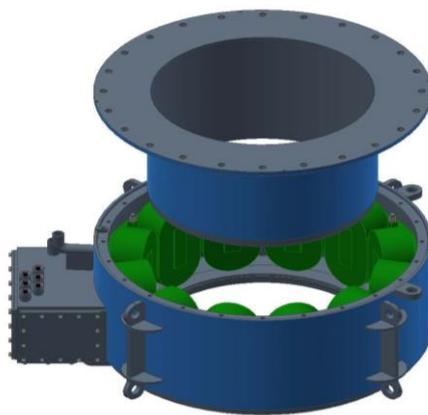


Рисунок 4.24 – Сборка (разборка) ЭМПУ 880

Крепление статора к сварному контейнеру выполнили десятью шпильками М16 к платикам, приваренным к внутренней поверхности корпуса. Соединение контейнера с фланцем обеспечивали 24 болтами М20. Герметизацию корпуса выполнили с использованием уплотнений из теплостойкой резины. Подвод и отвод воды во внутреннюю область контейнера обеспечивали через концевые штуцера с Ду=32 мм. Сварной контейнер содержит клеммный узел со съёмными крышками для подсоединения силовых кабелей. Выводные концы трех фаз статора выходят через узлы уплотнения в виде герметизирующих узлов, каждый из которых содержит уплотнительное резиновое кольцо, помещенное между двумя биконическими шайбами, сжимающими резиновое кольцо нажимных гаек.

Для присоединения силовых кабелей к выводным концам статорной обмотки использовали сборную конструкцию, состоящую из медной шины со специальными быстроразъемными узлами (после сборки данную конструкцию герметизировали термоусаживаемой двухслойной лентой).

Сальники силовых кабелей согласовывали с существующими размерами подводящих кабелей. Для отвода конденсата из клеммного узла предусмотрели клапан. Для слива воды в случае разборки статора предусмотрели две пробки.

Для организации протока воды в кольцевой внутренней области контейнера вход и выход воды выполнили с противоположных сторон. Вода, поступающая снизу через подводящий штуцер, снизу обтекала статор с двух сторон (по кольцевой полости), непосредственно охлаждая катушки полюсов, и отводилась через отверстие в верхней части контейнера и отводящий штуцер.

Статор ЭМП трехфазного исполнения [359] содержит цилиндрическое ярмо, изготовленное из углеродистой стали и шихтованное из колец толщиной 2–3 мм, и двенадцать полюсов, катушки которых намотали непосредственно на их сердечниках [360].

Крепление каждого полюса к ярму обеспечивали двумя болтами, ввернутыми в сердечник полюса. Сердечник полюса – шихтованный [361]. Магнитопровод статора защищен от воды стойким покрытием.

Обмоточный провод — специальный, теплостойкий, водопогружной, высокой электрической и механической прочности, с сопротивлением изоляции в начальный период эксплуатации статора более 500 МОм. В процессе эксплуатации допускают снижение сопротивления изоляции до 500 Ом [362]. Каждую катушку намотали по специальной технологии, обеспечивающей необходимое охлаждение. Катушки полюсов в каждой фазе соединили последовательно, фазы обмотки соединили в клеммной коробке в звезду. К концам фаз припаяли выводные концы, выполненные гибким теплостойким проводом сечением 50–70 мм<sup>2</sup>, поверхность которого дополнительно защитили специальным термоусаживающимся механически прочным чулком. Места последовательных соединений концов катушек в фазах выполнили с применением медных муфт,

герметично изолированных термоусаживающими трубками. Соединения катушек полюсов в фазах выполнили в нижней части статора, а присоединение выводных концов – в его верхней части.

Для монтажа и демонтажа статора предусмотрели специальные стойки.

Приведенная конструкция ЭМПУ 880 – полностью разборная для профилактики и ремонта в условиях электроцеха (ремонтного цеха) завода без привлечения дорогостоящих материалов и оборудования. Все материалы отечественные и легкодоступные [363].

В разработанном статоре применен более узкий магнитопровод высотой 200 мм, вместо 340 мм в иностранном аналоге. Расстояние от плоскости максимальных вращающих сил до уровня мениска в кристаллизаторе составляет ориентировочно 585 мм. Учитывая, что суммарная энергия в потоке активной зоны (200 вместо 340 мм) уменьшилась, а расстояние до мениска увеличилось, ЭМПУ 880 обеспечит значительно более спокойный мениск при более интенсивных режимах перемешивания [360], что позволит существенно улучшить качество непрерывно-литой заготовки.

#### **4.3. Система электромагнитного перемешивания в кристаллизаторах и зоне окончания затвердевания блюмовых МНЛЗ**

На блюмовых МНЛЗ разливают стали машиностроительного назначения широкого марочного сортамента, с высокими требованиями по качеству макроструктуры. В связи с этим, для блюмовой машины непрерывного литья заготовок Оскольского электрометаллургического комбината, производящей заготовки сечением 300x360 мм из подшипниковых и конструкционных марок стали, разработали и изготовили двухуровневую систему электромагнитного перемешивания: в кристаллизаторе (К-ЭМП) и зоне окончания затвердевания (СВЭМП) с вращающимся магнитным полем [336].

Кристаллизатор с ЭМП (рисунок 4.25) спроектировали с возможностью установки на опытный ручей взамен серийных кристаллизаторов без какой-либо

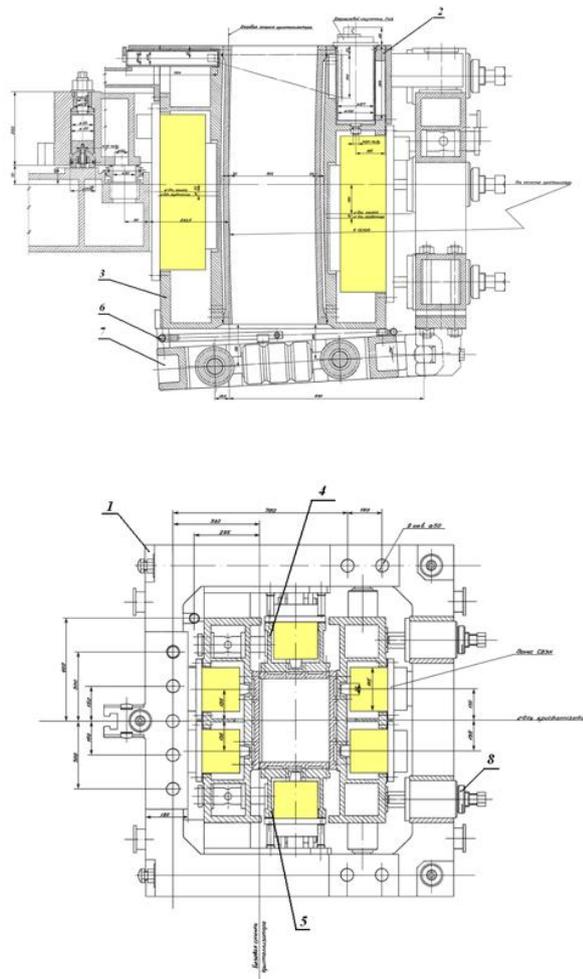


Рисунок 4.25 – Кристаллизатор с ЭМП для литья заготовок 300x360 мм

модернизации рамы механизма качания и устройств для подвода и отвода охлаждающей воды.

Максимальное приближение к поверхности заготовки устройства электромагнитного перемешивания, встроенного в кристаллизатор, позволило снизить потребляемую ЭМП мощность в 1,5-2,0 раза по сравнению с конструкциями зарубежных производителей, устанавливаемыми, как правило, вне корпуса кристаллизатора. В результате значительно упростили конструкцию и повысили коэффициент полезного действия кристаллизатора с ЭМП [341].

Важной конструктивной особенностью разработанных кристаллизаторов с устройствами ЭМП было сохранение межосевого расстояния между ручьями МНЛЗ.

Кристаллизатор для литья заготовок 300x360 мм содержит сварную коробчатого сечения раму (поз. 1), на которой установлены четыре стенки в сборе (поз. 2–5), образующие корпус кристаллизатора, блок поддерживающих роликов (поз. 6) и коллектор подбоя (поз. 7). На коробчатой раме предусмотрели устройства для установки и крепления кристаллизатора на механизме качания, а также устройства подвода и отвода воды для охлаждения кристаллизатора и коллектора подбоя. На раме жёстко установили стенку базового радиуса (поз. 2) и подвижно – стенку малого радиуса (поз. 3). Между этими стенками смонтировали торцевые стенки – правую и левую (поз. 4, 5), которые при помощи шести пружинных узлов (поз.8). встроенных в раму кристаллизатора, прижали к рабочей поверхности стенки базового радиуса подвижной стенкой малого радиуса. Каждый из этих узлов состоит из нажимного винта и пакета предварительно поджатых тарельчатых пружин.

Для снижения экранирования электромагнитного поля, рабочие стенки длиной 1000 мм выполнили первоначальной толщиной 30 мм. Уменьшение толщины медных стенок стало возможным потому, что вместо сверлёных каналов для охлаждающей воды на их поверхностях, обращённых к корпусу кристаллизатора, проточили плоские продольные каналы. Запас по толщине стенок на ремонтные перестройки составил 10 мм. Для увеличения площади охлаждения широкие стенки со стороны каналов выполнили волнистыми. С целью уменьшения экранирования электромагнитного поля, создаваемого статором ЭМП, части корпусов стенок, примыкающие к медным рабочим стенкам, изготовили из нержавеющей стали аустенитного класса. Корпус каждой стенки поделили по высоте на верхнюю и нижнюю полости, служащими коллекторами для охлаждающей воды. В верхней части корпуса малого радиуса установили контейнер излучателя, а в верхней части корпуса базовой стенки – изотопный счётчик системы поддержания уровня. В нижних полостях установили полюса статора электромагнитного перемешивателя. К нижней части рамы кристаллизатора при помощи переходного подрамника крепили блок четырех поддерживающих роликов.

Охлаждающая вода поступала из рамы механизма качания в раму кристаллизатора, а из неё – в стенки кристаллизатора и трубчатый коллектор подбоя. После охлаждения медных рабочих стенок и полюсов статора воду отводили в раму кристаллизатора, а из неё – в раму механизма качания.

В корпус кристаллизатора встроили трёхфазное устройство ЭМП (по 2 полюса на фазу), создающее вращающееся магнитное поле. В соответствии с разработанной конструкцией по широким стенкам установили по два, а по узким – по одному полюсу статора, при этом корпус кристаллизатора, образованный четырьмя корпусами стенок, использовали в качестве ярма магнитопровода. Каждый полюс статора включает основание, сердечник, секционированную катушку и выводную коробку. Катушки полюсов статора изготовили из термостойкого провода с водостойкой изоляцией. Полюса статора поместили снаружи корпуса кристаллизатора. Такая компоновка К-ЭМП оказалась ремонтпригодной и удобной для эксплуатации. Токоподводы к кристаллизатору расположили в гибких защитных рукавах. На раме кристаллизатора со стороны стенки малого радиуса установили водозащитную клеммную коробку, внутри которой выполнили межполюсные соединения. Кроме того, она служила узлом соединения кабелей, идущих к преобразователям частоты.

В сварной водоохлаждаемый корпус (поз. 1), статора- вращателя для зоны окончания затвердевания (рисунок 4.26), изготовленного из нержавеющей стали, поместили шесть полюсов (поз. 2) с катушками.

Охлаждение полюсов производили технической водой последовательно с охлаждением обращённых к разливаемому слитку рабочих поверхностей корпуса статора. Секции шихтованного магнитопровода, формирующие замкнутое ярмо электрической машины, установили на наружных стенках корпуса. В центральной части СВЭМП находится продольная сквозная полость прямоугольного сечения, через которую проходил разливаемый слиток. Стенки этой полости (поз. 3), торцевые стенки корпуса статора (поз. 4) и все перегородки выполнили из немагнитной нержавеющей стали. Полюса статора, как и в кристаллизаторе-ЭМП, выполнили в виде сменных элементов. Отличие полюсов статора-вращателя для

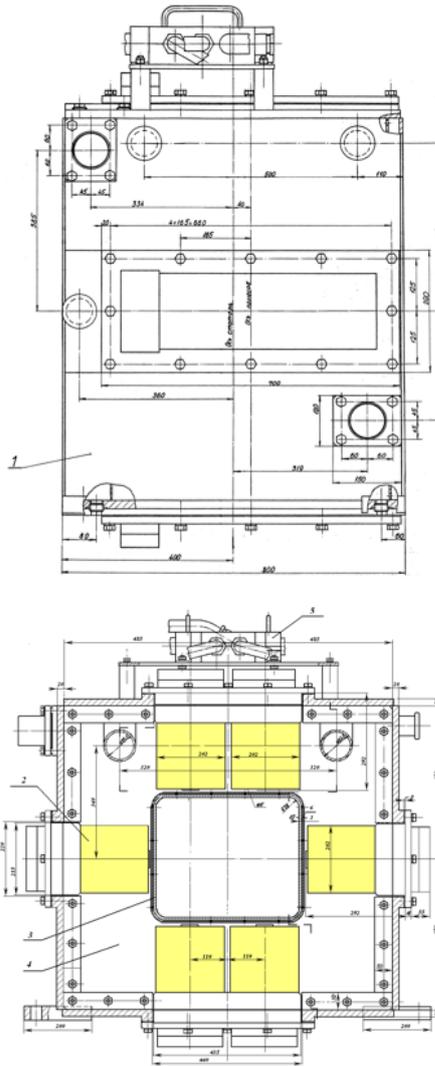


Рисунок 4.26 – Статор-вращатель ЭМП для литья заготовок сечением 300x360 мм

ЗОЗ от полюсов К-ЭМП состоит в том, что они имеют большие габариты, их катушки выполнены с большим числом ампер-витков, а сердечники катушек изготовили шихтованными.

В гибких защитных рукавах разместили токоподводы к статору, включающие в себя клеммную коробку (поз. 5), с высокой степенью пыле- и влагозащиты размещенную на верхней поверхности статора. Все межполюсные соединения статора произвели внутри клеммной коробки. Кроме того, клеммная коробка предназначена для присоединения кабелей, идущих к тиристорным преобразователям, обеспечивающих энергоснабжение статора-вращателя. Основные технические параметры кристаллизатора-электромагнитного

перемешивателя и статора-вращателя для зоны окончания затвердевания приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Технические параметры кристаллизатора-электромагнитного перемешивателя и статора-вращателя для зоны окончания затвердевания

№ п/п	Параметр	Значение	
		К-ЭМП	СВЭМП
1	2	3	4
1.	Базовый радиус МНЛЗ, мм	12000	
2.	Сечение заготовок, мм	300x360	
3.	Расход воды на охлаждение, м <sup>3</sup> /ч	140–160*	80–100**
4.	Давление воды на входе, кгс/см <sup>2</sup>	6–8	3–4
5.	Протяженность активной зоны статора, мм	400	
6.	Количество полюсов, шт.	6	
7.	Количество фаз, шт.	3	
8.	Частота питающего тока, Гц	1–7	1–10
9.	Напряжение источника питания, фазное В	230	280
10.	Номинальный ток фазы, А	150	200
11.	Мощность статора полная, кВА	104 (f=3 Гц)	168 (f=5 Гц)
12.	Мощность статора активная, кВт	45 (f=3 Гц)	46 (f=5 Гц)

\* применяют ту же воду, что используют для охлаждения рабочих стенок кристаллизатора;

\*\* используют техническую воду для охлаждения оборудования.

Исследования системы питания и управления этим устройством показали возможность работать при питающем напряжении цеховой сети и изменении фазного тока кристаллизатора-ЭМП в интервале 0–160 А и статора-вращателя – 0–200 А. Частоту тока обоих перемешивателей варьировали в диапазоне 1,0–7,0 Гц.



затвердевания необходимо предусмотреть возможность перемещения статора вдоль технологической оси МНЛЗ в зависимости от сечения заготовок, марки стали и скорости разливки.

Встроенные системы электромагнитного перемешивания обладают целым рядом перечисленных выше преимуществ по сравнению с системами ЭМП в кристаллизаторе наружного исполнения. Однако существенным недостатком встроенных систем ЭМП следует признать необходимость оснащения практически всего парка сменных корпусов кристаллизаторов устройствами электромагнитного перемешивания. При достигнутой в настоящее время стойкости кристаллизаторов, равной 600–1000 плавов и более, парк кристаллизаторов для каждого формата НЛЗ обычно составляет  $n+1$ , где  $n$  – количество ручьев. Поэтому это обстоятельство при малом количестве форматов делает вышеуказанный недостаток малозначительным, и – существенным при большом размерном сортаменте производимых заготовок.

#### **4.4. Система электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания машины полунепрерывного литья заготовок**

В ряде случаев при разливке заготовок большого сечения особенно из марок стали ответственного назначения с высокими требованиями по макроструктуре применяют системы ЭМП на двух уровнях: в кристаллизаторе и в зоне вторичного охлаждения (зоне окончания затвердевания). Конструкции статоров ЭМП для зоны окончания затвердевания производства иностранных фирм схожа с устройством систем электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе наружного исполнения. Корпус изготавливают из немагнитной стали аустенитного класса, при этом требуется два контура охлаждения – промышленной водой для охлаждения корпуса и специально подготовленной дименерализованной водой для охлаждения полюсов статора.

С целью повышения качества круглых заготовок диаметром 250 и 360 мм из высоколегированных марок стали и устранения указанных недостатков для

машины полунепрерывного литья заготовок АО «Металлургический завод «Электросталь» в процессе исследований разработали, поставили и ввели в промышленную эксплуатацию двухуровневую систему ЭМП – в кристаллизаторе и в зоне окончания затвердевания (Приложение 4) [363]. Эту работу выполнили совместно с ЗАО «ЭМТ» (г. Москва) и ЗАО НПП «МАШПРОМ» (г. Екатеринбург) [364].

Состав разработанного оборудования для электромагнитного перемешивания разделен на две группы:

- статоры ЭМП, шкафы подключения промежуточные, термостойкие кабели;
- оборудование системы питания, включающее по два преобразователя частоты на ручей: для ЭМП в кристаллизаторе (ЭМП-К) и для ЭМП в зоне окончания затвердевания (ЭМК-З), силовые кабели.

Конструкция этой системы электромагнитного перемешивания отличается от двухуровневой системы ЭМП, примененной на блюмовой МНЛЗ «ОЭМК», тем, что как для кристаллизатора, так и для статора в зоне окончания затвердевания разработали оборудование с симметричным расположением полюсов по длине окружности статора. В ЭМП МНЛЗ «ОЭМК» в качестве ярма магнитопровода статора использовали корпус кристаллизатора, а во вновь разработанной системе ярмо выполнили шихтованным. Кроме того, статоры ЭМП в ЗОЗ располагали на движущихся каретках, в отличие от стационарных статоров МНЛЗ «ОЭМК».

Статоры, применяемые на машине полунепрерывного литья заготовок, представляют собой электрические машины переменного тока пониженной частоты, водопогружного типа, встраиваемые в корпуса кристаллизаторов, изготовленные из ферромагнитной стали, и в специальные корпуса из аустенитной нержавеющей стали, устанавливаемые в зоне окончания затвердевания. Охлаждение статоров ЭМП-К обеспечивается водой кристаллизатора, ЭМП-З – технической водой для охлаждения корпуса каретки. Основные технические характеристики статоров ЭМП-К и ЭМП-З приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Основные параметры статоров ЭМП-К и ЭМП-3

№ п/п	Параметр	ЭМП-К	ЭМП-3
1	2	3	4
1.	Тип обмотки	катушечная с явно выраженными полюсами	
2.	Тип обмоточного провода	водопогружной с допустимой температурой жилы до 100 °С	
3.	Число фаз, шт.	3	
4.	Соединение катушек полюсов в фазе	последовательное	
5.	Соединение фаз	звезда	
6.	Частоты питания, Гц	1,5–3,0	5,0–8,0
7.	Ток фазный, А	200–225	170–225
8.	Напряжение фазы максимальное, В	115–155	200–220
9.	Активная мощность при токе фазы 200 А, кВт	45	65
10.	Коэффициент мощности	0,8–0,92	0,45–0,6
11.	Охлаждение обмотки статора – водой для охлаждения	кристаллизатора	корпуса каретки
12.	Температура воды на входе в статор, °С	35	
13.	Температура воды на выходе из статора, °С	36	
14.	Давление воды в статоре, атм	до 10	
15.	Внешний диаметр статора, мм	750	
16.	Расстояние между полюсами, мм	437	
17.	Толщина медных гильз диаметром 360/250, мм	22/16	
18.	Высота статора, мм	515	
19.	Вес статора, кг	350	

Статоры ЭМП-К и ЭМП-3 (рисунки 4.28–4.30) имеют ярмо поз. 1 цилиндрической формы, к внутренней поверхности которого, болтовым соединением поз. 3, крепили по шесть электромагнитных полюсов с обмотками поз. 2.

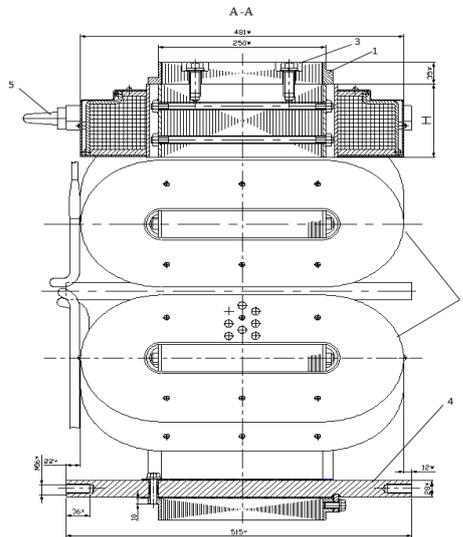


Рисунок 4.28 – Статор ЭМП (ЭМП-К, ЭМП-3). Продольный разрез

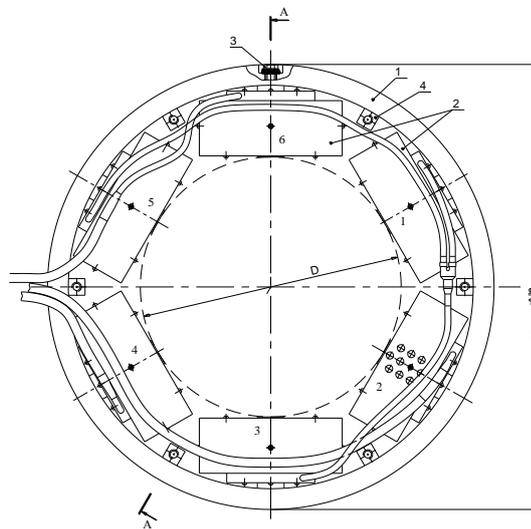


Рисунок 4.29 – Статор ЭМП (ЭМП-К, ЭМП-3). Вид сверху на электрические соединения

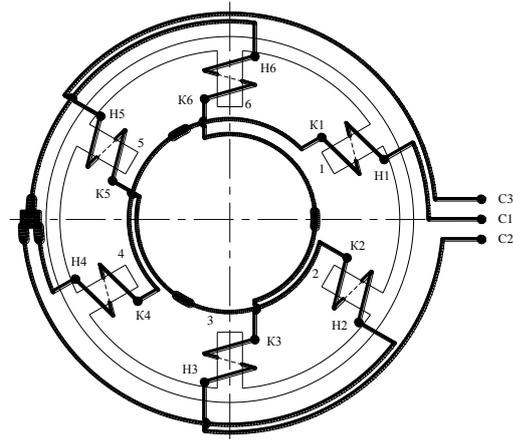


Рисунок 4.30 – Схема соединений обмоток полюсов статоров ЭМП-К и ЭМП-З

Статоры ЭМП-К установлены в корпуса кристаллизаторов (рисунки 4.31–4.33).

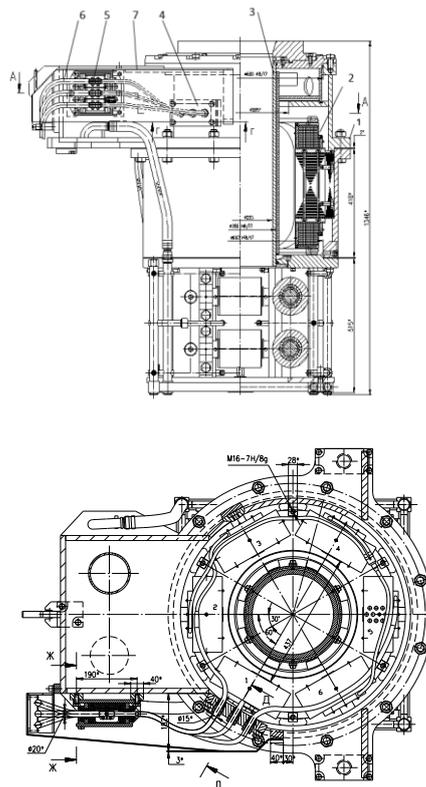


Рисунок 4.31 – Статор ЭМП-К встроенный в корпус кристаллизатора:  
 1 – разъемный корпус кристаллизатора; 2 – статор ЭМП; 3 – медная гильза кристаллизатора; 4 – узел уплотнения выводных концов; 5 – коробка выводов;  
 6 – кабели питания; 7 – защитный кожух

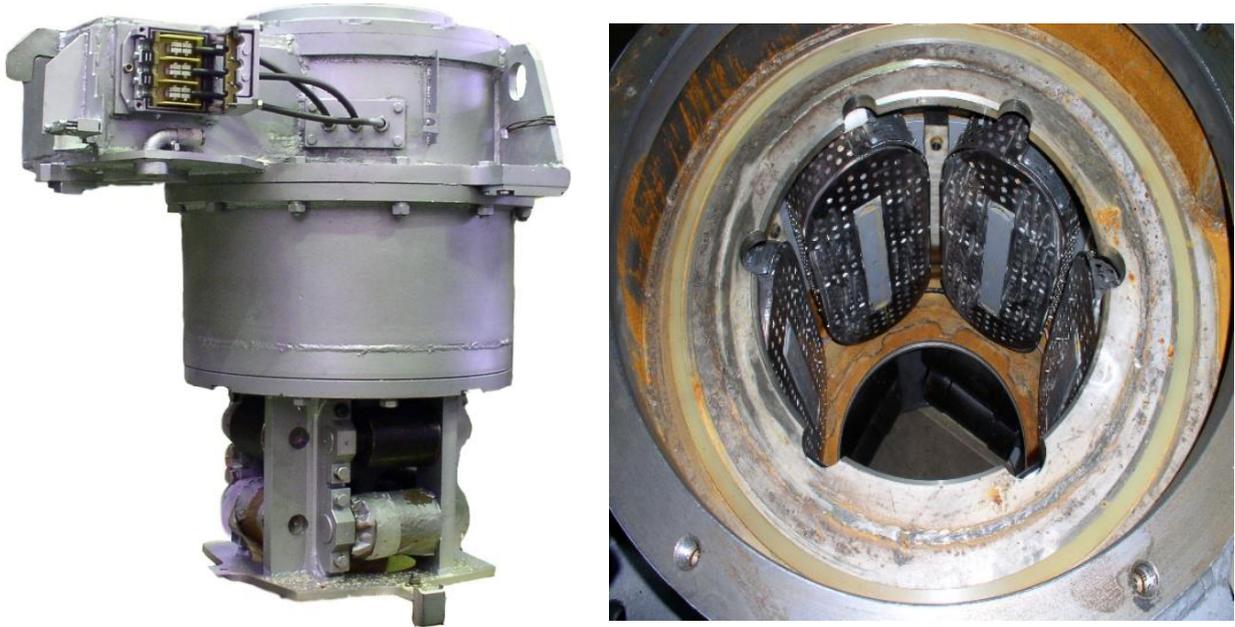


Рисунок 4.32 – Кристаллизатор-электромагнитный перемешиватель для литья



Рисунок 4.33 – Кристаллизаторы со встроенными статорами ЭМП на 2-х ручьевой МПНЛЗ завода «Электросталь»

Статоры ЭМП-3 размещены в движущихся каретках 303 (рисунки 4.34–4.36). Перемещение статоров ЭМП-3 позволяет обеспечивать электромагнитное

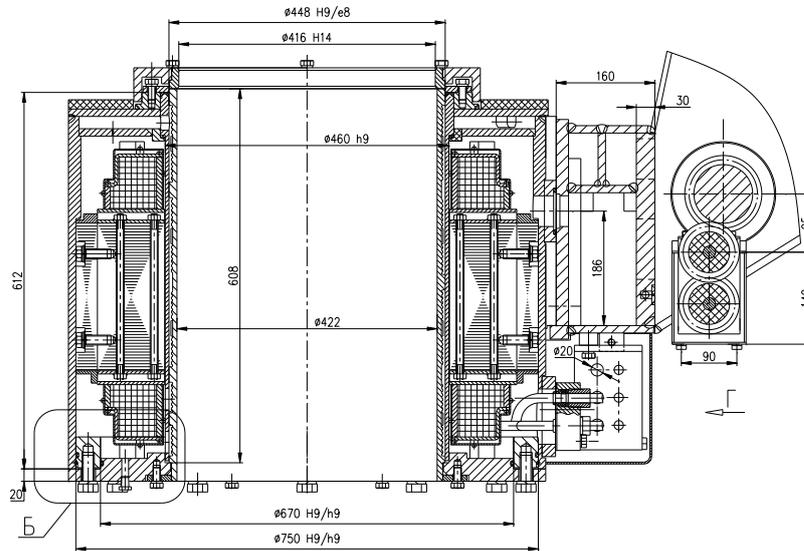


Рисунок 4.34 – Статор ЭМП-3 в водоохлаждаемом корпусе каретки 303.

Поперечный разрез



Рисунок 4.35 – Статор ЭМП-3 для литья заготовок диаметром 250 и 360 мм



Рисунок 4.36 – Каретки ЭМП в зоне окончания затвердевания:  
слева – перед установкой на МПНЛЗ, справа – на МПНЛЗ с установленными статорами

перемешивание в зоне схождения фронтов кристаллизации (слежение за «лункой»), что обеспечивает разрушение дендритов (столбчатых кристаллов) и заполнение порциями жидкого металла образующихся усадочных пустот в зоне схождения фронтов кристаллизации в районе «лунки».

Питание статоров ЭМП обеспечивают от трехфазного преобразователя частоты, имеющего на выходе регулируемые синусоидальный ток, частоту в пределах 1–15 Гц, напряжение до 380 В. Управление статорами ЭМП производят с пульта управления МПНЛЗ.

#### **4.5. Усовершенствование гильзового кристаллизатора для обеспечения равномерного первичного охлаждения слитка**

Формирование в кристаллизаторе равномерной корки затвердевающего слитка является главным условием для получения качественной заготовки, соответствующей требованиям, предъявляемым к поверхности слитка, его геометрическим размерам, отсутствию внутренних и наружных трещин

термического происхождения. От равнотолщинности и прочности корки также зависит и максимальная скорость разливки.

Как было рассмотрено ранее, ЭМП в кристаллизаторе позволяет улучшить условия для образования фронта кристаллизации и уменьшения разнотолщинности корки слитка. Достигнутый эффект от применения ЭМП может быть существенно уменьшен, если условия охлаждения слитка в кристаллизаторе не будут равнозначными по всему периметру его поперечного сечения.

В гильзе кристаллизатора при формировании корки слитка одновременно протекают несколько процессов, оказывающих друг на друга взаимное влияние:

- теплообмен между затвердевающей коркой слитка в кристаллизаторе и водой, охлаждающей наружные стенки гильзы;
- усадка и снижение температуры затвердевающей корки по ходу кристаллизации;
- деформация корки слитка под действием ферростатического давления и термических напряжений;
- деформация гильзы под действием термических напряжений;
- деформация гильзы под действием болтов, центрирующих рубашку охлаждения относительно гильзы, имеющая место – в основном – при литье крупноформатных заготовок.

Из открытых литературных источников известно, что чем больше тепла в гильзе кристаллизатора при данной скорости разливки будет отобрано с единицы площади поверхности заготовки, тем толще будет образовавшаяся корка, меньше температура её наружной поверхности и прочнее оболочка слитка будет на выходе из кристаллизатора. Основными критериями отбора тепла от кристаллизуемой корки в кристаллизаторе являются величина газового зазора между коркой и медной стенкой гильзы, а также коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности медной стенки к охлаждающей воде.

С теплотехнической точки зрения кристаллизатор возможно представить как рекуперативный теплообменный аппарат, в котором затвердевающая сталь отдает своё тепло охлаждающей воде через медную стенку кристаллизатора.

Выделяемая скрытая теплота кристаллизации передается через стенку гильзы к воде. Тепловой поток ( $Q$ ) от фронта затвердевания с температурой солидус к охлаждающей воде возможно представить в виде формулы [365]:

$$Q = \frac{1}{R_0}(T_c - T_в), \quad (3.1)$$

где  $R_0$  – общее сопротивление на пути теплового потока;

$T_c$  – температура солидуса затвердевающей стали;

$T_в$  – температура охлаждающей воды.

Общее сопротивление  $R_0$  на пути теплового потока от фронта затвердевания можно выразить следующими составляющими:

$$R_0 = \frac{\delta_c}{\lambda_c} + R_з + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha},$$

(3.2)

где  $\delta_c$  – толщина затвердевшей корки, м;  $\lambda_c$  – коэффициент теплопроводности стали, кВт/(м·К);  $R_з$  – тепловое сопротивление газового зазора, м<sup>2</sup>·К/кВт;  $\delta_m$  – толщина медной стенки, м;  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности меди, кВт/(м·К);  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи воды, кВт/(м·К).

Совокупное термическое сопротивление системы на пути от жидкой стали до охлаждающей воды складывается из термического сопротивления оболочки слитка, газового зазора, медной стенки кристаллизатора и границы медной стенки и охлаждающей воды.

С учетом изложенных формул, было рассмотрено влияние каждого фактора на конструктивные параметры кристаллизатора.

Термическое сопротивление корки стальной заготовки в основном определяется её толщиной, которую упрощенно можно рассчитать по формуле «квадратного корня»:

$$\delta = k\sqrt{\tau}, \quad (3.3)$$

где  $\delta$  – толщина стенки корки в определенном поперечном сечении, мм;

$k$  – коэффициент затвердевания, зависящий от марки стали и формата производимых заготовок, находящийся в пределах 22–31 мм/мин<sup>1/2</sup>;

$\tau$  – время нахождения данного сечения в кристаллизаторе, мин.

При толщине корки заготовки 6–8 мм, её термическое сопротивление  $\delta_c$  становится равным тепловому сопротивлению газового зазора  $R_3$ .

Рассмотрено также влияние охлаждения наружной поверхности гильзы водой. Теплоотвод с поверхности гильзы определяется формулой

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t, \quad (3.4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности гильзы к воде;

$F$  – поверхность контакта охлаждающей воды с поверхностью гильзы;

$\Delta t$  – разность температуры между наружной поверхностью гильзы и охлаждающей водой.

Если в 80-годах прошлого века скорость протекающей воды в каналах гильз кристаллизаторов составляла 6–7 м/с с коэффициентом теплоотдачи 20000–25000 Вт/(м<sup>2</sup>·К) и считалась достаточной, то в настоящее время с увеличением скорости разливки она увеличилась до 11–15 м/с. При этом, по данным работы [366] разница скоростей движения воды по двум сторонам гильзы не должна превышать один м/с, что достигают её точным центрированием по отношению к рубашке охлаждения. Выполнение указанных мероприятий позволяет обеспечить коэффициент теплопередачи от стенки гильзы к охлаждающей воде в интервале 35–40 кВт/(м<sup>2</sup>·К).

Скорость прохождения охлаждающей воды в кристаллизаторе в зазоре между гильзой и рубашкой зависит от поперечного размера щели, а также расхода и давления воды. При конкретном расходе воды, чем меньше зазор, тем выше скорость её протекания, и увеличивается гидравлическое сопротивление её прохождению. Температура кипения воды с ростом давления повышается, поэтому, для снижения возможности закипания воды на наружной поверхности гильзы повышают давление воды на вводе в кристаллизатор и выходе из него на

7–11 и 2–4 бар, соответственно. Учитывая формулу (3.4), разные варианты увеличения теплоотода сводятся к увеличению площади поверхности и коэффициента теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности гильзы к воде в кольцевых каналах рассчитывается по модифицированной формуле, приведенной в работе [367]:

$$\alpha := 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr_w^{0.4} \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{0.45} \cdot \frac{\lambda_w}{De}, \quad (3.5)$$

где  $Re$  – безразмерный критерий Рейнольдса;

$Pr_w$  – безразмерный критерий Прандтля, рассчитанный для ядра потока;

$D_1$  – внутренний размер рубашки охлаждения;

$D_2$  – наружный размер гильзы кристаллизатора;

$\lambda_w$  – коэффициент теплопроводности воды при температуре ядра потока;

$De$  – эффективный размер канала охлаждения;

$De = D_1 - D_2 = 2 \cdot \delta$ , где  $\delta$  – ширина щели охлаждения.

При этом критерий Рейнольдса определяют по формуле

$$Re = w \cdot De \cdot \rho / \mu, \quad (3.6)$$

где  $w$  – скорость движения воды в канале охлаждения,

$\rho$  – плотность охлаждающей воды,

$\mu$  – динамический коэффициент вязкости воды.

$$Pr_w = C \cdot \mu / \lambda_w, \quad (3.7)$$

где  $C$  – теплоемкость воды.

Применяемые, в основном, в настоящее время на МНЛЗ гильзовые кристаллизаторы для литья сортовых, круглых и блюмовых заготовок имеют конструктивный недостаток, заключающийся в том, что для центрирования рубашек охлаждения относительно гильзы используют вкрученные в рубашку болты, которые необходимо отводить от гильзы с учетом её температурного расширения (рисунок 4.37).

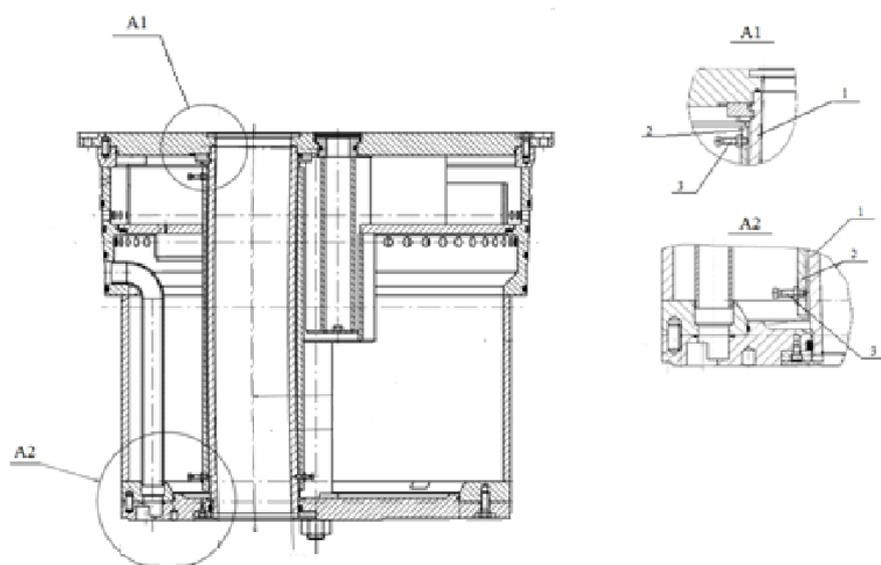


Рисунок 4.37 – Традиционная конструкция гильзового кристаллизатора:

1 – рубашка охлаждения, 2 – гильза кристаллизатора, 3 – центрирующий болт

Из-за этого кольцевой зазор между гильзой и рубашкой, по которому проходит охлаждающая гильзу вода, может иметь существенные отклонения от заданных значений из-за возможного произвольного поперечного смещения рубашки относительно гильзы (рисунок 4.38).

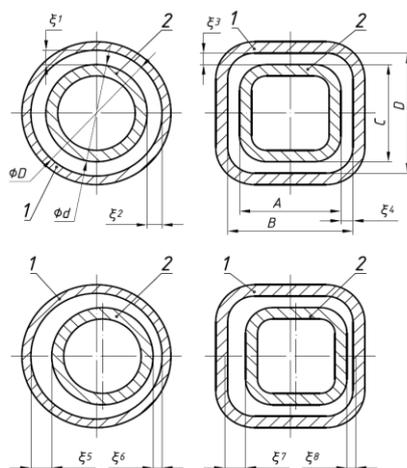


Рисунок 4.38 – Схема поперечного сечения кристаллизатора для круглых заготовок (слева) и для квадратных заготовок (справа): сверху рубашка охлаждения (1) расположена относительно гильзы (2) с постоянным зазором

зазором  $\xi^1 = \xi^2$ ,  $\xi^3 = \xi^4$ ; снизу рубашка смещена относительно

гильзы  $\xi^5 > \xi^6$ ,  $\xi^7 > \xi^8$

При этом, теоретические значения зазора обычно находятся в пределах от 3,25 до 4,0 мм для всех типоразмеров кристаллизаторов – сортовых заготовок от 100x100 до 180x180 мм, круглых заготовок диаметром 130–600 мм, блюмовых заготовок от 220x280 до 400x540 мм. При этом следует учесть, что при традиционной конструкции кристаллизатора несоосность расположения поверхностей рубашки и гильзы, образующих канал для прохода воды, охлаждающей гильзу, тем больше, чем больше формат отливаемого слитка. Если для сортовых и небольших круглых заготовок величина, на которую следует отводить от гильзы регулировочные болты, составляет в зависимости от формата заготовки 0,15–0,25 мм, то для крупноформатных заготовок эта величина, например, для заготовок диаметром 550 мм, может быть равной 0,70–0,80 мм, из-за чего расчётный кольцевой зазор 3,25 мм для воды в разных точках по его периметру может отличаться более чем в 1,5 раза. В этом случае полость для протекания воды не обеспечивает прохода одинаковых объемов воды, охлаждающих гильзу, и разница этих объемов может достигать 40 %, что несомненно приводит к нарушению равномерности первичного охлаждения и соответственно – различной будет температура стенки гильзы на этих участках и различными по толщине будут соответствующие участки корки слитка, что в результате приведет к ухудшению качества НЛЗ.

В случае круглых заготовок это приводит к овальности и возникновению продольных трещин, в случае квадратных – к ромбичности и околоугловым продольным трещинам. Например, стремление технического персонала в период освоения МНЛЗ Первоуральского новотрубного завода добиться равномерного охлаждения в кристаллизаторе для заготовок диаметром 550 мм, где регулировочные болты отводили от гильзы всего на 0,4 – 0,5 мм, приводило к нарушению поверхности гильзы болтами и искажению её формы, что, в свою очередь, приводило к неравномерности толщины корки слитка на выходе из кристаллизатора (рисунки 4.39 и 4.40). Подобные явления также обнаружили и на МНЛЗ ряда других заводов.

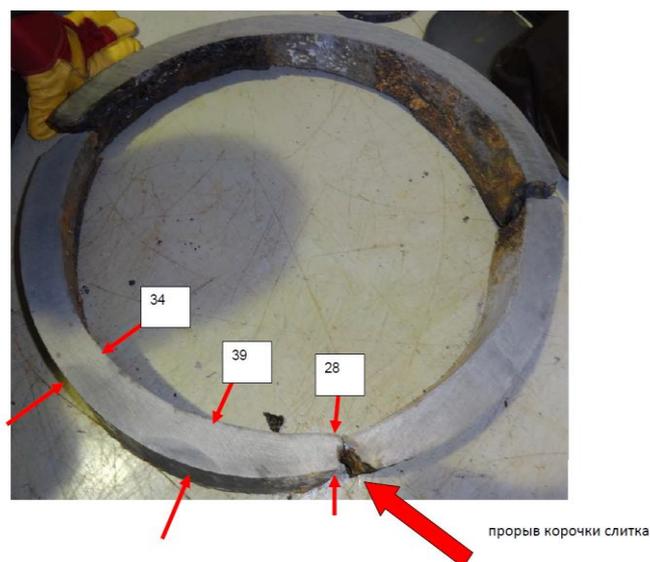


Рисунок 4.39 – Образец от «чулка» заготовки диаметром 550 мм в зоне прорыва [368]



Рисунок 4.40 – «Чулок» в зоне прорыва круглой заготовки [369].  
Хорошо видно, что там, где регулировочные болты прижимали гильзу к слитку, его корка толще, а в промежутках между болтами, корка слитка примерно в 1,5–2 раза тоньше

На основании изложенного, а также, принимая во внимание, что практически все современные МНЛЗ для литья сортовых, блюмовых и круглых заготовок оснащены гильзовыми кристаллизаторами, создание конструкции кристаллизатора, в котором зазор между гильзой и рубашкой охлаждения,

предназначенный для прохода воды, формируется с высокой степени точности, обеспечивающей равномерный отвод тепла от стенок гильзы, и следовательно – получение равномерной по толщине корки затвердевающего слитка, является своевременной и актуальной задачей.

С целью устранения указанного недостатка в процессе исследований разработали новую конструкцию гильзового кристаллизатора, в котором зазор между гильзой и рубашкой охлаждения, предназначенный для прохода воды, формируется с высокой точностью, обеспечивающей равномерный отвод тепла от стенок гильзы, получение равномерной по толщине корки затвердевающего слитка, что обеспечивает получение заготовки, соответствующей требованиям, предъявляемым к его качественным показателям и геометрическим размерам.

Разработанный кристаллизатор – в варианте, предназначенном для 3-х ручьевой МНЛЗ метзавода «ТМК-Решица» (Румыния) – показан на рисунках 4.41 и 4.42.

Расчёты показывают, что разница тепловых потоков из-за несоосности в существующих кристаллизаторах может составлять при литье заготовок диаметром 600 и 550 мм: 30–40 и 25–35 % соответственно, при литье заготовок сечением 300x400 мм: 13–23 %.

В разработанной конструкции гильзового кристаллизатора уменьшены отклонения от заданных значений размеры канала охлаждения по всему периметру его поперечного сечения, что практически исключает разностенность корки заготовки на выходе из кристаллизатора, что, в свою очередь, исключает образование трещин термического происхождения, вызываемых искажением профиля слитка (при недопустимых значениях овальности круглых слитков или ромбичности прямоугольных).

Во вновь разработанном кристаллизаторе, независимо от формата отливаемой заготовки, нарушение осесимметричного расположения рубашки относительно гильзы находится в пределах 0,03–0,10 мм, т.е. в пять раз меньше, чем для традиционных сортовых кристаллизаторов для заготовки 125x125 мм и



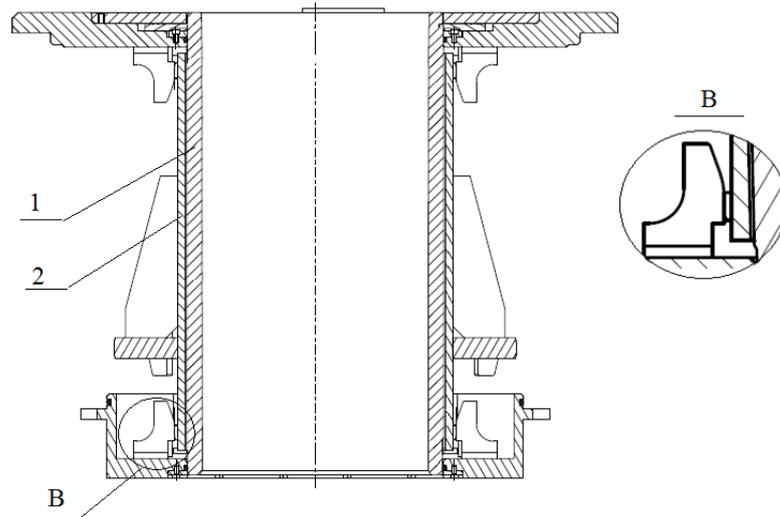


Рисунок 4.42 – Кристаллизатор 340x380 мм – центральная часть: 1 – гильза;  
2 – рубашка охлаждения

в 10–15 раз меньше, чем для традиционных крупноформатных блюмовых и крупнозаготовочных кристаллизаторов.

Достигнутый эффект объясняется тем, что поверхность в верхней и нижней крышках вновь разработанного кристаллизатора, центрирующая и гильзу и рубашку охлаждения, расположена на одной и той же детали, что гарантированно делает их соосными в пределах, указанных выше, при этом поверхность гильзы и внутренняя поверхность рубашки, образующие канал для прохождения воды, выполняют соосными с поверхностями, на которых рубашку и гильзу центрируют в обеих крышках. Следует учитывать, что гильза и в верхней и в нижней крышках центрируется с помощью кольцевого тонко откалиброванного уплотнения, изготовленного из термостойкого упругого материала, рассчитанного на контакт с гильзой, температура наружной поверхности которой может достигать 220–250 °С. Необходимо отметить, что для достижения указанных в новой конструкции кристаллизатора результатов, требуется соосное исполнение внутренней (рабочей) и наружной поверхностей гильзы, т.е. применение гильз с разнотолщиной стенок не допускается. Для этого центрируемые наружные поверхности гильзы – и в верхней и в нижней частях гильзы – необходимо обрабатывать на станках с целью

ликвидации их несоосности с соответствующими (рабочими) поверхностями гильзы.

Новая конструкция кристаллизатора, разработана по контракту с металлургическим заводом «ТМК-Решица (Румыния) № 126/000/04-АХК от 15.06.2018 г., акт приема-передачи от 28.12.2018 г. (Приложение 5) и защищена патентом Российской Федерации [370].

#### **4.6. Общие принципы конструирования систем электромагнитного перемешивания**

На основании анализа состояния работ по созданию оборудования электромагнитного перемешивания, рассмотренного в настоящей работе, сформулировали основные принципы конструирования систем ЭМП для сортовых и блюмовых МНЛЗ, обеспечивающих разработку оптимальных конструкторско-компоновочных решений.

Перед началом проектирования производят анализ дефектов заготовок, сопутствующих данной МНЛЗ. Как уже было сказано ранее, максимальное воздействие на качество НЛЗ оказывает ЭМП в кристаллизаторе. Поэтому, в случае выбора единственной системы, наиболее рациональной будет ЭМП в кристаллизаторе. При этом следует учитывать, что при производстве заготовок большого сечения, а также – заготовок из высокоуглеродистых и высоколегированных марок стали, имеющих протяженную двухфазную зону, следует применять ЭМП на двух уровнях – в кристаллизаторе и в зоне вторичного охлаждения (зоне окончания затвердевания). В случае применения статоров с бегущим магнитным полем в месте установки статора требуется размещение роликовых секций с роликами из немагнитной стали. Для создания более протяженной зоны перемешивания индукторы размещают с противоположных граней заготовки со смещением относительно друг друга вдоль технологической линии машины на величину, равную двум длинам индуктора, при этом направление бегущего электромагнитного поля верхнего индуктора совпадает с

направлением вытягивания непрерывнолитой заготовки, а направление бегущего электромагнитного поля нижнего индуктора противоположно направлению движения заготовки [349]. Однако этот способ ведет к существенному увеличению капитальных и текущих затрат.

Для системы электромагнитного перемешивания в зоне вторичного охлаждения (в зоне окончания затвердевания) необходимо предусмотреть возможность перемещения устройства ЭМП вдоль технологической линии МНЛЗ в зависимости от сортамента и особенностей технологии разлива. Устройство ЭМП в ЗОЗ наиболее эффективно работают на тех участках зоны вторичного охлаждения МНЛЗ, где соотношение жидкой и твердой фаз находится в интервале 0,3–0,5, а в МПНЛЗ – на движущихся каретках в интервале 0,2–0,4.

При окончательном выборе системы ЭМП и количества устройств в технологической линии МНЛЗ принимаются во внимание особенности конструкции машины, а также – многообразие размерного и марочного ассортиментов производимых заготовок.

При выборе системы ЭМП в кристаллизаторе для снижения стоимости её производства и эксплуатационных затрат следует определить наиболее рациональную конструкцию разрабатываемого устройства. Критерии отбора систем ЭМП в кристаллизаторе для разных МНЛЗ, которые приведены на рисунке 4.43.

Основными критериями выбора конструкции ЭМП в кристаллизаторе являются:

- материал корпуса и особенности конструкция кристаллизатора;
- межосевое расстояние между ручьями;
- существующие ограничения в энергопотреблении;
- разнообразие размерного ассортимента производимых заготовок;
- материал и толщина стенки гильзы кристаллизатора;
- максимальный формат производимых заготовок;
- необходимое количество катушек электромагнитного перемешивания.



Рисунок 4.43 – Критерии выбора системы ЭМП в кристаллизаторе

Для всех систем ЭМП в кристаллизаторе с целью уменьшения экранирующего действия гильзы и рубашки охлаждения на магнитное поле следует стремиться к уменьшению толщины стенок медной гильзы, а при литье заготовок большого формата – для их изготовления использовать материал «ELBRODUR® GR» (таблица 1.1), имеющий меньшую электрическую проводимость и, следовательно, более высокую проницаемость для магнитного поля статора при одновременном сохранении механических свойств. При этом рубашки охлаждения при любой конструкции ЭМП в кристаллизаторе выполняют из немагнитной нержавеющей стали.

Для ЭМП, встроенного в кристаллизаторе возможно применение корпусов из ферромагнитной стали, а для ЭМП наружного исполнения используют корпуса статора и кристаллизатора только из аустенитной нержавеющей стали. Корпуса статоров ЭМП в ЗВО (ЗОЗ) проектируют также из нержавеющей стали, поскольку работают в крайне агрессивной среде.

При встраивании ЭМП в существующий корпус кристаллизатора из углеродистой стали при разливке заготовок небольшого сечения возможно использовать корпус кристаллизатора в качестве ярма магнитопровода статора. При этом следует учитывать, что переход на шихтованный магнитопровод, по нашим расчетам, дает увеличение магнитного поля в заготовке на 15%

При межосевом расстоянии между ручьями МНЛЗ менее 800 мм следует применять только встроенное ЭМП в кристаллизаторе с установкой статора как можно дальше от мениска металла кристаллизатора.

Для снижения текущих эксплуатационных и капитальных затрат систем ЭМП в кристаллизаторе встроенного или наружного исполнения обмотки статора выполняются с двойной изоляцией. Полюса ЭМП (встроенного или наружного исполнения) охлаждаются водой кристаллизатора, а при ЭМП в ЗВО (ЗОЗ) – технической водой для охлаждения оборудования, прошедшей очистку от ферромагнитных частиц. Конструкция обмоток полюсов статоров должна предусматривать послойное охлаждение витков обмотки водой кристаллизатора или технической водой. Для снижения энергопотребления следует применять

систему ЭМП в кристаллизаторе встроенного исполнения, так как она расходует электроэнергию в 1,5-2,0 раза меньше, чем наружное ЭМП (в силу более близкого расположения к жидкой фазе заготовки).

При определении количества фаз статора ЭМП, встроенного в кристаллизатор, следует исходить из возможности конструктивного размещения статора в корпусе кристаллизатора, а также максимального формата производимых заготовок:

- как показал опыт, двухфазный статор рационально применять для заготовок сечением до 150x150 мм;
- трехфазный статор – для заготовок сечением более 150x150 мм.

Для ЭМП в зоне вторичного охлаждения или зоне окончания затвердевания применяются статоры трехфазного исполнения, поскольку ограничения в привязке корпусов таких статоров ЭМП к месту установки на ручье незначительны.

При невозможности отдалить статор от мениска в кристаллизаторе при встроенном ЭМП или использовании гильзы длиной 700 мм и менее – применяют двухуровневую систему электромагнитного воздействия с электромагнитным тормозом в районе мениска и ЭМП в нижней части кристаллизатора.

Для повышения надёжности и ремонтпригодности следует применять конструкции систем ЭМП с отдельными полюсами, так как при выходе из строя одного из них, не требуется демонтаж остальных полюсов. В этом случае заменяют поврежденный полюс новым или заново выполняют намотку водопогружного провода непосредственно на полюс. Возможность разборки конструкции корпуса и демонтажа (монтажа) статора ЭМП в кристаллизаторе наружного исполнения или в ЗВО (ЗОЗ) также является важным фактором надёжности и ремонтпригодности, так как позволяет производить профилактические регламентные или ремонтные работы в электроцехе (ремонтном цехе) завода.

Для достижения максимальной унификации и стандартизации применяются ранее разработанные и опробованные на различных заводах технологии и конструкции обмоток статоров, магнитопроводов статоров катушки, статоры, а также подобные системы управления и энергопитания.

Для исключения разностенности корки слитка на выходе из кристаллизатора и трещин термического происхождения следует применять конструкцию гильзовых кристаллизаторов, практически исключающих отклонения от заданных значений размеров канала охлаждения по всему периметру его поперечного сечения.

В таблице 4.8 представлены характеристики систем электромагнитного перемешивания для сортовых и блюмовых МНЛЗ, разработанных на основе общих принципов конструирования, рассмотренных в данном разделе.

Таблица 4.8 – Характеристики систем электромагнитного перемешивания для сортовых и блюмовых МНЛЗ

№ п/п	Завод, город, страна	Тип МНЛЗ	Сечение заготовок, мм	Марки стали, разлив. с ЭМП	Характеристики системы ЭМП										Основн. влияние на качество НЛЗ
					Место установки	Материал корпуса	Мощность статора активная, макс., кВт	Статор				Режимы ЭМП		Состояние	
								Кол-во фаз, шт.	Кол-во полюсов всего, шт.	Тип магнитопровода	Охладитель	Ток фазы, А	Частота, Гц		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1.	«ММЗ», Рыбница, Молдова	Рад.	125x125	Высокоуглер., в т. ч. кордов. и пружин.	Встроена в кристал.	Углер. сталь	25	2	4	Нешихт.	Вода кристал.	150-200	5–10	В пром. экспл. с 2001 г.	Макс. балл по центр. порист. сокращ. с балла 4,0 до 2,5
2.	«ТМК-Решица», Решица, Румыния	Крив .	Диам. 177-350	Трубные, в т. ч. углерод, низколег.	Встроена в кристал.	Углер. сталь	84	3	6	Шихтов.	Вода кристал.	100-250	0,5–5	Разработана.	н/д
3.	«Baku Steel Company», Баку, Азербайджан	Рад.	Диам. 130-220	Трубные, в т. ч. углерод, низколег.	Встроена в кристал.	Углер. сталь	ЭМП - 84	3	6	Шихтов.	Вода кристал.	150-250	0,5–10	Разработана.	н/д
							ЭМТ - 15	-	4	Нешихт.		100-250			

## Продолжение таблицы 4.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
4.	«ВТЗ», Волжский, Россия	Крив.	Диам. 150-410	Трубные, в т. ч. углерод, низколег.	Снаружи кристал.	Нерж. сталь	190	3	12	Шихтов.	Вода кристал.	100- 250	1-5	Пром. испыт.	н/д
5.	«ОЭМК», Старый Оскол, Россия	Рад.	300x360	Высоко- углерод., в т. ч. подшип.	Встроена в кристал.	Углер. сталь	45	3	6	Нешихт.	Вода кристал.	100- 150	1-7	Прошли опытно- пром. испыт.	Макс. балл подусадочной ликвации сниз. с 5,0 до 2,0 балла
					10,5 м от мениска в кристал.	Нерж. сталь	46	3	6	Шихтов.	Вода для оборуд.	100- 200	1-10		
6.	«ИОМЗ», Ижевск, Россия	Гориз.	Диам. 80-120	Высоко- легир.	Встроена в кристал.	Углер. сталь	25	2	4	Шихтов.	Вода кристал.	150- 250	5-15	Пром. испыт.	Осевая порист. уменьш. до средн. балла 1,0-1,8
7.	«МЗ Электро- сталь», Электро- сталь, Россия	Полу- непр., верт.	Диам. 250-360	Высоко- легир.	Встроена в кристал.	Углер. сталь	45	3	6	Шихтов.	Вода кристал.	100- 225	1,5-3	В пром. эксплуат. с 2009 г.	Балл по центральной пористости и осевой ликвации снижается с балла 1,5- 2,5 до балла 0,5-1,0
					303	Нерж. сталь	65	3	6	Шихтов.	Вода для оборуд.	150- 225	5-8		

## Выводы по главе 4

1. Разработаны следующие конструкции устройств ЭМП, встроенных в кристаллизатор, в которых полюса охлаждаются его водой, обмотки выполнены из водопогружного провода с двойной изоляцией, а корпус кристаллизатора из магнитной стали:

– конструкция двухфазной четырехполюсной системы для промышленной сортовой МНЛЗ Молдавского метзавода, производящей заготовки 125x125 мм из высокоуглеродистых марок стали, в том числе кордовых и пружинных. В качестве ярма магнитопровода статора использовали корпус кристаллизатора;

– конструкция двухфазной четырехполюсной, с шихтованным магнитопроводом системы для промышленной горизонтальной МНЛЗ завода «ИОМЗ», производящей круглые заготовки диаметром от 80 до 120 мм из высоколегированных, в том числе нержавеющей марок стали;

– конструкция системы двухуровневого электромагнитного воздействия для промышленной сортовой МНЛЗ завода «Баку Стил Компани», производящей круглые трубные заготовки диаметром от 130 до 220 мм, которая обеспечивает независимое управление потоками стали в районе мениска ЭМТ постоянного тока и трехфазным шестиполюсным статором ЭМП в нижней части кристаллизатора. Конструкцию двухуровневой системы ЭМТ и ЭМП в кристаллизаторах МНЛЗ необходимо использовать при невозможности отдаления статора от мениска на требуемое расстояние.

2. Разработана конструкция трехфазной (по два полюса на фазу) системы ЭМП на двух уровнях (в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания) промышленной блюмовой МНЛЗ «ОЭМК», производящей заготовки сечением 300x360 мм из подшипниковых марок стали. Статор ЭМП в кристаллизаторе охлаждается водой кристаллизатора, в зоне окончания затвердевания – технической водой для охлаждения оборудования. В качестве ярма магнитопровода статора использовали корпус кристаллизатора из магнитной

стали. В корпус системы ЭМП для ЗОЗ из аустенитной нержавеющей стали установили шихтованный магнитопровод статора-вращателя.

3. Разработана конструкция трехфазной (по четыре полюса на фазу) системы ЭМП в кристаллизаторе наружного исполнения для промышленной блюмовой МНЛЗ, производящей трубные заготовки диаметром от 150 до 410 мм, в которых впервые применили воду кристаллизатора для охлаждения обмотки. Система ЭМП с шихтованным магнитопроводом в корпусе из нержавеющей стали полностью изготовлена из отечественных материалов, имеют разборную конструкцию, ремонтпригодную в условиях металлургического завода, имеющую возможность установки её на существующие посадочные места.

4. Разработана конструкция трехфазной шестиполюсной системы ЭМП в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания промышленной МПНЛЗ завода «Электросталь», производящей круглые заготовки диаметром 250 и 360 мм из высоколегированных марок стали. Статоры ЭМП в ЗОЗ расположены на движущихся каретках. В системе ЭМП впервые статоры водопогружного типа с шихтованным магнитопроводом, встроенные в корпус кристаллизатора из ферромагнитной стали, охлаждаются водой кристаллизатора, а корпус статора в ЗОЗ – водой для охлаждения каретки.

5. В разработанных системах электромагнитного перемешивания использована оригинальная конструкция обмоток полюсов статоров из водопогружного провода, разработанного ВНИИ кабельной промышленности по заданию ВНИИМЕТМАШ. Конструкция обмоток полюсов статоров отличается тем, что предусмотрено наружное охлаждение каждого витка обмотки водой кристаллизатора, в отличие от аналогов, изготовленных из медных трубок или сплошных полюсов, охлаждаемых специально подготовленной деминерализованной водой.

6. При создании системы ЭМП в кристаллизаторе разработали на уровне изобретения конструкцию гильзовых кристаллизаторов МНЛЗ, позволяющую более чем на порядок уменьшить отклонения от заданных значений размеров канала охлаждения по всему периметру его поперечного сечения, что практически

исключает разностенность корки слитка на выходе из кристаллизатора и образование трещин термического происхождения.

7. Разработаны общие принципы конструирования систем ЭМП для сортовых и блюмовых машин непрерывного литья заготовок, которые использовали при создании устройств электромагнитного перемешивания для МНЛЗ заводов: Молдавского металлургического, Ижевского опытно-механического, Волжского трубного, металлургического «Электросталь», «Ваку Steel Company» и Оскольского электрометаллургического комбината. В число основных принципов входят выбор системы ЭМП, определение конструкции устройства системы, выбор конструкции гильзового кристаллизатора, выбор материала корпуса устройства, определение конструкции обмоток статора и системы его охлаждения, ремонтпригодность устройства.

## **ГЛАВА 5. ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ**

### **5.1 Электромагнитное перемешивание в кристаллизаторах радиальных МНЛЗ**

Металлургический эффект ЭМП в кристаллизаторе зависит от линейной скорости движения расплава. Принято считать, что при линейной скорости менее 0,3 м/с эффективность применения электромагнитного перемешивания резко снижается; при скорости более 1,0 м/с появляются отрицательные металлургические эффекты в виде «белой полосы» (отрицательной ликвации) и пор вдоль фронта кристаллизации. Двумя наиболее важными параметрами изменения линейной скорости потока расплава являются ток фазы и частота питающего тока.

В процессе испытаний на радиальной МНЛЗ-1 Молдавского метзавода разлили 69 плавов из стали марок СтЗсп и 28С с использованием ЭМП в кристаллизаторе при 6 различных режимах перемешивания. Максимальная расчётная линейная скорость потоков расплава при токе фазы 130 А и частоте питающего тока 3 Гц разработанной системы ЭМП составляла 0,39 м/с.

В ходе проведения испытаний опытной системы ЭМП в кристаллизаторе решали задачи:

- влияние электромагнитного перемешивания на качество заготовок и сортового проката из низко- и среднеуглеродистых марок стали;
- определение рациональных режимов ЭМП.

В процессе исследований проведена сравнительная оценка качества сортовых заготовок с ЭМП и контрольных, произведенных по действующей на Молдавском метзаводе технологии, используя при этом следующие методики исследований:

- отбор поперечных и продольных темплетов;

- выявление макроструктуры способом снятия серного отпечатка и методом глубокого травления;
- выявление качества поверхности методом глубокого травления;
- оценка дефектов поверхности и макроструктуры заготовок по ОСТ-14-4-72 и ОСТ-14-1-235-91, а также определение протяжённости структурных зон, количества и размеров пор, количества и размеров растратов по неметаллическим включениям;
- оценка дефектов микроструктуры катанки по ГОСТ 5640-68, ГОСТ 5639-82, ГОСТ 8233-56;
- оценка дефектов макроструктуры катанки и проката по ГОСТ 10243-75;
- химический анализ ликвации углерода по сечению литого металла и проката;
- металлографический анализ катанки по ГОСТ 5640-68, ГОСТ 5639-82, ГОСТ 8233-56.

Кроме того, вели визуальное наблюдение за мениском в кристаллизаторе. При фазном токе 140 А установили вращение мениска, причём при частоте питающего тока 7 Гц движение было наиболее интенсивное. Однако вращательное движение было неустойчиво. На основании визуального наблюдения сделали вывод, что восходящие потоки от струи стального расплава разрушали стабильное вращательное движение на мениске. После проведенного анализа предположили, что для подавления восходящих потоков от струи металла требовалось увеличить интенсивность перемешивания за счёт повышения фазного тока. Сравнительный анализ результатов оценки качества поверхности и макроструктуры НЛЗ показал, что при режимах перемешивания ток фазы 80 А, частота 5 Гц и 100 А, частота 3 Гц улучшения качества НЛЗ не происходит. Это совпало с оценкой визуального наблюдения за мениском в кристаллизаторе. Улучшение качества поверхности и подповерхностного слоя заготовок, а также макроструктуры установили при режиме перемешивания тока фазы 140 А и частоты 7 Гц. На основании результатов металлографических исследований установлено, что при использовании ЭМП в

кристаллизаторах улучшились все качественные показатели НЛЗ (рисунки 5.1–5.3) [371].

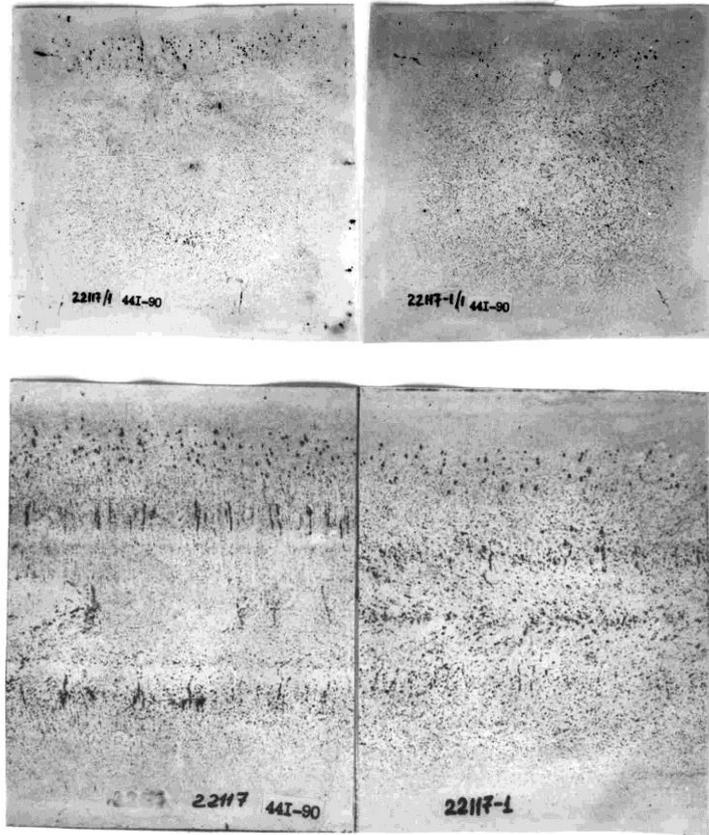


Рисунок 5.1 – Серые отпечатки поперечных (сверху) и продольных (снизу) темплетов заготовок из стали Ст3сп: слева без ЭМП, справа с ЭМП (ток фазы 140 А, частота тока 7 Гц)

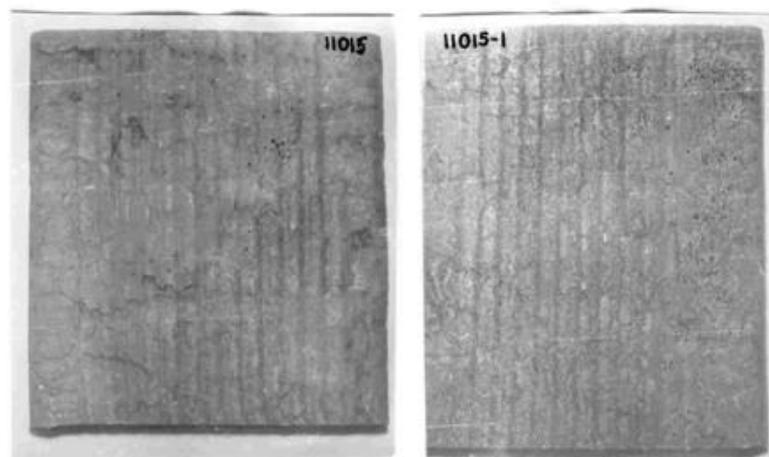


Рисунок 5.2 – Темплеты поверхности заготовок из стали Ст3сп: слева без ЭМП, справа с ЭМП (ток фазы 140 А, частота 7 Гц)

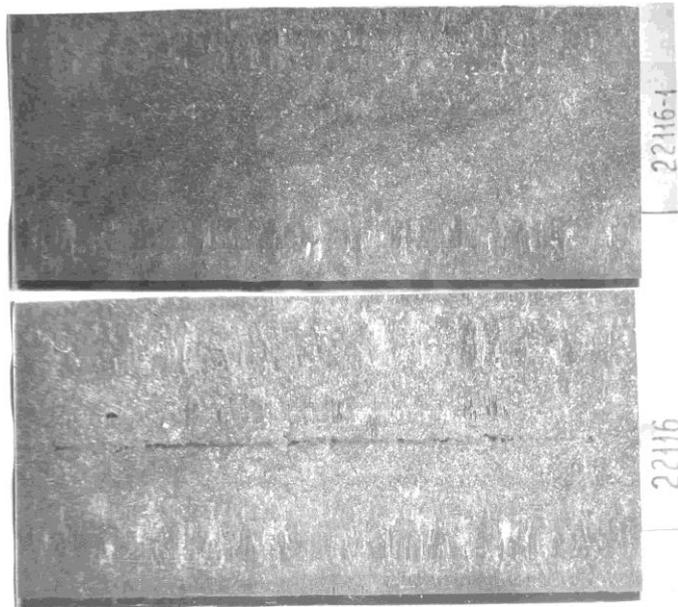


Рисунок 5.3 – Продольные темплеты заготовок из стали Ст3сп: сверху с ЭМП (ток фазы 140 А, частота 7 Гц); снизу – без ЭМП

Баллы по точечной неоднородности уменьшились на один балл, а максимальный балл снизился с 4,0 до 2,0. При этом толщина подповерхностного слоя чистого от неметаллических включений металла увеличилась с 7–8 мм в серийных заготовках до 14–15 мм в заготовках с ЭМП. В 1,5–2 раза снизились баллы и количество подкоркового пузыря, а также – максимальные диаметр пузыря и глубина его залегания – в 2–2,5 раза; одновременно с этим в 2–2,5 раза возросло количество поверхностного пузыря (рисунок 5.2). При нагреве заготовок перед прокаткой поверхностный пузырь практически весь удалился с окалиной.

Средний балл по центральной пористости при оценке поперечных темплетов уменьшился с балла 2,5 до 1,5, при существенно меньшем диапазоне значений. На продольных темплетах заготовок, отлитых по традиционной технологии, в осевой зоне отметили явно выраженную шнуровую ликвацию и следы «мини-слитков». Осевая зона в заготовках с ЭМП по всей длине темплета более плотная, отсутствовали усадочные раковины, шнуровая ликвация преобразовалась в намечающуюся V-образную ликвацию, что характерно для металла, отлитого с низким перегревом. С целью оценки воздействия электромагнитного

перемешивания в кристаллизаторах на качество проката разлили 19 плавков из рядовых марок стали при следующих режимах перемешивания: ток фазы 160–200 А и частота 7 Гц. Из опытной партии заготовок изготовили катанку диаметром 6 мм. По результатам исследований установлено, что средний выход катанки класса "П" (ТУ-14-15-212-89 на технические условия для катанки из низкоуглеродистой стали для дальнейшей перетяжки – волочения) из заготовок с ЭМП составил 92,2 %. Из 8 плавков без поверхностного пузыря, разлитых при режиме ЭМП: ток фазы 200 А и частота 7 Гц, на 7 плавках выход проволоки класса "П" составил 100 %. Средний выход катанки класса "П" при таком режиме ЭМП составил 99,6 %. Из 8 плавков, разлитых с ЭМП при токе фазы 160-170 А и частоте тока 7 Гц, на 50 % плавков выход катанки класса "П" составил 100 %. Средний выход катанки класса "П" на этом режиме – 96 %, на серийном металле этих же плавков – 77,6 % [372].

Результатами исследований первого этапа доказано улучшение качества непрерывно-литых заготовок и проката из низкоуглеродистых марок стали за счет применения системы электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе. Изучение влияния режимов ЭМП на качество поверхности и макроструктуры непрерывных заготовок показало, что увеличение фазного тока статоров, ведущее к возрастанию интенсивности перемешивания, усиливает положительный эффект ЭМП на качество заготовок.

В ходе исследования опытно-промышленных кристаллизаторов с ЭМП с гильзой длиной 1000 мм решали задачи:

- влияние ЭМП на качество макроструктуры заготовок разных групп марок стали;
- влияние ЭМП на микроструктуру высокоуглеродистого сортового проката;
- выявление рациональных режимов ЭМП.

В процессе исследований опробовали 8 режимов электромагнитного перемешивания. Разлили 43 плавки с ЭМП в кристаллизаторах, в том числе 24 плавки высокоуглеродистых марок стали, 11 плавков среднеуглеродистых марок стали и 8 плавков низкоуглеродистых марок стали. Во время исследований для

оценки качества поверхности и макроструктуры литых заготовок отобрали 111 опытных и контрольных темплетов.

В результате металлографических исследований темплетов из опытного и серийного металла установлено следующее влияние ЭМП в кристаллизаторе на качество макроструктуры сортовых заготовок [373]:

– уменьшение среднего балла по трещинам и ликвационным полоскам по сечению заготовок по сравнению с контрольными:

– высокоуглеродистые марки стали с 0,7 до 0,3;

– среднеуглеродистые марки стали с 2,1 до 0,5;

– низкоуглеродистые марки стали с 0,7 до 0,5;

– уменьшение среднего балла по трещинам в осевой зоне слитка по сравнению с контрольными:

– высокоуглеродистые марки стали с 0,6 до 0,4;

– среднеуглеродистые марки стали с 1,4 до 0,5;

– низкоуглеродистые марки стали с 2,1 до 1,9;

– снижение среднего балла по центральной пористости по сравнению с контрольными:

– высокоуглеродистые марки стали с 2,6 до 2,3;

– среднеуглеродистые марки стали с 2,3 до 2,1;

– уменьшение среднего балла по краевым точечным загрязнениям по сравнению с контрольными:

– высокоуглеродистые марки стали с 1,1 до 1,0;

– среднеуглеродистые марки стали с 3,0 до 2,4;

– низкоуглеродистые марки стали с 2,3 до 2,1.

Следует отметить, что в заготовках с ЭМП было получено более однородное распределение неметаллических включений по малому радиусу НЛЗ.

По результатам исследований установлено, что при данной конструкции системы электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе воздействие ЭМП приводит к возрастанию балла по осевой ликвации, которая стала более рассредоточенной.

С целью установления влияния ЭМП в кристаллизаторах сортовых МНЛЗ на величину осевой ликвации углерода, провели исследование содержания углерода в поперечных темплетях НЛЗ двух плавок стали марки 70, отобранных от ручья с ЭМП и контрольного. По результатам испытаний установили, что применение ЭМП в кристаллизаторах привело к уменьшению коэффициента осевой ликвации углерода в высокоуглеродистых марках стали с 1,09 до 1,04 (плавка №201013) и с 1,05 до 1,02 (плавка №201012).

На основании проведенных экспериментов выявлено значительное влияние применения ЭМП в кристаллизаторах на кристаллическую структуру опытных сортовых заготовок [374]. Установили, что структура всех исследованных темплетов состояла из трех зон: корковой мелкозернистой, столбчатых кристаллов и осевой – равноосных кристаллов. Корковая зона всех исследованных темплетов мелкозернистая, плотная, неоднородная по толщине. Установили увеличение толщины корковой зоны опытных темплетов, отлитых с ЭМП, по сравнению с контрольными. Зона равноосных кристаллов (ЗРК) темплетов с ЭМП высокоуглеродистых и среднеуглеродистых марок стали наиболее развита. Зоне равноосных кристаллов сопутствовала центральная пористость рассредоточенного характера в виде небольших пор, разбросанных по всему тепловому центру образцов и осевой ликвации в виде точек и пятен. На основании исследований отмечена симметричность этой зоны по отношению к оси заготовки.

Зона равноосных кристаллов темплетов без ЭМП из среднеуглеродистых и высокоуглеродистых марок стали была асимметрична по отношению к оси заготовки, и представляла собой грубые, беспорядочно рассредоточенные кристаллы.

Средние величины прироста зоны равноосных кристаллов на темплетях опытных заготовок (рисунок 5.4) по сравнению с контрольными составили [372, 375]:

- низкоуглеродистые марки стали – 92 %;
- среднеуглеродистые марки стали – 48 %;
- высокоуглеродистые марки стали – 55 %.

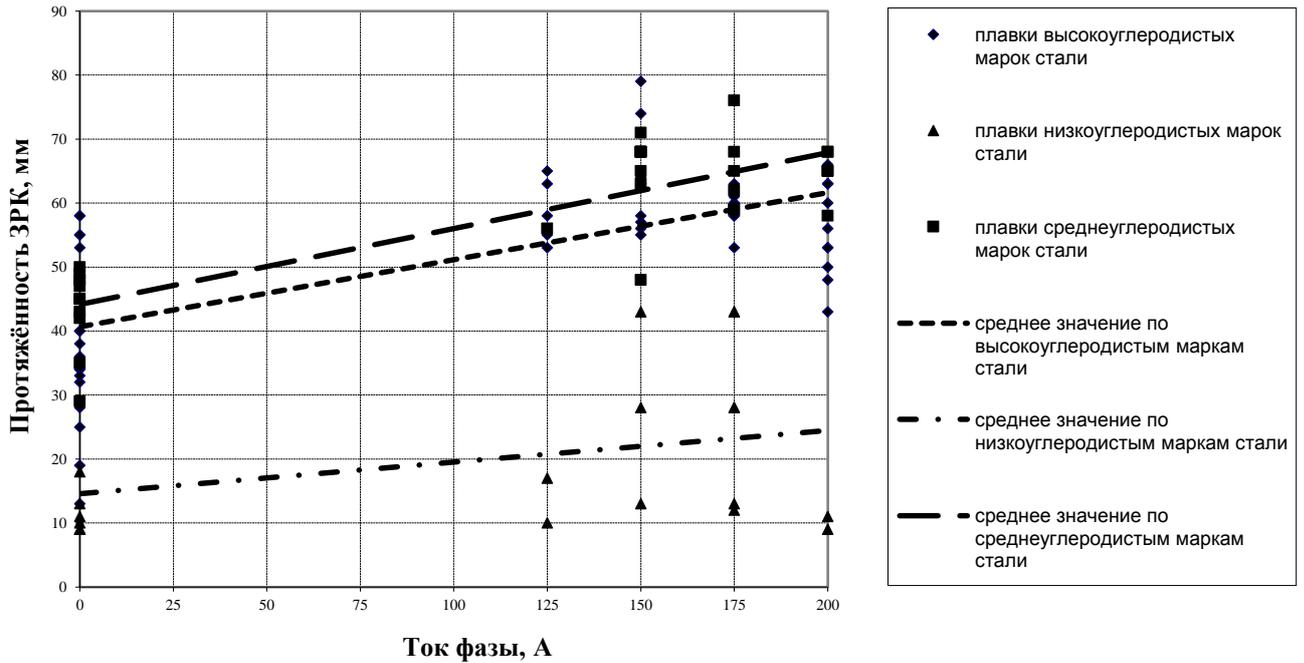


Рисунок 5.4 – Влияние режима электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе на протяжённость ЗРК углеродистых марок стали (одна точка соответствует одной плавке)

Степень развития подсадочной ликвации по ГОСТ 10243-75 в опытных образцах катанки диаметром от 5,5 до 6,0 мм, по сравнению с контрольными снизилась с 1,3 до 1,1 балла.

С целью изучения интенсивности электромагнитного перемешивания на величину ЗРК испытали 8 различных режимов ЭМП: ток фазы 125–200 А, частота тока 5–8 Гц.

Расчётные значения максимальной скорости потока при различных режимах электромагнитного перемешивания для данной опытной системы ЭМП (м/с) приведены в таблице 5.1 [375].

По результатам исследований влияния различных скоростей электромагнитного перемешивания на образование зоны равноосных кристаллов при разливке углеродистых и низколегированных марок стали установлено (таблица 5.2), что рациональная линейная скорость потока находится в интервале 0,55–0,70 м/с [376].

Таблица 5.1 – Расчётные значения максимальной скорости потока (м/с) при различных режимах ЭМП

Частота тока, Гц	Ток фазы, А				
	100	125	150	175	200
4	0,38	0,45	0,50	0,55	0,58
6	0,45	0,50	0,58	0,65	0,70
8	0,47	0,55	0,64	0,70	0,74

Таблица 5.2 – Результаты влияния скорости потока на величину зоны равноосных кристаллов (ЗРК)

Режим ЭМП в кристаллизаторе	Ток фазы, А	125		150		175		200	
	Частота, Гц	5	8	5	8	5	8	5	8
Скорость потока, м/с		0,50	0,55	0,58	0,64	0,65	0,70	0,70	0,74
Средняя величина ЗРК в высокоуглеродистых марках стали, мм		65	56	67	60	60	59	55	55
Средняя величина ЗРК в среднеуглеродистых марках стали, мм		56	–	69	65	56	68	63	66

По результатам исследования качества поверхности и макроструктуры НЛЗ установили, что повышение тока фазы статора до 150 А способствует увеличению положительного эффекта ЭМП на качество макроструктуры заготовок. Также определили, что изменение частоты питающего тока (в случае сохранения постоянной расходуемой мощности) не оказывает значительного влияния на качество заготовок. В результате проведённых исследований выявлен рациональный режим ЭМП для данной системы: ток фазы 150 А, частота тока 5 Гц.

В 2001 г. в процессе освоения промышленной системы ЭМП (рисунок 5.5) разлили 52 плавки при 4 режимах электромагнитного перемешивания, в том числе – 34 плавки высокоуглеродистых марок стали, включая пружинные и кордовые, 3 плавки среднеуглеродистых марок стали и 15 плавок низкоуглеродистых марок стали.



Рисунок 5.5 – Промышленная система ЭМП в кристаллизаторе

В ходе исследования решали задачи:

- влияние ЭМП на макроструктуру и кристаллическую структуру литого металла;
- влияние ЭМП на микроструктуру сортового проката из высокоуглеродистых марок стали;
- определение рациональных режимов ЭМП для высокоуглеродистых марок стали.

По результатам исследований 15 плавок высокоуглеродистых марок стали определили [342], что количество заготовок, отлитых с применением ЭМП в кристаллизаторах, с коэффициентом осевой ликвации углерода менее 1,1 составило 80 % от общего числа заготовок, а без ЭМП – 62%, в том числе для кордовых марок стали – 100 и 75 % соответственно. После изучения структуры заготовок, отлитых с ЭМП и по традиционной технологии, сделали вывод о явно выраженном

положительном влиянии ЭМП на кристаллическую структуру заготовок, в частности, из высокоуглеродистых марок стали.

Зона равноосных кристаллов у заготовок из высокоуглеродистых марок стали, отлитых с ЭМП, была наиболее развита и симметрична относительно оси заготовки [373]. Протяженность ЗРК у заготовок с ЭМП сечением 125x125 мм составила 28–57 мм, при среднем значении 44 мм или 35,2 % от стороны заготовки (рисунок 5.6).

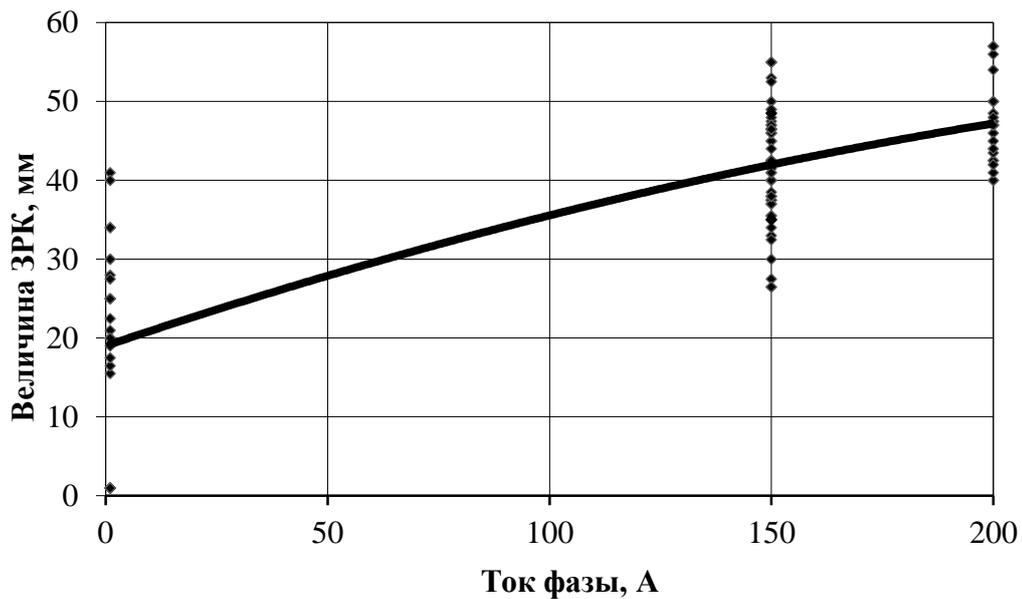


Рисунок 5.6 – Влияние режима электромагнитного перемешивания (частота тока 6,5 Гц) на кристаллическую структуру заготовок (одна точка соответствует одной плавке)

ЗРК темплетов заготовок, отлитых с ЭМП, по сравнению с контрольными в среднем увеличилась в 2,3 раза. Протяженность ЗРК в заготовках с ЭМП, отлитых в кристаллизаторах длиной 800 мм, была менее развита, чем в кристаллизаторах длиной 1000 мм. Это объяснили тем, что в первом случае верхняя кромка статора находится на расстоянии 225 мм от мениска в кристаллизаторе, а во втором – 445 мм [377]. При более низком расположении статора появлялась возможность использовать более интенсивное ЭМП без опасности вращения мениска. Это особенно опасно в случае разливки через погружные стаканы «под уровень» с использованием шлакообразующей смеси в кристаллизаторе, так как вращение

мениска может привести к затягиванию ШОС в расплав и ухудшить качество поверхности и макроструктуры.

По результатам исследований установлено, что для достижения лучших металлургических результатов и исключения интенсивного вращения мениска в кристаллизаторе, необходимо максимально удалить статор ЭМП от зеркала металла или применять торможение расплава в верхней части кристаллизатора [377].

В макроструктуре темплетов НЛЗ, отлитых с ЭМП (рисунок 5.7), определили рассредоточенную по всему тепловому центру образцов центральную пористость в виде пор размером не более одного миллиметра [378].

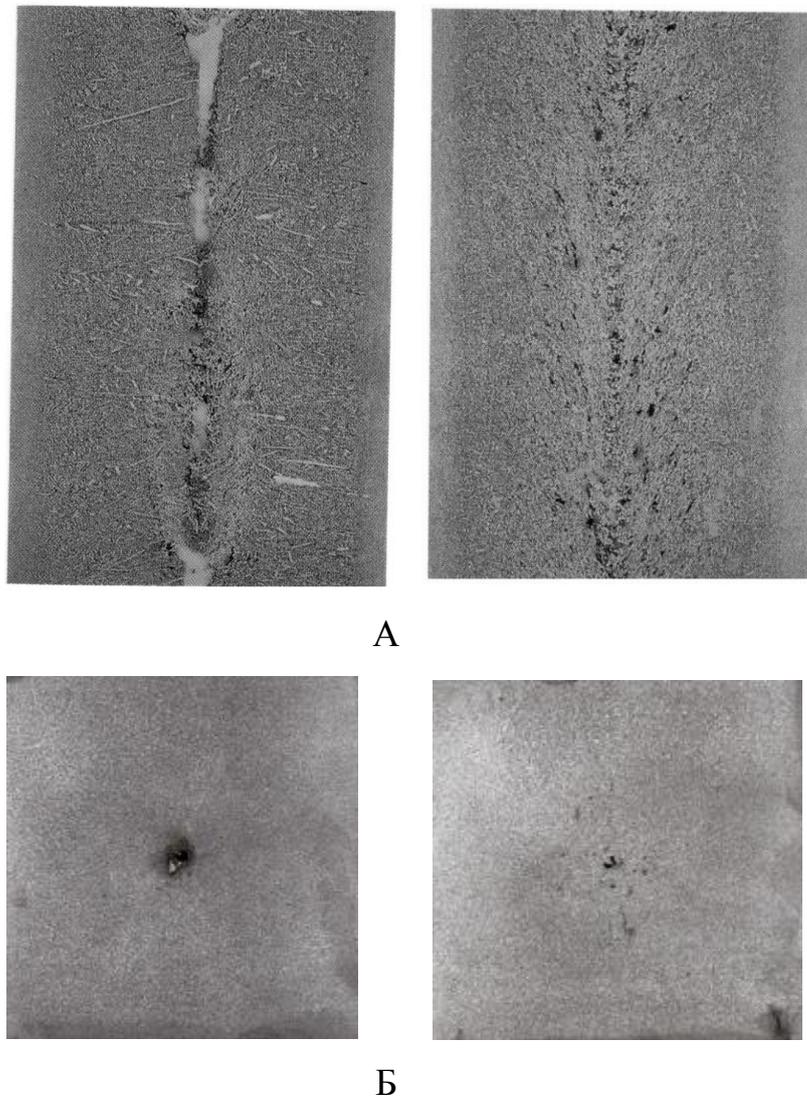


Рисунок 5.7 – Продольные (А) и поперечные (Б) темплеты заготовок из стали 70, разлитых с ЭМП (справа) и контрольный без ЭМП (слева)

После проведения металлографических исследований катанки, произведенной из заготовок с ЭМП и без ЭМП, установлено [379], что использование технологии ЭМП в кристаллизаторах при разливке сортовых заготовок повысило качество структуры катанки, что привело к улучшению технологической пластичности проката:

– ЭМП рассеивает ликвацию: ширина центральных ликвационных полосок увеличивается в 1,4 раза [379];

– с ЭМП протяжённость подусадочных ликвационных полосок меньше, в среднем – 0,158 вместо 0,223 мм без ЭМП;

– протяженность мартенситных участков в высокоуглеродистой катанке с ЭМП не превышает 20 микрон [380] (рисунок 5.8), что соответствует запросам потребителям кордового металла.

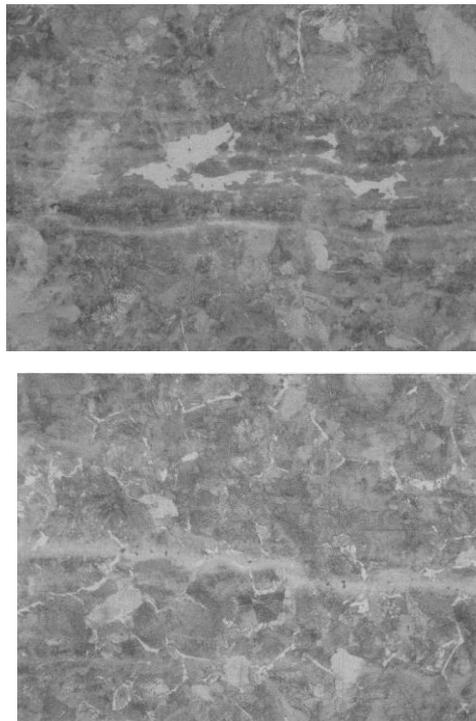


Рисунок 5.8 – Ликвационная полосчатость на продольных образцах катанки высокоуглеродистых марок стали  $\times 500$ : сверху – образец без ЭМП (мартенсит в центре ликвационной полосы); снизу – образец с ЭМП

На основании проведенных исследований для сортовой МНЛЗ установлен рациональный режим электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе при литье высокоуглеродистых марок стали – ток фазы 200 А, частота тока 6,5 Гц.

Следует отметить, что приведенные результаты были получены при различных режимах работы ЭМП и условиях разливки, в частности, разной величины перегрева металла над температурой ликвидус. В результате анализа полученных результатов установили, что при прочих равных условиях, с повышением перегрева разливаемого металла уменьшалась протяженность ЗРК, а влияние ЭМП на ЗРК снижалось, хотя влияние ЭМП было достаточно велико (рисунок 5.9) [381].

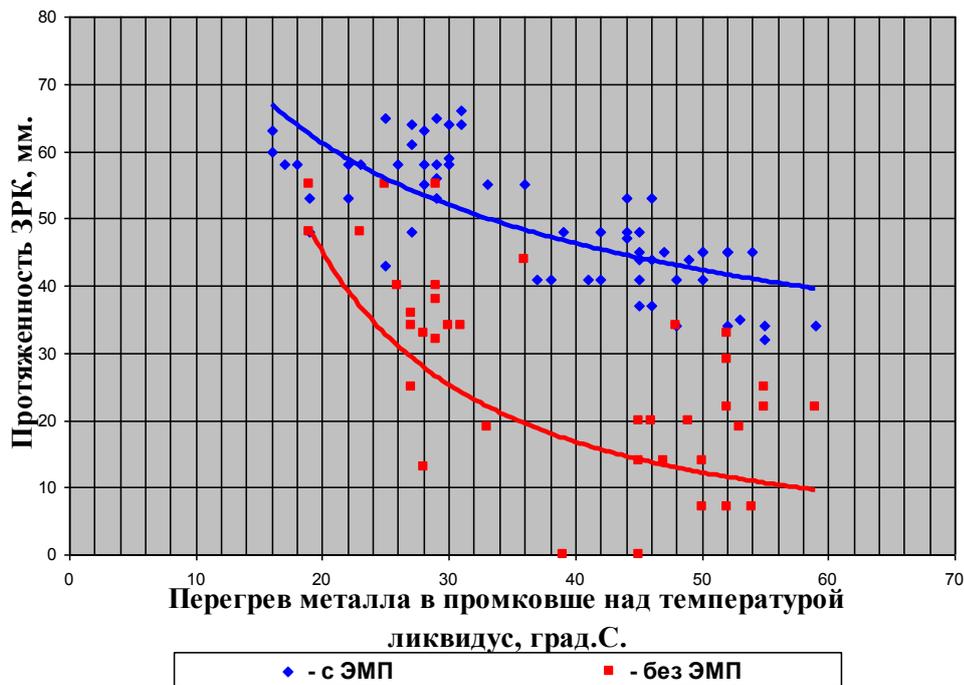


Рисунок 5.9 – Влияние величины перегрева металла над температурой ликвидус на протяженность зоны равноосных кристаллов при литье заготовок сечением 125x125 мм из высокоуглеродистых марок стали

На основании проведённых исследований были определены рациональная величина перегрева над температурой ликвидус при разливке высокоуглеродистых марок стали – 25–30 °С. При таком перегреве зона равноосных кристаллов в

заготовках, разлитых с применением системы ЭМП в кристаллизаторе, достигала 40 и более процентов от размера стороны заготовки.

Введение в эксплуатацию на сортовой МНЛЗ Молдавского метзавода системы ЭМП в кристаллизаторе (Приложение 6), впервые в СНГ и одними из первых в мире, позволило освоить технологию непрерывной разливки сортовых заготовок из высокоуглеродистых марок стали, в том числе кордовых и пружинных марок стали [381].

## **5.2. Электромагнитное перемешивание в кристаллизаторах горизонтальных МНЛЗ**

Промышленные испытания системы ЭМП в кристаллизаторе (рисунок 5.10) проводили на горизонтальной МНЛЗ Ижевского опытно-механического завода (рисунок 5.11).



Рисунок 5.10 – Кристаллизатор с ЭМП на горизонтальной МНЛЗ



Рисунок 5.11 – Разливка заготовок диаметром 80 мм из легированных марок стали с ЭМП в кристаллизаторе горизонтальной МНЛЗ

В ходе исследований разлили 62 плавки заготовок диаметром 80, 100, 120 мм из легированных, в том числе нержавеющей марки стали, при различных режимах ЭМП. Ток фазы изменяли от 100 до 200 А с шагом 25 А. Частоту тока изменяли в диапазоне 8–15 Гц. Значение частоты выбирали с учетом толщины стенки гильзы. При увеличении диаметра производимых заготовок применяли гильзы с более толстой стенкой, которая экранирует магнитное поле. Для преодоления этого выбрали режимы ЭМП с пониженной частотой тока. Для заготовок диаметром 80 мм частоту изменяли в диапазоне 13–15 Гц; диаметром 100 мм – 10–13 Гц и диаметром 120 мм – 8–12 Гц.

В ходе проведения испытаний решали задачи:

- влияние ЭМП на качество заготовок из высоколегированных марок стали;
- определение рациональных режимов ЭМП;
- разработка технологии непрерывного литья на ГМНЛЗ заготовок круглого сечения из высоколегированных марок стали с применением ЭМП в кристаллизаторе.

Специалисты завода «ИОМЗ» поставили задачу производить заготовки следующего качества:

- поверхность без наплывов, плён, трещин, пузырей, шлаковых включений, кроме случаев, когда данные дефекты могут быть устранены зачисткой глубиной не более 2 мм;
- центральная пористость заготовок не более 2 балла по ОСТ 14-1-235-91.

Особенностью разливки на горизонтальной МНЛЗ завода «ИОМЗ» является небольшой вес плавки (менее тонны) и конструкция самой ГМНЛЗ. В связи с этим, во избежание «замерзания» металла в металлопроводке промежуточную емкость заполняли сталью с большим перегревом над температурой ликвидус (до 110–120 °С). Чрезмерный перегрев приводил к образованию развитой центральной пористости и опасности возникновения прорывов из-за тонкой корки заготовок на выходе из кристаллизатора. На основании проведенных исследований установлено, что использование ЭМП в кристаллизаторе привело к увеличению

тепло – и массообмена между жидкой и твердой фазами заготовки и снятию избыточного перегрева.

По результатам металлографических исследований темплетов от заготовок легированных марок стали (рисунки 5.12–5.15) выявлено следующее влияние ЭМП в кристаллизаторе на качество макроструктуры НЛЗ:

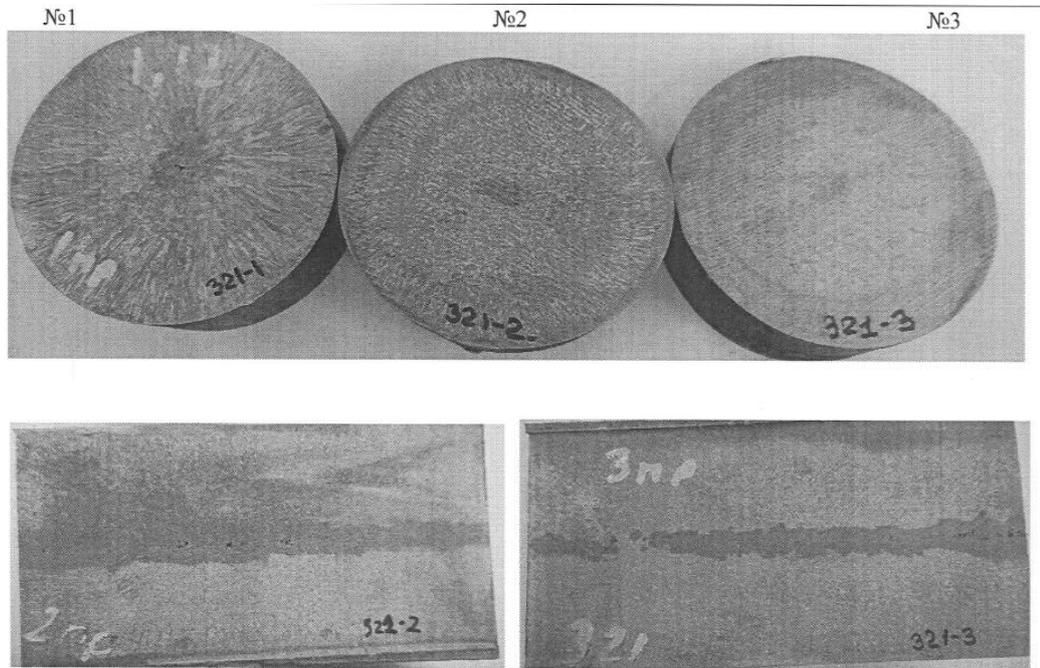


Рисунок 5.12 – Темплеты заготовки диаметром 80 мм из стали 05X16H4Д2Б с ЭМП в кристаллизаторе (сверху – поперечные, снизу – продольные), отобранные в начале (№1), середине (№2) и конце (№3) разливки.  
Режим ЭМП: ток фазы 150 А, частота 15 Гц

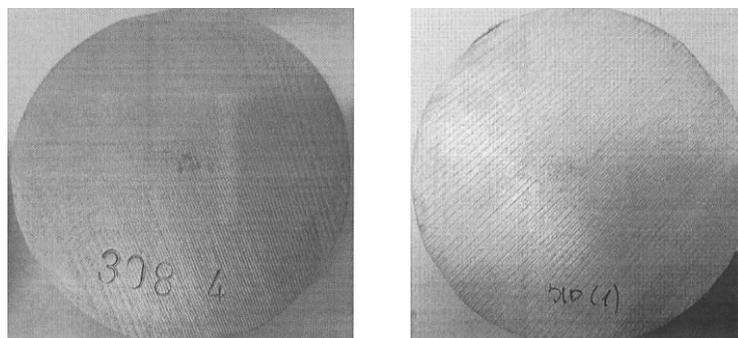


Рисунок 5.13 – Поперечный темплет заготовки диаметром 100 мм с ЭМП в кристаллизаторе из стали 12X18H10T (слева), 05X16H4Д2Б (справа)  
Режим ЭМП: ток фазы 150 А, частота 12 Гц



Рисунок 5.14 – Поперечные темплеты заготовок диаметром 120 мм из стали 12Х18Н10Т (слева), 05Х16Н4Д2Б (справа) с ЭМП в кристаллизаторе.

Режим ЭМП: ток фазы 150 А, частота 8 Гц

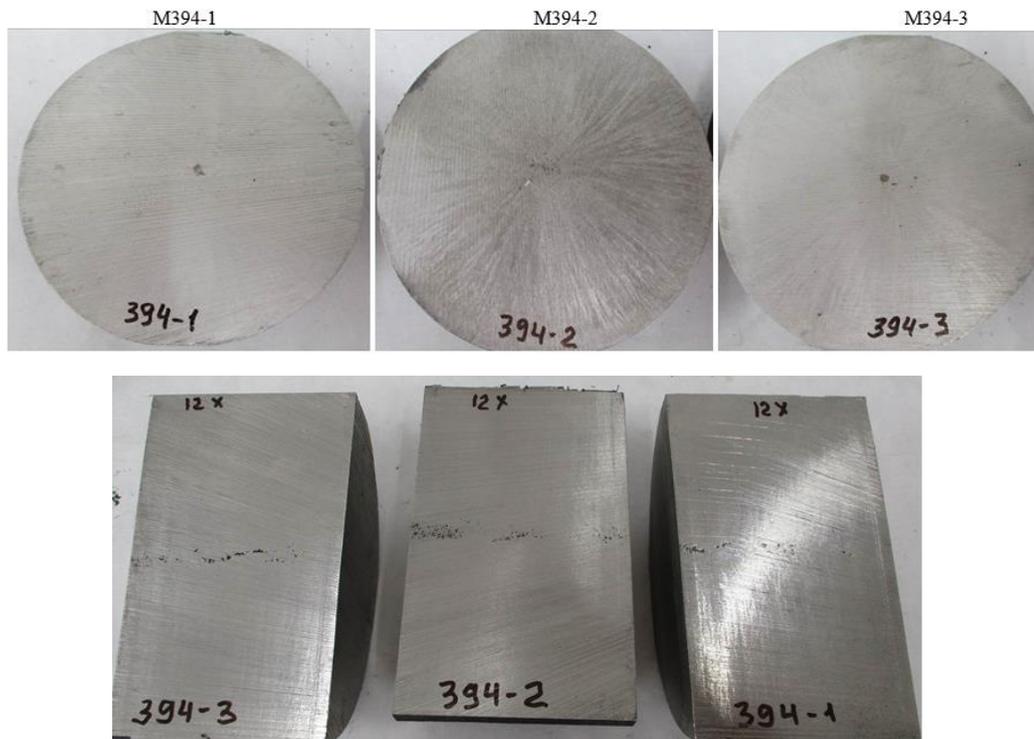


Рисунок 5.15 – Темплеты заготовки диаметром 120 мм из стали 12Х18Н10Т (сверху поперечные, снизу – продольные) с ЭМП в кристаллизаторе, отобранные в начале (№1), середине (№2) и конце (№3) разливки.

Режим ЭМП: ток фазы 175 А, частота тока 12 Гц

– центральная пористость, балл (средний балл):

- заготовки из стали 12Х18Н10Т диаметром:
  - 80 мм: 0,5–2,0 (1,2);
  - 100 мм: 0,5–2,5 (1,5);
  - 120 мм: 1,0–2,5 (1,8);
- заготовки из стали 05Х16Н4Д2Б диаметром:
  - 80 мм: 0,5–2,0 (1,0);
  - 100 мм: 0,5–3,0 (1,7);
  - 120 мм: 0,5–4,0 (1,7);
- глубина складок, мм:
  - заготовки из стали 12Х18Н10Т диаметром:
    - 80 мм: 0,1–0,9;
    - 100 мм: 0,3–1,4;
    - 120 мм: 1,2–1,6;
  - заготовки из стали 05Х16Н4Д2Б диаметром:
    - 80 мм: 0,1–1,5;
    - 100 мм: 0,2–0,8;
    - 120 мм: 0,5–1,9.

По результатам исследований разработали временную технологическую инструкцию непрерывного литья на горизонтальной МНЛЗ круглых заготовок из легированных, в том числе нержавеющей марок стали, и определили рациональные режимы электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе: для заготовок диаметром 80 мм – ток фазы 150 А, частота тока 15 Гц; 100 мм – 175 А, 10 Гц; 120 мм – 175 А, 8 Гц.

На основании проведенных исследований установлено, что ЭМП в кристаллизаторе оказывает положительное влияние на качество поверхности и макроструктуру заготовок, произведенных на горизонтальной МНЛЗ.

С целью дальнейшего улучшения качества осевой зоны НЛЗ и проката из них, руководством завода принято решение об оснащении горизонтальной МНЛЗ системой электромагнитного перемешивания в зоне окончания затвердевания с

возможностью перемещения статоров ЭМП в вертикальной плоскости и вдоль технологической оси машины.

### **5.3. Электромагнитное перемешивание в кристаллизаторах и зоне окончания затвердевания блюмовых МНЛЗ**

Исследования двухуровневой системы электромагнитного перемешивания в кристаллизаторах и зоне окончания затвердевания блюмовых МНЛЗ проводили на 4-м ручье МНЛЗ-3 «ОЭМК». В ходе исследований при литье заготовок сечением 300x360 мм решали следующие задачи:

- влияние ЭМП в кристаллизаторе на макроструктуру заготовок;
- влияние ЭМП в ЗОЗ на макроструктуру заготовок;
- совместное влияние ЭМП в кристаллизаторе и в зоне окончания затвердевания на качество металла;
- определение рациональных режимов ЭМП при перемешивании на двух уровнях МНЛЗ.

В ходе испытаний разлили 20 плавов стали ШХ-15 и одну плавку стали ШХ-4. Во время разливки каждой экспериментальной плавки опробовали один режим ЭМП, ручьи 1–3 исследовали как контрольные. Макроструктуру заготовок изучали по поперечным темплетам, отобранным от разлитых блюмовых заготовок и проката из них диаметром от 85 до 130 мм в соответствии с требованиями нормативно-технической документации.

Для исследования макро- и микроструктуры заготовок, разлитых с ЭМП и контрольных, применяли следующие методы исследований:

- оценка дефектов макроструктуры по ОСТ-14-4-73 и ГОСТ 10243-75, определение протяженности структурных зон, степени развития столбчатых кристаллов, количества и размеров пор, количества и размеров растратов (по неметаллическим включениям);

– химический и газовый анализ для изучения равномерности распределения элементов по сечению литого и катаного металла, оценки чистоты металла по содержанию кислорода;

– оценка загрязненности макровключениями методом "синеломкости"; металлографический анализ для оценки неметаллических включений по методике ГОСТ 801-78 (по максимальному баллу): определение относительной загрязненности металла включениями разных видов как в целом по плавкам (ручьям), так и по зонам образцов (от поверхности к центру). Аналогичный подход был применен при изучении карбидной ликвации, структурной полосчатости и микропористости;

– микрорентгеноспектральный анализ (на приборе "Камебах") для исследования состава включений, выявленных как в изломах, так и на микрошлифах.

В процессе экспериментов изучили влияние ЭМП в кристаллизаторе на качество непрерывно-литых блюмов сечением 300x360 мм из подшипниковой стали при фазном токе 80 и 146 А, при частоте питающего тока 3 Гц. На рисунках 5.16 и 5.17 представлены фотографии темплетов опытных блюмов с ЭМП и контрольных.

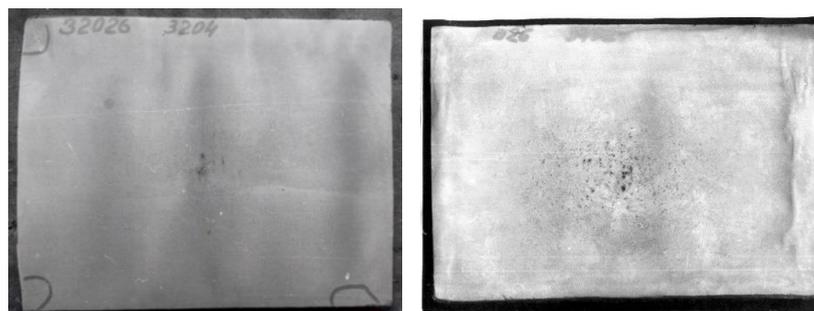


Рисунок 5.16 – Макроструктура заготовок из стали ШХ-15, разлитых с применением ЭМП в кристаллизаторе: слева без ЭМП, справа с ЭМП при токе фазы 80 А



Рисунок 5.17 – Макроструктура заготовок из стали ШХ-15, разлитых с применением ЭМП в кристаллизаторе: слева без ЭМП, справа с ЭМП при токе фазы 146 А

Установили, что применение кристаллизатора с ЭМП приводит к уменьшению протяженности зоны столбчатых кристаллов и размеров самих кристаллов во всем исследованном диапазоне фазных токов ЭМП в кристаллизаторе (КЭМП), причем увеличение фазного тока приводит к усилению указанного эффекта.

При фазном токе 146 А столбчатые кристаллы практически не выявлялись. Вследствие чего заметно возростала протяженность зоны равноосных кристаллов и зоны осевой химической неоднородности. Установили некоторое увеличение точечной неоднородности в макроструктуре литых блюмов с ЭМП. По другим видам дефектов отличие между литым металлом ручьев с ЭМП и контрольных не установили. В прокатанной трубной заготовке диаметром 110 мм (рисунки 5.18 и 5.19) отличия в структуре осевой зоны сохранились: подсадочная ликвация на темплетах заготовок с ЭМП в 1,5–4,0 раза меньше, чем в контрольных.

Центральная пористость рассредоточена и занимала большую площадь, но поры при этом были меньшего размера. На основании проведенных исследований зафиксировали более равномерное распределение углерода, хрома, серы и фосфора по сечению проката из заготовок с ЭМП.

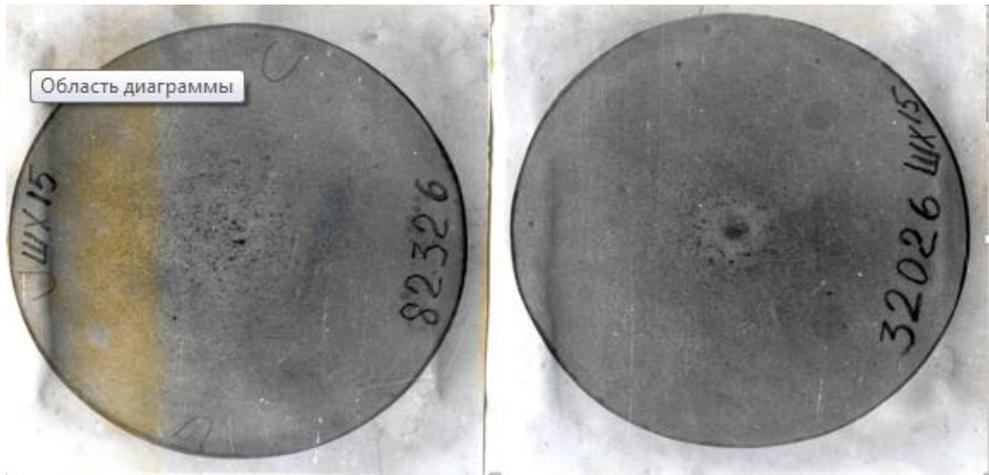


Рисунок 5.18 – Макроструктура прокатанных трубных заготовок из стали ШХ-15: слева с ЭМП в кристаллизаторе при токе фазы 80 А, справа без ЭМП

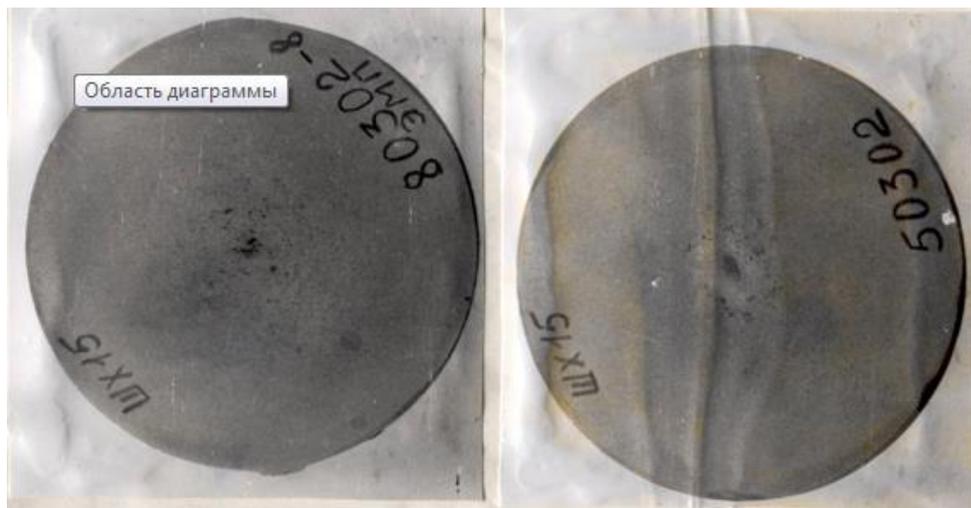


Рисунок 5.19 – Макроструктура прокатанных трубных заготовок из стали ШХ-15 с ЭМП в кристаллизаторе: слева при токе фазы 146 А, справа без ЭМП

При исследовании распределения неметаллических включений и микроструктуры по зонам установили, что при сохранении общего характера распределения ликватов по сечению при ЭМП эта зависимость менее выражена – максимальные значения баллов по карбидной ликвации, структурной полосчатости и сульфидам отметили на расстоянии  $1/2 R$  от поверхности, что соответствовало оценке макроструктуры.

Далее исследовали влияние ЭМП на двух уровнях (в кристаллизаторе и в зоне окончания затвердевания) на качество производимых заготовок. Фазный ток К-ЭМП изменяли в диапазоне 80–135 А при частоте 3 Гц, фазный ток СВЭМП в ЗОЗ – 70–100 А при частоте 7 Гц; скорость разливки составляла 0,45–0,55 м/мин; перегрев над температурой ликвидус в промковше – 34–60 °С. По результатам анализа качества металла установили, что применяемые технологии разливки и прокатки оказывают существенное влияние на металлургический эффект от ЭМП, проявляющийся в первую очередь в качестве макроструктуры готового проката (рисунки 5.20 и 5.21).

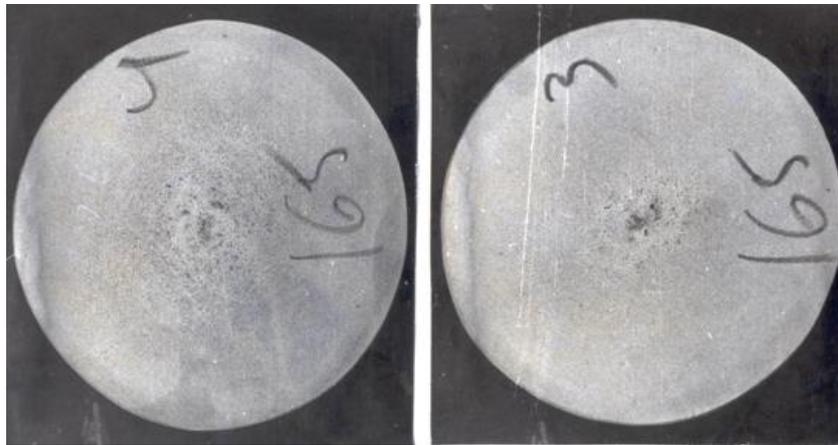


Рисунок 5.20 – Макроструктура трубных заготовок из стали ШХ-15 с ЭМП на двух уровнях: слева – ток фазы ЭМП в кристаллизаторе 80 А, ЭМП в зоне окончания затвердевания – 100 А, справа без ЭМП

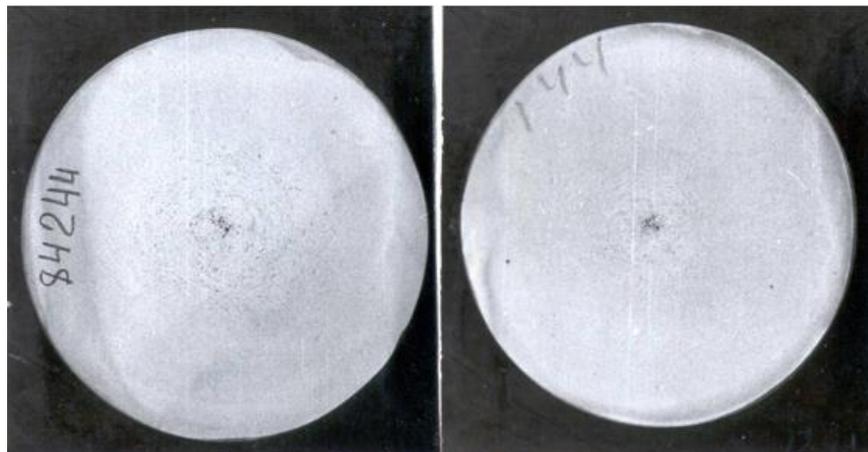


Рисунок 5.21 – Макроструктура трубных заготовок из стали ШХ-15 с ЭМП на двух уровнях: слева ток фазы ЭМП в кристаллизаторе – 135 А, ЭМП в зоне окончания затвердевания – 100 А, справа без ЭМП

По результатам испытаний установили следующие основные преимущества проката, полученного из блюмов с ЭМП на двух уровнях (в кристаллизаторе и в ЗОЗ), по сравнению с металлом без ЭМП и с металлом, произведенным при использовании одного КЭМП:

- снижение протяженности зоны столбчатых кристаллов и их размеров, а также отрицательной ликвации в осевой зоне, характерной для зоны "мостов" в контрольном металле;

- сокращение объема и интенсивности подусадочной ликвации в осевой зоне проката;

- большая равномерность распределения неметаллических включений по сечению проката, а также уменьшение относительной загрязненности сульфидами и оксидами, по сравнению с контрольными заготовками;

- одинаковые значения максимальных и средних баллов по структурной полосчатости и карбидной ликвации стали с ЭМП и без ЭМП, при ЭМП отметили их более равномерное распределение по сечению.

По результатам анализа макроструктуры определили (рисунок 5.22), что одновременное применение систем ЭМП в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания снижает максимальный балл подусадочной ликвации с 5,0 до 2,0. Средний балл подусадочной ликвации в прокате с ЭМП составил 1,0 балл, в контрольном – 2,1 балла [350].

Центральная пористость в металле, отлитом с ЭМП, несколько выше, чем в контрольном. Следует отметить, что величина пор в металле с ЭМП меньше, чем в контрольном, а площадь, занимаемая пористостью, в 2,0–2,5 раза больше, чем в контрольном металле.

Балл центральной пористости снизился при увеличении фазного тока ЭМП в кристаллизаторе. Исходя из полученных результатов, рассчитывали на снижение центральной пористости при дальнейшем повышении фазного тока кристаллизатора-ЭМП.

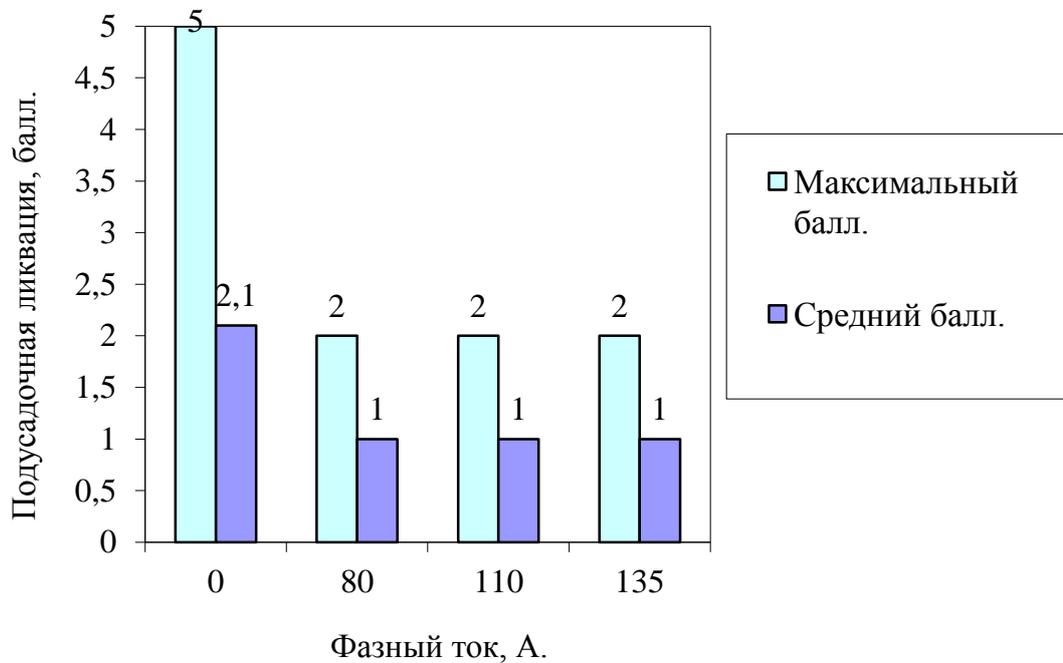
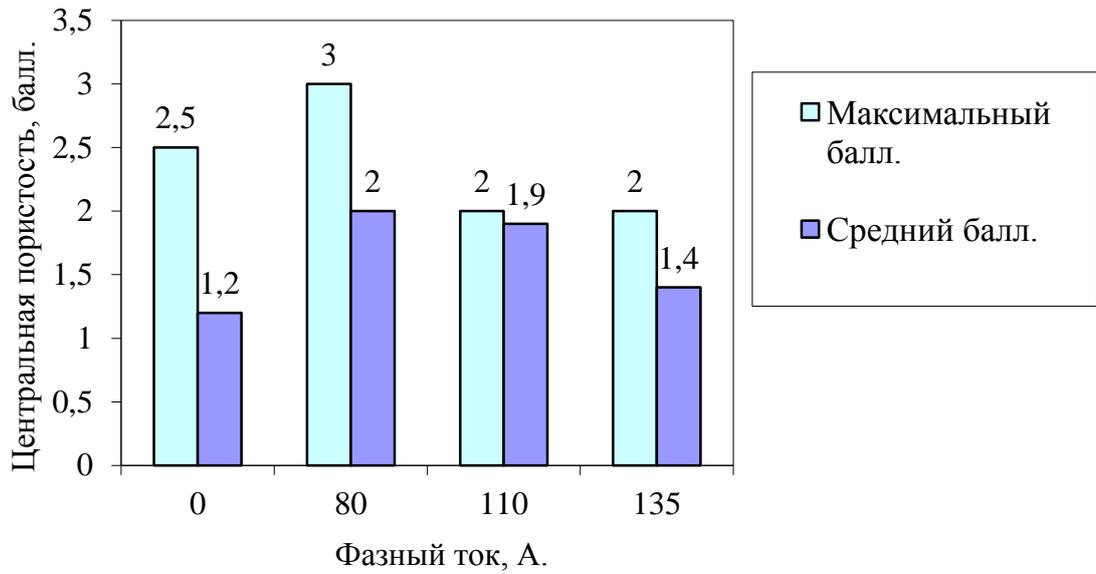


Рисунок 5.22 – Влияние фазного тока ЭМП в кристаллизаторе при перемешивании на двух уровнях на центральную пористость (верхний рисунок) и подусадочную ликвацию (нижний рисунок); значение «0» фазного тока соответствует режиму без ЭМП

В процессе работы исследовали влияние системы СВЭМП в ЗОЗ на качество стали ШХ-15. Применение СВЭМП в ЗОЗ при максимально возможном фазном

токе, равном 100 А, не оказал заметного влияния на характер макроструктуры и бальность дефектов. Это можно объяснить тем, что к началу перемешивания в этом случае структура оказывается практически полностью сформированной.

В то же время в ходе предыдущих исследований установили, что наиболее заметное улучшение осевой зоны блюмов наблюдали при литье подшипниковых сталей и перемешивании на двух уровнях: при применении кристаллизатора-электромагнитного перемешивателя и статора-вращателя ЭМП в зоне окончания. Как существенное явление отметили отсутствие на темплетах зон отрицательной ликвации.

Химический и металлографический анализы металла показали, что "светлая полоса" являлась зоной химической и структурной неоднородности. Анализ полученных результатов позволил предположить, что механизм образования "светлой полосы" носит сложный характер и включает как вымывание маточного раствора из межосных промежутков, так и оплавление осей кристаллов под действием потоков расплава. Опираясь на полученные результаты, сделали вывод, что "светлая полоса" образуется при интенсивном движении расплава вдоль фронта кристаллизации. Такое движение возможно лишь при наличии достаточно большого количества жидкой и жидко-твердой фаз в лунке. Такое явление наблюдали при перемешивании в зоне вторичного охлаждения. Выбор места установки статора в зоне окончания затвердевания, как отмечалось выше, производили таким образом, чтобы при максимальной скорости вытягивания 0,55 м/мин соотношение жидкой фазы к твердой находилось в интервале 0,3–0,5.

С целью подтверждения выдвинутого предположения отлили плавки конструкционных марок стали со скоростью вытягивания в 0,55–0,75 м/мин при постоянном режиме ЭМП на двух уровнях: фазный ток ЭМП в кристаллизаторе – 135 А, фазный ток статора в ЗОЗ – 100 А. Исследования макроструктуры заготовок показали, что при скорости литья 0,55–0,65 м/мин зона отрицательной ликвации не образуется; при скорости литья 0,7 м/мин появлялась слабая "светлая полоса", а при скорости вытягивания 0,75 м/мин образовалась яркая "светлая

полоса". Полученные результаты подтвердили выдвинутое предположение о механизме образования "светлых полос" [381].

#### **5.4. Двухуровневое электромагнитное перемешивание для машины полунепрерывного литья заготовок**

Промышленные испытания системы ЭМП в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания проводили на вертикальной двухручьевой машине полунепрерывного литья заготовок МПНЛЗ завода «Электросталь».

В ходе исследований решали следующие задачи:

- установить влияние ЭМП в кристаллизаторе на макроструктуру заготовок;
- определить влияние ЭМП в ЗОЗ на макроструктуру заготовок;
- установить совместное влияние двухуровневого ЭМП в кристаллизаторе и в зоне окончания затвердевания на качество металла;
- разработать рациональные режимы ЭМП при перемешивании на двух уровнях МПНЛЗ.

Разливка на МПНЛЗ в круглые заготовки диаметром 250 и 360 мм с применением ЭМП в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания производили по следующей схеме: после начала вытягивания включали ЭМП кристаллизатора. После выхода слитка из ЗОЗ каретку вытягивания заготовки останавливали и включали ЭМП в зоне окончания затвердевания вплоть до окончания разливки. После остановки слитка каретку ЭМП перемещали под кристаллизатор, перемешивая металл вплоть до его окончательной кристаллизации.

В процессе испытаний применяли различные режимы ЭМП, при которых изменяли ток фазы и частоту перемешивания. При разливке заготовок диаметром 250 мм для ЭМП в кристаллизаторе ток фазы составлял 50, 125 и 150 А, частота – 2 и 3 Гц; для ЭМП в ЗОЗ режимы были 150 и 175 А, 7 и 8 Гц – соответственно. Заготовки диаметром 360 мм не разливали по причине отсутствия на них заказов.

По результатам оценки по ОСТ 14-1-235-91 темплетов от заготовок диаметром 250 мм с ЭМП и контрольных, а также проката из них установили [379]:

– ЭМП в кристаллизаторе (рисунок 5.23) увеличивает зону равноосных кристаллов, но не подавляет развитие центральной пористости [382];

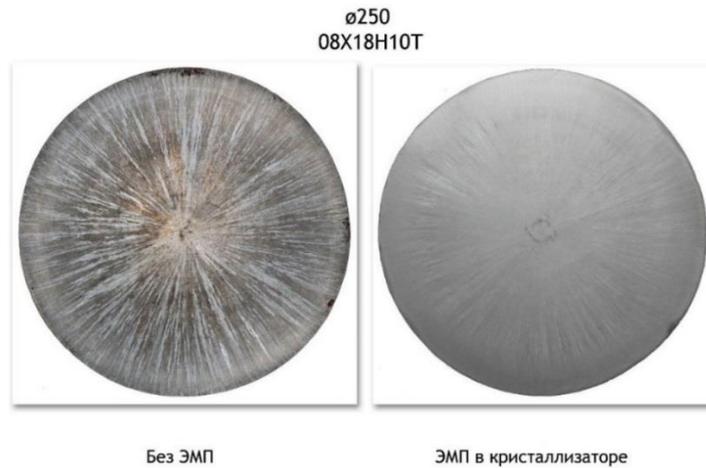


Рисунок 5.23 – Макроструктура поперечных темплетов заготовок диаметром 250 мм из стали 08X18H10T, разлитых с ЭМП в кристаллизаторе и контрольных без ЭМП

– ЭМП на двух уровнях – в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания является рациональной системой для МПНЛЗ (рисунки 5.24 и 5.25) [383];

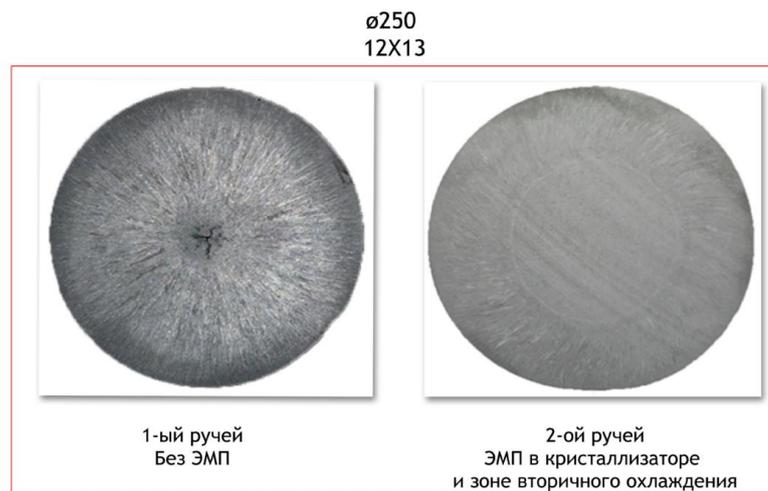


Рисунок 5.24 – Макроструктура поперечных темплетов круглых заготовок диаметром 250 мм из стали 12X13: контрольных без ЭМП (слева) и с ЭМП в кристаллизаторе и ЗОЗ (справа)

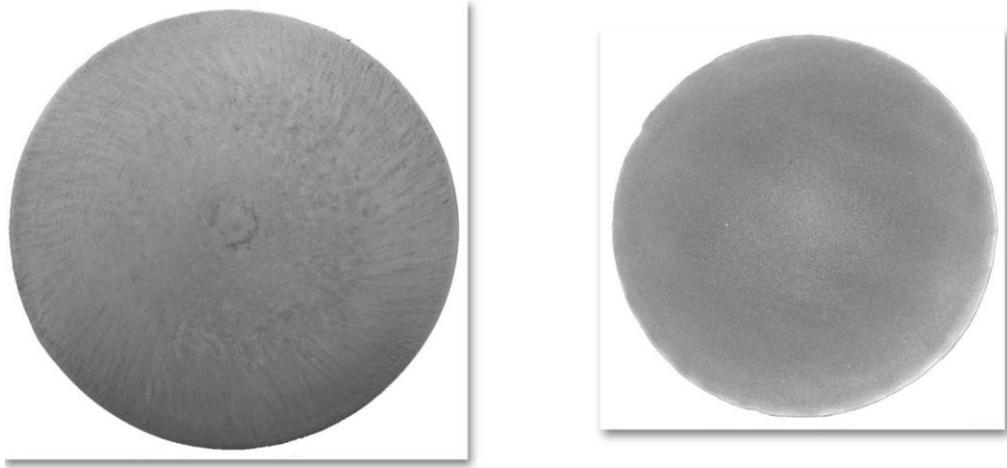


Рисунок 5.25 – Макроструктура поперечных темплетов заготовок диаметром 250 мм и проката из стали 5ХЗН12Г5: слева – заготовка с ЭМП в кристаллизаторе и 303, справа – прокат диаметром 105 мм из заготовки диаметром 250 мм с ЭМП

– снижается балл по центральной пористости и осевой ликвации с балла 1,5–2,5 до 0,5–1,0 [384];

– снижается балл по осевым ликвационным полоскам и трещинам (ЛПТ) с 1,5–2 до 0,5–1,0 [385];

– краевые точечные загрязнения полностью отсутствуют (в контрольном металле без ЭМП балл по КТЗ составляет 2–3 балла [386, 387].

По результатам проведенных исследований определили рациональные режимы ЭМП на двух уровнях при литье заготовок сечением диаметром 250 мм:

– сталь 08Х18Н10Т: ЭМП-К – ток фазы – 150 А, частота 2 Гц; ЭМП-3 – 150 А и 7 Гц;

– сталь 12Х13: ЭМП-К – 50 А и 3 Гц; ЭМП-3 – 175 А и 8 Гц;

– сталь 5ХЗН12Г5: ЭМП-К – 100 А и 3 Гц; ЭМП-3 – 175 А и 8 Гц;

– сталь ЭП817: ЭМП-К – 50 А и 3 Гц; ЭМП-3 – 175 А и 8 Гц.

Следует отметить экономичность разработанной системы по сравнению с зарубежными аналогами (статор ЭМП-К потребляет 45 кВт, статор ЭМП-3 – 65 кВт), которая позволяет снизить потребление электроэнергии до 5 млн кВт·ч ежегодно при работе многоручьевого МНЛЗ 320 дней в году [344].

## 5.5. Методология разработки и опробования систем электромагнитного перемешивания

При разработке систем электромагнитного перемешивания возникает ряд вопросов, относящихся ко многим сторонам этой проблемы, включая магнитогидродинамическую, электротехническую, металлургическую и тепловую. Тепловая сторона, как правило, не рассматривается при решении этой задачи, а магнитогидродинамическая и электротехническая учитываются в недостаточной мере, что приводит в дальнейшем к необоснованному увеличению числа опытных исследований на промышленных МНЛЗ при определении рациональных режимов ЭМП.

Теоретические и экспериментальные исследования, физическое моделирование, промышленные испытания предложенных технических решений позволили разработать методологию разработки и опробования систем ЭМП для сортовых и блюмовых МНЛЗ (рисунок 5.26).



Рисунок 5.26 – Общая схема методологии разработки и опробования систем электромагнитного перемешивания на МНЛЗ

**Первый этап** методологии включает анализ исходных данных по выбранной МНЛЗ. Объектом анализа являются: конструктивные особенности данной МНЛЗ; применяемая технология непрерывного литья; особенности существующей системы ЭМП (при её наличии); размерный и марочный сортамент, частота появления и количество дефекты производимых заготовок. Для проведения анализа используются действующие чертежи основного технологического оборудования, технологические карты выплавки, внепечной обработки и разливки различных марок стали, описание применяемой системы ЭМП, информация по дефектам поверхности и макроструктуры заготовок и проката.

При выборе устройств (элементов) системы ЭМП (**этап 2**) производится оценка современных тенденций развития систем ЭМП для сортовых и блюмовых МНЛЗ (таблица 1.2).

Для анализа результатов влияния различных систем ЭМП на частоту появления дефектов НЛЗ используются материалы, приведенные в таблице 1.3. Оценка современного опыта применения различных систем ЭМП на сортовых и блюмовых МНЛЗ производится с использованием материалов таблицы 5.3. Кроме того, для выбора предварительного числа и места установки устройств ЭМП требуются исходные данные по месту расположения и количеству дефектов заготовок на данной МНЛЗ. На основе анализа современных тенденций, конструктивных особенностей, преимуществ и недостатков различных систем ЭМП, информации о дефектах НЛЗ, осуществляют предварительный выбор устройств электромагнитного перемешивания, их числа и места установки на данной МНЛЗ.

В **третий этап** входит обоснование исходных данных для разработки устройств системы ЭМП, в основе которой лежат результаты моделирования разрабатываемой системы с учетом проведенных исследований, отраженных во второй и третьей главах, изучающих связь гидродинамики с параметрами поля. Как уже отмечалось ранее, для достижения требуемого качества заготовок в разрабатываемой системе необходимо достигать скоростей турбулентных потоков

Таблица 5.3 – Опыт применения устройств электромагнитного перемешивания на сортовых и блюмовых МНЛЗ

Разливаемые группы марок сталей	Тип МНЛЗ									
	Сортовые					Блюмовые				
	Сечение заготовок, мм									
	80x80–120x120	Диаметр 100–120	Диаметр 120–150	120x120–150x150	150x150–180x180	Диаметр 80–120, разлитые на ГМНЛЗ	Диаметр 150–290	Диаметр более 290	180x180–250x250	Более 250x250
Углеродистые обыкновенного качества	Без ЭМП				ЭМП-К <sup>1</sup>	н/д	ЭМП-К	н/д	ЭМП-К	н/д
Низко-, среднеуглеродистые, низколегированные	Без ЭМП		ЭМП-К			Без ЭМП	ЭМП-К			
Высокоуглеродистые	н/д	н/д	ЭМП-К		ЭМП-К+ЭМП-303 <sup>2</sup>	н/д	ЭМП-К		ЭМП-К+ЭМП-303	
Высоколегированные	н/д	н/д	н/д		ЭМП-К+ЭМП-303	ЭМП-К+ЭМП-3ВО <sup>3</sup>	ЭМП-К+ЭМП-303			

<sup>1</sup>–ЭМП-К – система электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе;

<sup>2</sup>–ЭМП-303 – система электромагнитного перемешивания в зоне окончания затвердевания;

<sup>3</sup>–ЭМП-3ВО – система электромагнитного перемешивания в зоне вторичного охлаждения.

расплава в интервале 0,3–1,0 м/с.

Для обоснования параметров системы ЭМП используется инженерная методика расчета электротехнических параметров устройства электромагнитного перемешивания (частота тока, ток фазы, мощность статора, система охлаждения, количество полюсов статоров, количество ампер-витков в полюсах), рассмотренная во второй главе.

После обоснования электротехнических параметров производится выбор конструкции устройства ЭМП (**этап 4**), который осуществляется в соответствии с общими принципами конструирования, рассмотренными в четвертой главе.

В основе встраивания системы ЭМП и всех её элементов в конкретную МНЛЗ (**этап 5**) лежит анализ конструктивных особенностей машины, согласование источников тока, расхода и качественных показателей других энергоносителей. Для выполнения этого этапа требуется действующая конструкторская документация, информация о количественных и качественных показателях используемых энергоносителей.

**Шестой этап** включает в себя опробование и внедрение разработанной системы электромагнитного перемешивания на МНЛЗ. Опробование и внедрение основаны на результатах и представлениях, установленных по итогам математического и физического моделирования, отраженных во второй и третьей главах и проводимых с целью определения рациональных режимов ЭМП для каждой конкретной системы. Для проведения опробования разрабатывается программа испытаний, с указанием технологических режимов выплавки и разливки, состав контрольной серии плавок, а также рассчитанные режимы ЭМП. По окончании каждой разливки для исследования качества поверхности и макроструктуры заготовок отбираются продольные и поперечные темплеты слитков с ЭМП и контрольных. Качество макроструктуры заготовок оценивается методом металлографического исследования по ОСТ 14–1–235–91 или ГОСТ 58228-2018. На основании проведенных испытаний и исследования качества металла устанавливаются окончательные технологические режимы выплавки и

разливки, а также рациональные режимы электромагнитного перемешивания для всего размерного и марочного сортамента производимых с ЭМП заготовок.

Предложенная методология дает возможность осуществлять обоснованный выбор устройств электромагнитного перемешивания, их расположения на МНЛЗ и рациональных режимов эксплуатации на различных стадиях разработки и внедрения систем ЭМП на сортовых и блюмовых МНЛЗ, а объем и порядок проведения работ зависят от конкретного объекта.

Использование данной методологии дает возможность сократить время и материальные затраты на выбор системы ЭМП для конкретной МНЛЗ, её проектирование и промышленное опробование, повысить ресурс устройств, снижая тем самым затраты на ремонт оборудования, и снизить капитальные и текущие эксплуатационные затраты на ЭМП в 1,5-2,0 раза.

Разработанную методологию использовали при создании, опробовании и внедрении систем электромагнитного перемешивания для сортовых и блюмовых МНЛЗ (МПНЛЗ) заводов: Молдавского металлургического, Ижевского опытно-механического, Волжского трубного, металлургического «Электросталь», «Ваку Steel Company» и Оскольского электрометаллургического комбината, рассмотренных в четвертой главе.

## Выводы по главе 5

1. В результате промышленных испытаний конструкции ЭМП, встроенного в кристаллизатор сортовой МНЛЗ Молдавского металлургического завода для производства заготовок сечением 125x125 мм получены следующие результаты:

1.1. Для заготовок из низко- и среднеуглеродистых марок стали:

- толщина подповерхностного слоя, чистого от неметаллических включений металла, увеличивается в 1,9 раза;
- количество подкоркового пузыря, а также его максимальные диаметр и глубина залегания, уменьшаются в 1,5–2 раза.

1.2. Для заготовок из высокоуглеродистых марок стали:

- протяжённость подсадочных ликвационных полосок уменьшается в 1,4 раза;
- количество заготовок с коэффициентом осевой ликвации углерода менее 1,1 увеличивается в 1,3 раза;
- зона столбчатых кристаллов (дендритность макростроения НЛЗ) уменьшается в 1,7 раза;
- протяжённость мартенситных участков в прокате составляет не более 20 микрон;
- максимальный балл по центральной пористости сокращается с балла 4,0 до балла 2,5;
- наилучшие результаты получены при режиме: ток фазы 200 А, частота тока 6,5 Гц.

1.3. Введение в 2001 году системы ЭМП в промышленную эксплуатацию позволило в 2–2,5 раза снизить капитальные и эксплуатационные затраты, а также – впервые в СНГ и одними из первых в мире – освоить технологию непрерывной разливки сортовых заготовок из высокоуглеродистых марок стали, в том числе кордовых и пружинных.

2. В результате промышленных испытаний конструкции ЭМП, встроенного в кристаллизатор горизонтальной МНЛЗ завода «ИОМЗ», производящей круглые

заготовки диаметром от 80 до 120 мм из высоколегированных марок стали получены:

- осевая пористость в заготовках из стали 12Х18Н10Т уменьшается до среднего балла – 1,2–1,8; из стали 05Х16Н4Д2Б – 1,0–1,7;

- глубина складок снижается, мм: у заготовок из стали 12Х18Н10Т диаметром 80 мм: до 0,1–0,9; 100 мм: до 0,3–1,4; 120 мм: до 1,2–1,6; из стали 05Х16Н4Д2Б диаметром: 80 мм: до 0,1–1,5; 100 мм: до 0,2–0,8; 120 мм: до 0,5–1,9;

- наилучшие результаты получены при режимах: для заготовок диаметром 80 мм – ток фазы 150 А, частота тока 15 Гц; для 100 мм – 175 А и 10 Гц; для 120 мм – 175 А и 8 Гц, что соответствует результатам математического моделирования.

3. В результате опытно-промышленных испытаний двухуровневой системы ЭМП на блюмовой МНЛЗ Оскольского электрометаллургического комбината для производства заготовок сечением 300х360 мм из подшипниковых марок стали получены следующие результаты:

- максимальное влияние на качество НЛЗ оказывает совместное ЭМП в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания;

- максимальный балл подсадочной ликвации снижается с 5,0 до 2,0 балла;

- средний балл подсадочной ликвации в трубных заготовках проката диаметром 110 мм составляет 1,0 балл, при этом в макроструктуре литого металла и проката отсутствует зона отрицательной ликвации;

- наилучшие результаты получены при режимах: ЭМП в кристаллизаторе – ток фазы 135 А, частота 3 Гц; ЭМП в ЗОЗ – 100 А и 7 Гц соответственно;

- статоры ЭМП для ЗОЗ блюмовой МНЛЗ наиболее эффективно работают на тех участках металлургической длины машины, где соотношение жидкой и твердой фаз находится в интервале 0,3–0,5.

4. В результате промышленных испытаний конструкции ЭМП на двух уровнях машины полунепрерывного литья завода «Электросталь» для производства заготовок диаметром 250 и 360 мм из высоколегированных марок стали получены следующие результаты:

- балл по центральной пористости и осевой ликвации снижается с балла 1,5–2,5 до балла 0,5–1,0;
- балл по осевым трещинам уменьшается с балла 1,5–2,0 до балла 0,5–1,0;
- краевые точечные загрязнения полностью отсутствуют, при этом балл по КТЗ без ЭМП составляет 2–3 балла;
- рациональные режимы ЭМП при литье заготовок диаметром 250 мм:
  - сталь 08X18H10T: ЭМП в кристаллизаторе – ток фазы – 150 А, частота 2 Гц; ЭМП в ЗОЗ – 150 А и 7 Гц;
  - сталь 12X13: ЭМП-К – 50 А и 3 Гц; ЭМП-З – 175 А и 8 Гц;
  - сталь 5X3H12Г5: ЭМП-К – 100 А и 3 Гц; ЭМП-З – 175 А и 8 Гц;
  - сталь ЭП817: ЭМП-К – 50 А и 3 Гц; ЭМП-З – 175 А и 8 Гц;
- статоры ЭМП для ЗОЗ наиболее эффективно располагать на движущихся каретках, в месте, где соотношение жидкой и твердой фаз находится в интервале 0,2–0,4;
- в 2009 году систему ЭМП ввели в промышленную эксплуатацию.

5. Предложена методология разработки и опробования систем ЭМП в сортовых и блюмовых МНЛЗ, которая дает возможность осуществлять обоснованный выбор устройств электромагнитного перемешивания, их расположения на МНЛЗ и рациональных режимов эксплуатации на различных стадиях разработки и внедрения систем ЭМП на сортовых и блюмовых МНЛЗ.

6. Разработанные системы ЭМП для сортовых и блюмовых МНЛЗ обеспечивают улучшение качества непрерывно-литых заготовок и снижение капитальных и эксплуатационных затрат в 1,5–2,0 раза по сравнению с зарубежными аналогами. Ожидаемый экономический эффект составляет 21 млн руб. при работе многоручьевой МНЛЗ 320 дней в году, что подтверждается актами опробования и внедрения.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В процессе теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные результаты:

1. Выполнена классификация серии зарубежных устройств электромагнитного перемешивания и выявлены тенденции их развития.

2. В результате теоретических исследований установлены влияние электромагнитного торможения в районе мениска на движение жидкого металла в поперечном магнитном поле и взаимодействие бегущего магнитного поля в кристаллизаторе с жидким расплавом. Выведена зависимость скорости от электротехнических параметров устройств. Получено значение относительного увеличения коэффициента гидравлического сопротивления, равное 18, для исследуемой конструкции электромагнитного тормоза, встраиваемого в корпус кристаллизатора сортовой МНЛЗ, производящей трубные заготовки диаметром 130 мм.

3. Разработаны физические модели МГД-процессов, происходящих при ЭМП в виде лабораторных стендов в масштабе М 1:1 с использованием в качестве моделирующей жидкости низкотемпературного сплава Роузе. В результате экспериментальных исследований установлено, что скорость движения расплава 0,55–0,65 м/с в кристаллизаторах сортовой МНЛЗ для заготовок сечением 125x125 мм достигается при токе фазы 150 А и частоте тока 6–7 Гц, а скорость движения расплава 0,85 м/с в кристаллизаторе блюмовой МПНЛЗ для заготовок диаметром 250 мм достигается при токе фазы 200 А и частоте тока 4 Гц.

4. Сформулированы основные принципы конструирования систем ЭМП для сортовых и блюмовых машин непрерывного литья заготовок, которые использовали при создании устройств электромагнитного перемешивания для МНЛЗ заводов: Молдавского металлургического, Ижевского опытно-механического, Волжского трубного, металлургического «Электросталь» и Оскольского электрометаллургического комбината.

5. Предложена методология разработки и опробования систем ЭМП в сортовых и блюмовых МНЛЗ, которая дает возможность сократить время и материальные затраты на выбор системы ЭМП для конкретной МНЛЗ, её проектирование и промышленное опробование, повысить ресурс устройств электромагнитного перемешивания, уменьшая тем самым затраты на ремонт оборудования, и снизить капитальные и текущие эксплуатационные затраты на ЭМП в 1,5–2,0 раза.

6. Разработаны следующие конструкции устройств ЭМП, встроенных в кристаллизатор, в которых полюса охлаждаются его водой, обмотки выполнены из водопогружного провода с двойной изоляцией, а корпус кристаллизатора – из магнитной стали, в число которых входят:

- система ЭМП для промышленной сортовой МНЛЗ Молдавского металлургического завода, производящей заготовки сечением 125x125 мм, введенная в эксплуатацию в 2001 году;

- система ЭМП для промышленной горизонтальной МНЛЗ завода «ИОМЗ», производящей круглые заготовки диаметром от 80 до 120 мм, проходящей промышленные испытания в настоящее время;

- система двухуровневого воздействия, которая обеспечивает независимое управление потоками стали в районе мениска электромагнитным тормозом постоянного тока и статором ЭМП в нижней части кристаллизатора промышленной сортовой МНЛЗ завода «Баку Стил Компани», производящей круглые заготовки диаметром от 130 до 220 мм.

7. Впервые разработана конструкция системы ЭМП в кристаллизаторе наружного исполнения для промышленной блюмовой МНЛЗ, производящей заготовки диаметром от 150 до 410 мм, в которых применили воду кристаллизатора для охлаждения обмоток. Устройство ЭМП в корпусе из нержавеющей стали полностью изготовлено из отечественных материалов, имеет разборную конструкцию, ремонтпригодно в условиях металлургического завода, имеет возможность установки его на существующие посадочные места.

8. Разработана конструкция системы ЭМП в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания, введенная в эксплуатацию в 2009 году на промышленной МПНЛЗ металлургического завода «Электросталь», производящей заготовки диаметром 250 и 360 мм. В системе впервые выполнены статоры водопогружного типа, встроенные в корпус кристаллизатора из ферромагнитной стали, которые охлаждаются водой кристаллизатора, а статоры ЭМП в зоне окончания затвердевания, расположенные в корпусе из нержавеющей стали на движущихся каретках – водой для охлаждения каретки.

9. В разработанных системах ЭМП предложена оригинальная конструкция обмоток полюсов статоров из водопогружного провода, разработанного ВНИИ кабельной промышленности по заданию ВНИИМЕТМАШ, а в конструкции обмоток полюсов статоров предусмотрено наружное охлаждение каждого витка.

10. Впервые разработана конструкция гильзового кристаллизатора, исключая несоосное расположение гильзы и рубашки охлаждения, обеспечивающая равномерное охлаждение заготовки по всему периметру кристаллизатора (патент РФ №2709078).

11. Проведены промышленные испытания разработанных систем ЭМП, при использовании которых, получены следующие основные результаты:

– максимальный балл по центральной пористости сократился с балла 4,0 до балла 2,5 в заготовках сечением 125x125 мм из высокоуглеродистых марок стали, производимых на сортовой МНЛЗ «ММЗ»;

– средний балл по центральной пористости составил 1,0–1,8 балла, а качество поверхности улучшилось в заготовках диаметром 80, 100 и 120 мм из высоколегированных марок, разливаемых на горизонтальной МНЛЗ завода «ИОМЗ». Установлено, что ЭМП уменьшает осевую пористость на 10 % и существенно улучшает качество поверхности заготовок из высоколегированных марок стали;

– максимальный балл по подсадочной ликвации снизился до 2,0 балла в заготовках сечением 300x360 мм из подшипниковых марок стали, а в трубных

заготовках до первого балла при ЭМП на двух уровнях – в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания блюмовой МНЛЗ «ОЭМК»;

– балл по центральной пористости и осевой ликвации снизился с балла 1,5–2,5 до балла 0,5–1,0 в заготовках диаметром 250 мм из высоколегированных марок стали, производимых с ЭМП на двух уровнях – в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания МПНЛЗ «МЗ «Электросталь».

12 Разработанные системы ЭМП для сортовых и блюмовых МНЛЗ обеспечивают существенное улучшение качества непрерывно-литых заготовок и снижение капитальных и эксплуатационных затрат в 1,5–2,0 раза по сравнению с зарубежными аналогами. Ожидаемый экономический эффект составляет 21 млн руб. при работе многоручьевой МНЛЗ 320 дней в году, что подтверждается актами опробования и внедрения.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. 60 лет непрерывной разливки стали в России: сб. ст. / Под ред. С.В. Колпакова и Е.Х. Шахпазова. – М.: Интерконтакт Наука, 2007. – 512 с.
2. World Steel Association. Бюллетень «World steel in figures 2020». – 17 с.
3. Вдовин, К.Н. Непрерывная разливка стали. Гидромеханика машин непрерывного литья заготовок: монография / К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин, И.М. Ячиков. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2014. – 348 с.
4. Смирнов, А.Н. Непрерывная разливка стали: учебник / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
5. Опыт модернизации сортовой МНЛЗ / А.К. Белитченко, Ю.А. Белов, А.С. Костин, В.Г. Баначенков. А. М. Ротенберг // Сталь, – 2005. – №1. – С.71–75.
6. 60 лет научно-технической и производственной деятельности ВНИИМЕТМАШ: сб. ст. / Отв. ред. Н.В. Пасечник. – М.: Наука, 2005. – 509 с.
7. ВНИИМЕТМАШ и металлургическое машиностроение: сб. ст. / Отв. ред. Н.В. Пасечник. – М.: Наука, 2009. – 552 с.
8. Машины и агрегаты металлургического производства: сб. ст. / Под общ. ред. В.М. Сеницкого, Н.В. Пасечника. – М.: Машиностроение, 2000. – 912 с.
9. Вдовин, К.Н. Непрерывная разливка стали / К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин, И.М. Ячиков // – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2012. – 540 с.
10. Николаев, Г.И. Разработка и исследование гильз кристаллизаторов высокоскоростных машин непрерывного литья сортовых заготовок и создание оборудования для их промышленного производства: дис. на соискание ученой степени канд. технич. наук: Николаев Геннадий Иванович: 05.02.13 – М., 2007. – 157 с.
11. Проспект КМЕ Germany. АМТ® – Современная технология производства кристаллизаторов. Гильза ВОЛНА. – 2013. – 4 с.

12. Бакши, Я.А. Новые гильзы с волнистым внутренним профилем для кристаллизаторов сортовых МНЛЗ / Я.А. Бакши, М. Гарсия, Д.П. Лоренто // Сталь. – 2014. – №2. – С. 19–23.
13. Проспект KME Germany. AMT<sup>®</sup> Enhanced Meniscus Cooling for Mould Tubes. – 2016. – 2 с.
14. High speed casting of billets with SIEMENS VAI casting solutions / U. Zanelli, J. Morton, H. Sezar, A. Onder // Quality Proceedings of 8th European Continuous Casting Conference, 23 – 26 June 2014, Graz, Austria. P.p. 357–364.
15. Fuchshuber, J. Modern billet casting technology / J. Fuchshuber, G. Zedefbauer // Millennium steel. – 2004. P.p. 162–167.
16. Первые опыты литья квадратных заготовок со скруглёнными углами на заводе фирмы Arcelormittal Steel Ruhport / М. Люттенберг, Д. Кирш, А. Рёриг, Ф. Кава // Чёрные металлы. – 2008. – №2. – С. 31–36.
17. Travaglini, C. Highest productivity + highest quality=Lower cost in Continuous Casting / C. Travaglini, N. Kapaj // Partners in front running. Danieli innovation. Meeting. 12 October 2010 Danieli Headquarters – Italy.
18. Проспект Danieli MI.DA<sup>®</sup>. Концепция Danieli «Микрозавод с непрерывной плавкой и прокаткой». 2010.
19. Опыт реконструкции МНЛЗ с обеспечением производства НЛЗ круг 156 мм со скоростями разливок до 3,5 м/мин / В.А. Топоров, Е.Г. Житлухин, В.В. Кузнецов, А.В. Мурзин, И.П. Пархоменко // Доклад на секции «Разливка и кристаллизация» на XIII Междун. Конгрессе сталеплавателей. 12–18.10.2014 г. г. Полевской Свердловской области.
20. Гильзовый кристаллизатор для высокоскоростного непрерывного литья / В.Б. Ганкин, Г.И. Николаев, И.Н. Шифрин и др. // патент РФ №2152843, г. Москва, 2000г.
21. Высокоскоростные сортовые кристаллизаторы ВНИИМЕТМАШ / В.Б. Ганкин, Г.И. Николаев, И.Н. Шифрин, А.М. Ротенберг, С.И. Шахов, И.В. Дервянченко, С.Н. Мазанов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2007. – №7 – С. 49–52.

22. Гильзовые кристаллизаторы для высокоскоростной разливки стали / В.Б. Ганкин, А.К. Белитченко, Н.А. Богданов, В.Н. Киреев, Г.И. Николаев, Б.А. Сивак, И.Н. Шифрин // Новости черной металлургии России и зарубежных стран. Ч.1. Черная металлургия. – 2000. – №3–4. – С. 39–45.
23. Анализ формирования затвердевающей корки круглой заготовки в гильзе кристаллизатора МНЛЗ / Б.А. Сивак, Г.И. Николаев, А.С. Смоляков, С.И. Шахов // Тяжелое машиностроение. – 2011. – №2. – С. 9–12.
24. Влияние конструктивных и технологических параметров МНЛЗ на качество непрерывнолитых круглых заготовок / А.В. Шапиро, В.Б. Ганкин, А.С. Смоляков, И.Н. Шифрин, Б.А. Сивак, В.Л. Данилов, С.В. Зарубин, Е.Б. Анисимов, А.Г. Ляльков, В.В. Масный // Тяжёлое машиностроение. – 2007. – №5. – С. 9–15.
25. Analysis of the formation of the solidifying skin of a round continuous-cast semifinished product inside the sleeve of the mold / В.А. Sivak, G.I. Nikolaev, A.S. Smoliakov, S.I. Shakhov // Metallurgist. – 2011. – Т 55. – No. 3–4. P.p. 158–162.
26. Выбор конструкции МНЛЗ и оценка тепловой работы зоны кристаллизации / А.В. Шапиро, В.Б. Ганкин, А.С. Смоляков, И.Н. Шифрин, В.Л. Данилов, С.В. Зарубин // Сталь. – 2008. – №3. – С. 68–73.
27. Анализ формирования затвердевающей корки круглой непрерывнолитой заготовки в гильзе кристаллизатора / Б.А. Сивак, Г.И. Николаев, А.С. Смоляков, С.И. Шахов // Металлург. – 2011. – №3. – С. 34–36.
28. Модернизация МНЛЗ для литья круглых заготовок на Волжском трубном заводе / А.Г. Ляльков, В.И. Маркович, В.В. Масный, И.В. Неклюдов, В.Б. Ганкин, А.С. Смоляков, А.В. Шапиро, И.Н. Шифрин // Металлург. – 2005. – №9. – С. 62–63.
29. Модернизация конструкции гильзовых кристаллизаторов для литья круглых заготовок / В.Б. Ганкин, А.В. Шапиро, Б.А. Сивак., Д.В. Рябков, В.М. Паршин // Металлург. – 2009. – №2. – С. 50–52.
30. Новая конструкция гильзовых кристаллизаторов для литья круглых заготовок / В.Б. Ганкин, А.В. Шапиро, Б.А. Сивак, Д.В. Рябков, В.М. Паршин // Тяжелое машиностроение. – 2009. – №4. – С. 18–20.

31. Проспект KME Germany. АМТ® – Современная технология производства кристаллизаторов. Текстурированная гильза. – 2013. – 4 с.
32. Проспект KME Germany GmbH & Co. KG — АМТ® – передовая технология изготовления кристаллизаторов. – 2013. – С. 13.
33. Высокие надежность и производительность машин непрерывной разливки сортовой стали на заводе Badische Stal Werke / М. Шмитт, А. Фолкер, Б. Жарбе, Р. Швейкле, Д.Г. Еланский // Сталь. – 2008. – №2. – С. 22–23.
34. Barbe, J. High efficiency and reliability, and high casting speed on the billet casters at BSW / J. Barbe, R. Schweikle, A. Volkert // ECCS 2005 5<sup>th</sup>. European Continuous Casting Conference. June 20–22, 2005 Nice – France– 2005. P.p. 383–389.
35. Volkert, A. High productivity billet casting at BSW / A. Volkert, S. Kromer // Millennium Steel. – 2007. P.p. 119 –122.
36. Volkert, A. High Casting Capacity with Spray cooled Molds on the Billet Casters at BSW / A. Volkert, S. Kromer // BSE Excellence Report. Published at InSteelCon 2007 June 11<sup>th</sup> – 15<sup>th</sup>, Düsseldorf. Germany. P.p. 1–8.
37. Пути повышения стабильности качества сортовых заготовок и повышения ресурса эксплуатации медных гильз кристаллизаторов / А.Б. Котельников, А.А. Вопнерук, Н.О. Блохин и др. // Сб. трудов XIV Конгресса сталеплавильщиков и производителей металла, Москва–Электросталь. 17–21.10.2016. – С. 541–546.
38. Пшенников, Е.С. Увеличение скорости литья заготовок на сортовых МНЛЗ путем применения гильз усовершенствованной конструкции // Доклад XV Конгресса сталеплавильщиков и производителей металла, Москва–Тула. 15–19.10.2018.
39. Ефимов, В.А. / Влияние внешних воздействий на жидкий и кристаллизирующийся металл // Сталь. – 1988. – №4. – С. 21–27.
40. Ефимов, В.А. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов – М.: Metallurgia, 1995. – 272 с.

41. Гуцин, В.Н. Методы исследования и разработка градиентных промышленных технологий управления тепломассообменными процессами при разливке и формировании непрерывнолитых и стационарных заготовок / В.Н. Гуцин, В.А. Ульянов. – Н. Новгород: НГТУ, 2006. – 141 с.

42. Гуцин, В.Н. Разработка способов технологического воздействия на формирование непрерывнолитых заготовок и слитков и оборудования для их реализации с целью повышения качества металла: дис. на соискание ученой степени докт. технич. наук: 05.16.02/ Гуцин Вячеслав Николаевич. – М., 2011. – 356 с.

43. Ульянов, В.А. Сравнительный анализ моделирования и промышленных исследований активных внешних воздействий на формирование слитков / В.А. Ульянов, В.Н. Гуцин, Е.М. Китаев // Известия вузов. Черная металлургия. – 1998. – №11. – С. 15–19.

44. Формирование непрерывнолитой заготовки при электрогидроимпульсном воздействии / В.Г. Герасименко, Е.В. Синегин и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2012. – №7. – С. 124–126.

45. Влияние внешнего динамического воздействия на структурную однородность непрерывнолитых слябов / В.Г. Герасименко, Е.В. Синегин, Л.С. Молчанов, Д.А. Мусунов // Міжнародні конференції: Литьє: Металлургия. Запорожская торгово–промышленная палата. – 2016. – С. 312–314.

46. Герасименко, В.Г. Влияние электрогидроимпульсного воздействия на физическую однородность стали // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2012. – №7. – С. 58–62.

47. Гуцин, В.Н. Исследование влияния внешних воздействий на развитие двухфазной зоны стальных заготовок / В.Н. Гуцин, В.А. Ульянов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – №1(103). – С. 200–203.

48. Гуцин, В.Н. Расчёт кинетики двухфазной зоны бинарных сплавов с учетом внешних воздействий / В.Н. Гуцин, В.А. Ульянов // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2007. – С. 26–28.

49. Кудрин, В.А. Внепечная обработка чугуна и стали / В.А. Кудрин. М.: Металлургия, 1992. – 336 с.
50. О способах воздействия на процесс формирования стальной непрерывнолитой заготовки / А.М. Столяров, Б. Сомнат, М.В. Потапова, С.В. Дидович // Вестник МГТУ им. Носова. – 2014. – №1. – С. 24–27.
51. Титова, Т.М. О целесообразности позднего микролегирования стали в процессе формирования непрерывнолитой заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ / Металл и литье Украины. – 2009. – №3. – С. 16–19.
52. Современные методы ввода модификаторов в расплавы чугуна и стали: сб. докладов Литейного консилиума №1 «Модифицирование как эффективный метод повышения качества чугунов и сталей» / В.И. Жучков, О.Ю. Шешуков, Е.Ю. Лозовая, Л.А. Маршук. – Челябинск: Челябинский Дом печати, 2006 – С. 52–62.
53. New methods of alloying steel in continuous casting / A. Spaccarotella, A. Ferretti, L. Liberati, R. Moretti // Commission of the European Communities technical steel research, Report EUR 10130 EN. – 1986. P.p. 74.
54. Скок, И.Я. Влияние физических и физико–химических процессов структурообразования слитков непрерывнолитой стали / И.Я. Скок, Р.Я. Якобше, В.Н. Баранова // 50 лет в Академии наук Украины: ИЛП, ИПЛ, ФТИМС. – Киев. Редакция журнала «Процессы литья». – 2008. – С. 413–423.
55. Способ модифицирования непрерывнолитой стали / В.А. Буймов, В.П. Комшуков, Ю.А. Селезнев, А.Н. Черепанов, Д.Б. Фойгт, О.Ю. Ефимов, М.В. Утробин, В.Н. Попов // патент РФ №2394664 г. Москва, МПК: B22D11/108. заявл. 2009.05.20; опубл. 20.07.2010.
56. Нанодисперсное модифицирование стали 110Г13Л / В.А. Полубояров, З.А. Коротаева, А.А. Жданок, В.А. Кузнецов // Труды Сибирского федерального университета. – 2016. – №9 (1). – С. 117–125.
57. Влияние нанопорошковых инокуляторов на структуру и свойства литого металла высокопрочных низколегированных сталей / Г.М. Григоренко, В.А. Костин, В.В. Головкин, В.В. Жуков, Т.А. Зубер // Современная электрометаллургия. – 2015. – №2. – С. 32–41.

58. Перспективные технологии модифицирования непрерывного слитка нанопорошковыми инокуляторами / Е.В. Протопопов, Л.А. Ганзер, В.П. Комшуков, Д.Б. Фойгт / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – №7. – С. 257–261.

59. Перспективные технологии повышения качества металлопродукции / Е.В. Протопопов, В.П. Комшуков, Л.А. Ганзер, Д.Б. Фойгт // *Металлургия: технологии, управление, инновации, качество: Труды Всерос. Научн–техн. конф., СГИУ. Под ред. Е.В. Протопопова*. – Новокузнецк. – 2009. – С. 3–9.

60. Исследование модифицирования металла нанопорошковыми инокуляторами в кристаллизаторе сортовой машины непрерывного литья заготовок. Теоретическое обоснование / В.П. Комшуков, А.Н. Черепанов, Е.В. Протопопов и др. // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2008. – №8. – С. 10–11.

61. Модифицирование металла нанопорошковыми инокуляторами в кристаллизаторе сортовой машины непрерывного литья заготовок. Механические и металлографические исследования / В.П. Комшуков, А.Н. Черепанов, Е.В. Протопопов и др. // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2008. – №10. – С. 21–24.

62. Модифицирование металла нанопорошковыми материалами для повышения качества слябовой непрерывнолитой заготовки / Е.В. Протопопов, Ю.А. Селезнев, А.Н. Черепанов, Д.В. Фойгт, Р.С. Айзатулов, Л.А. Ганзер // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2013. – №12. – С. 8–11.

63. Расчёт параметров физического моделирования процессов распределения инокуляторов в кристаллизаторе МНЛЗ / А.Г. Величко, Е.В. Синегин, Б.М. Бойченко, В.Г. Герасименко, Л.С. Молчанов, К.Ф. Чмырков // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2012. – №7. – С. 127–130.

64. Казачков, Е.А. Особенности образования осевой ликвации в непрерывнолитом слябе / Е.А. Казачков, А.В. Федосов // *Вестник Приазовск. ДГУ* – 2006. – №16. – С. 1–5.

65. Вайнер, Н.И. Моделирование теплообмена при непрерывной разливке стали с применением внутренних охладителей / Н.И. Вайнер, В.Д. Тутарова // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Технические науки. Машиностроение и машиноведение. – 2008. – №4. – С. 126–131.
66. Dauby, P. Application of micro-refrigerators as the active element on the crystallization of metal / P. Dauby, S. Kunstreich // ISS Tech. – 2003. P.p. 491–504.
67. Исаев, О.Б. Создание комплексной технологии улучшения внутреннего строения непрерывнолитого сляба из низколегированных сталей: дис. на соискание ученой степени докт. технич. наук: 05.16.02 / Исаев Олег Борисович. – М., 2010. – 374 с.
68. Micro-refrigerators / J. Nakashima, A. Kiyose, Y. Ohtani, J. Fukuda, T. Kawase, M. Doki // Nippon Steel Technical Report. – 2002. No. 86, July. P.p. 68–73.
69. Исаев, О.Б. Применение холодильников при непрерывной разливке слябов сортового и профильного назначения // Сталь. – 2010. – №2. – С. 14–16.
70. Разработка и освоение различных схем производства сортового и профильного проката из непрерывной слябовой заготовки / О.Б. Исаев, А.В. Воробьев, О.В. Носоченко и др. // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2003. – №8. – С. 87 – 91.
71. Непрерывная разливка стали с вводом макрохолодильников для повышения качества толстолистового проката / О.Б. Исаев, О.В. Носоченко, П.С. Лепихов Л.С. и др. // Электromеталлургия. – 2002. – №8. – С. 20–24.
72. Способ получения непрерывнолитой заготовки повышенного качества / А.А. Киричков, С.Ю. Макушев, О.В. Травин, Н.М. Александрова, Е.Х. Шахпазов, Ю.П. Петренко, П.В. Эккерт, И.Б. Чудаков, А.В. Кушнарев / патент РФ №2407606, МПК: B22D11/108. заявл. 2009.12.01; опубл. 27.12.2010.
73. Носоченко, О.В. Совершенствование технологии непрерывной разливки стали в крупногабаритные слябы для дальнейшей прокатки на тонкий лист и плиту / О.В. Носоченко, В.Г. Ленский // Plynuli adlevanio celi – X. Mezinarodni hitnicka conference, Trjines, Rijen. – 1989. – С. 360 –367.

74. 128. Shen, M. G. Mathematics simulation and experiments of continuous casting with strip feeding in mold / M.G. Shen, Z.S. Zang, K.P. Shu // *Metalurgija*. – 2017. – No.56. – 3–4. P.p. 315–318.

75. Гресс, А.В. Влияние ввода инокулирующих добавок на тепломассообменные процессы в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ. / А.В. Гресс, О.Б. Исаев, О.А. Чеботарева // *Литье. Металлургия*. 2015: Материалы XI Международной научно–практической конференции (26–28 мая 2015 г., г.Запорожье) – Запорожье. – С. 37–39.

76. Popa, E.M. Simulation tendencies in the continuously cast half–products area / E.M. Popa, M. Gabriela, A. Vasile // *Acta technica corviniensis – bulletin of engineering*. – 2010/Fascicule 1/January-March/Tome III. P.p. 95–102.

77. Popa, E.M. Simulation of the solidification front at the continuous cast half–finished product (with 3 % addition of micro–coolers in crystallizer) / E.M. Popa, V. Alexa // *MACHINE Design* / editor in chief Siniša Kuzmanović. – 2010 – Novi Sad: University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, 2010. P.p. 313–318.

78. Мочалов, А.А. Взаимодействия микрохолодильников с жидким металлом для обеспечения объемной кристаллизации / А.А. Мочалов, Н.А. Шаповал // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2015. — №3/2 (23). – С. 74–79.

79. Experimental equipment for the introduction of microholograms in the tundish and the mould installation for the continuous casting of steel / M. Ardelean, E. Ardelean, A. Socalici, T. Neput // *Annales of the Oradea University* (ISSN 1583–0691). – 2008. – Vol. 39. – No. 3. P.p. 1190–1195.

80. Мочалов, А.А. Взаимодействия микрохолодильников с жидким металлом для обеспечения объемной кристаллизации / А.А. Мочалов, Н.А. Шаповал // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2015. – №3/2 (23). – С. 74–79.

81. Ardelean, E. Possibilities regarding using of micro–coolers in steel continuous casting tundish / E. Ardelean, M. Ardelean, C. Abrudean // 11<sup>th</sup> International

Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT. – 2007. – Hammamet. – Tunisia. 05–09 September. P.p. 399–402.

82. Ardelean, E. Simulation of solidification process for billet with  $\phi 350$ mm section, continuous casted / E. Ardelean, A. Lascuțoni, M. Ardelean, A. Socalici, T. Neput // Proceedings of Int. Conf. on Applied Sciences. – 2015 (ICAS2015). P.p. 1–7.

83. Socalici, A. Experiments regarding the steel temperature adjustment in the mould of the continuous casting machine // 11<sup>th</sup> Int. Research/Expert Conf. «Trends in the Development of Machinery and Associated Technology» TMT. – 2007. – Hammamet. – Tunisia. 05–09 September. P.p. 319–322.

84. Голенков, М.Б. Непрерывная разливка с вводом вибрирующих расходуемых макрохолодильников как способ повышения качества макроструктуры заготовок // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2013. – №10. – С. 36–40.

85. Голенков, М.Б. Совершенствование структуры непрерывнолитых слябов путем ввода вибрирующих расходуемых холодильников в кристаллизатор МНЛЗ // Сб. трудов XI конгресса сталеплавателей, г. Нижний Тагил 3–8 октября 2010 г., – С. 413–415.

86. Формирование непрерывнолитой заготовки под воздействием вибрации / А.С. Нурадинов, А.С. Эльдарханов, А.В. Ноговицын, Е.Д. Таранов // Современные огнеупоры и эффективность их применения при производстве и разливке стали Сб. научн. тр. – Донецк: ДонНТУ. – 2013. – 200 с.

87. Нурадинов, А.С. Влияние внешних воздействий на структуру блюмовой непрерывнолитой заготовки / А.С. Нурадинов, А.С. Эльдарханов, Л.Х.–А. Саипова // Сталь. – 2014. – №3. – С. 25–27.

88. Влияние вибрации формы на тепловые процессы охлаждения отливки / А.И. Куценко, И.Ф. Селянин, Р.М. Хамитов, С.В. Морин // Ползуновский вестник. – 2005. – №2 (ч. 2) – С. 167–169.

89. Нурадинов, А.С. Изучение влияния внешних воздействий на формирование блюмовой непрерывнолитой заготовки / А.С. Нурадинов, Л. Х.–А. Саипова // Материалы IV Межд.научно–технич. конференции 30.09–4.10. 2013 г.

Краматорск «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве». – С. 176–177.

90. Influence of mechanical vibration on the solidification of a lost foam cast 356 alloy / Z. Zhong, F. Zitian, D. Xuanpu, T. Bo, P. Di and L. Jiqiang // China foundry. February – 2010. – Vol.7. – No. 1. P.p. 24–29.

91. Ульянов, В.А. Многомодульная печная и внепечная доводка и обработка стали перед непрерывной разливкой / В.А. Ульянов, В.Н. Гущин // Вести ВУЗов Черноземья. – 2009. – №2 (16). – С. 86–90.

92. Гущин, В.Н. Методы исследования и разработка градиентных промышленных технологий управления тепломассообменными процессами при разливке и формировании непрерывнолитых и стационарных заготовок / В.Н. Гущин, В.А. Ульянов. – Н. Новгород: НГТУ, 2006. – 141 с.

93. Таранов, Е.Д. Влияние модифицирования и вибрации на процессы кристаллизации и структурообразования сплавов / Е.Д. Таранов // Процессы литья. – 2010. – №5 (83). – С. 32–39.

94. Нурадинов, А.С. Влияние вибрации на теплофизические условия формирования непрерывнолитой заготовки / А.С. Нурадинов, Е.Д. Таранов, А.С. Эльдарханов // Процессы литья. – 2011. – №2 (86). – С. 34–38.

95. Глазков, А.Я. Совершенствование процессов непрерывной разливки стали / А.Я. Глазков, А.Л. Можан, К.П. Фоменко // Киев: Наукова думка – 1985. – С. 125–130.

96. Таранов, Е.Д. Формирование полунепрерывнолитых алюминиевых заготовок в условиях физического воздействия на расплав / Е.Д. Таранов, А.С. Эльдарханов, А.С. Нурадинов // Литье–2011: Материалы VII Международной научно–практической конференции. – 2011. – С. 186–187.

97. Повышение качества непрерывнолитых заготовок под воздействием вибрации / А.И. Майоров, Ю.П. Кирдеев, В.Н. Строева, А.М. Энгоян, А.Б. Цветков // Сталь. – 1984. – №11. – С. 26–27.

98. Ефимов, В.А. Влияние внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл: сб.науч.тр. / В.А. Ефимов и др. — Киев: Наукова думка, 1983. — 197 с.

99. Гуненко, В.Ю. Новые технологии непрерывной разливки стали при модернизации сталеплавильного производства РУП «БМЗ» / В.Ю. Гуненко, Д.Н. Андрианов, В.Н. Прохоренко // Литье и металлургия. — 2005. — №3 (85). — С. 81–88.

100. Виброобработка стали в кристаллизаторе МНЛЗ — перспективный способ улучшения качества заготовок / В.А. Денисов, А.С. Беседин, Г.З. Заславский, Л.К. Федоров, С.В. Барышникова // Сталь. — 1993. — №4. — С. 32–33.

101. Голенков, М.Б. Непрерывная разливка с вводом вибрирующих расходуемых макрохолодильников как способ повышения качества макроструктуры заготовок // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. — 2013. — №10. — С. 38–40.

102. Скворцов, А.А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок / А.А. Скворцов, А.Д. Акименко, В.А. Ульянов // — М.: Металлургия. — 1991. — С. 92–93.

103. Эльдарханов, А.С. Некоторые аспекты применения внешних воздействий при непрерывной разливке стали / А.С. Эльдарханов, А.С. Нурадинов, В.Н. Баранова // Сталь. — 2015. — №10. — С. 17–20.

104. Розенберг, Л.З. Физика и техника мощного ультразвука. Том 3. Физические основы ультразвуковой технологии / Л.З. Розенберг— М.: Наука. — 1970. — 689 с.

105. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / В.О. Абрамов, О.В. Абрамов, В.В. Артемьев, О.М. Градов, Н.П. Коломеец, В.М. Приходько, А.С. Эльдарханов. — М.: Янус-К, 2006. — 688 с.

106. Ефимов, В.А. Технологии современной металлургии / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. — М.: Новые технологии, 2004. — 784 с.

107. Шабурова, Н.А. Импульсная и ультразвуковая обработка расплавов металлов // Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научной конференции Секции технических наук. — 2014. — С. 814–819.

108. Microstructure and mechanical properties of rheo–diecast hypereutectic Al–Si alloy with 2 % Fe assisted with ultrasonic vibration process / L Chong, W. Shusen, L. Shulin, A. Ping, W. Li // *Journal of Alloys and Compound*. – 2013. No. 568. P.p. 42–48.

109. Влияние условий затвердевания заготовок из оловянистой бронзы БрО10С2НЗ на её структуру / В.Д. Белов, Е.А. Герасименко, В.В. Гусева, А.Н. Коновалов // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 2016. – №2. – С. 26–33.

110. Ultrasonic methods of influence on the crystallization of metal / T. Kanki, K. Watanabe, Y. Miura // *Nippon Steel Technical Report*. – 2002. – No. 86. – July. P.p. 68–73.

111. Королёв, А.С. Современные способы активного воздействия на процесс кристаллизации непрерывнолитых заготовок // *Теория и технология металлургического производства*. – 2010. – №1. – С. 86–91.

112. Study of ultrasonic melt treatment on the quality of horizontal continuously cast Al–1 % Si alloy / L. Xin–tao, L. Ting–ju, L. Xi–meng, J. Jun ze // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2006. – No.13. P.p. 121–125.

113. Голенков, М.А. Разработка перспективных способов волнового резонансного воздействия для улучшения структуры непрерывно литых слябов / М.А. Голенков, П.Ю. Жихарев // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. – 2010. – №1. – С. 41–46.

114. Жихарев, П.Ю. Система наложения ультразвуковых колебаний на стенки кристаллизатора // *Сб. трудов XI конгресса сталеплавателей, г. Нижний Тагил 3–8 октября 2010 г.*, – С. 411–413.

115. Влияние ультразвуковой обработки расплава на структуру и свойства катанки из сплавов цветных металлов / А.Н. Грот, Д.Н. Красильников, В.А. Рассохин, В.И. Твердов, П.Ю. Жихарев, М.А. Голенков // *Металлург*. – 2012. – №10. – С. 78–82.

116. Опыт разработки и применения ультразвуковых технологий в ядерной энергетике / Н.М. Лебедев, Д.А. Красильников, А.П. Васильев, Г.В. Дубинин, В.П. Юрманов // *Сб. трудов межд. конференции NPC 2012, Париж, 23—27 сентября 2012 г.*

117. Смирнов, А.Н. Современные тенденции развития процессов производства и разлива стали // *Металл и литье Украины*. – 2006. – №1. – С. 7–10.
118. Бровман, М.Я. Непрерывная разливка металлов / М.Я. Бровман. – М.: ЭКОМЕТ, 2007. – 484 с.
119. Маточкин, В.А. Системы мягкого обжатия на машинах непрерывной разливки стали и их влияние на качество макроструктуры заготовок / С.В. Терлецкий, В.Э. Марушкевич // *Литье и металлургия*. – 2010. – №1 (54). – С. 201–203.
120. Непрерывное литье блюмов с мягким динамическим обжатием на заводе фирмы Posco, Корея / К. Терчелли, Д. Джакомо, А. Диттман, А. Сгро, Д.–В. Янг // *Металлургическое производство и технология*. – 2010. – №1. – С. 16–21.
121. Куберский, С.В. Экспериментальные исследования процессов мягкого обжатия непрерывнолитых сортовых заготовок в промышленных условиях / С.В. Куберский, С.М. Стриченко, А.В. Завгородний // *Восточно–Европейский журнал передовых технологий*. – 2011. – №4/7 (52). – С. 41–43.
122. Смирнов, Е.Н. Анализ существующих технологических решений и разработка варианта способа мягкого обжатия непрерывнолитых сортовых заготовок / Е.Н. Смирнов, В.Н. Ручко, Д.О. Демченко // *Обработка материалов давлением*. – 2012. – №1 (30). – С. 195–201.
123. Мошкунов, В.В. Сущность метода мягкого обжатия слябовой непрерывно–литой заготовки / В.В. Мошкунов, А.М. Столяров // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. – 2012. – №12. – С. 59–65.
124. Самойлович, Ю.А. Влияние мягкого обжатия на степень осевой химической неоднородности при производстве непрерывнолитых заготовок. Сообщение 1. Анализ существующих методов промышленной реализации и расчёта режимов мягкого обжатия / Ю.А. Самойлович, В.И. Тимошпольский // *Литье и металлургия*. – 2008. – №3 (47). – С. 99–105.
125. Siemens–VAI Metals Technologies. Continuous bloom/bean – blank casting solution. Austria. Brochure, 2009. P.p. 12–13.

126. Сотников, А.В. Системы мягкого обжатия на машинах непрерывной разливки стали и их влияние на качество макроструктуры заготовок / А.В. Сотников, С.В. Терлецкий, В.Э. Марушкевич // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2013. – №6. – С. 25–27.

127. Сотников, А.Л. Комплексная реконструкция машины непрерывной разливки стали Белорусского металлургического завода / А.Л. Сотников, А.В. Дёмин, С.В. Терлецкий // Литьё и металлургия. – 2012 – №3 (67) – С. 184–187.

128. Сотников, А.Л. Комплексная реконструкция МНЛЗ–3 Белорусского металлургического завода, направленная на повышение качества блюмов, расширение сортамента и увеличение производительности / А.Л. Сотников, А.В. Дёмин, С.В. Терлецкий // Литьё и металлургия. – 2010 – №3 (57). – С. 200–203.

129. Rail steel production at Evraz ZSMK with MSR / L. Morsut, M. Rinaldi, A. Urbano, L. Marco / Proceedings of 8th European Continuous Casting Conf., 23 – 26 June 2014, Graz, Austria. P.p. 416–425.

130. Производство высококачественных рельсов на заводе ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» в Новокузнецке // Л. Морсут, М. Ринальдини, А. Урбано, М. Лена // Металлургическое производство и технология. – 2014. – №2. – С. 36–42.

131. Kobayashi, M. Technical Progress in Steelmaking and Casting for Special Bar and Wire Steel at Muroran Works Kobayashi / M. Kohichi, I. A. Masayuki // Nippon steel technical report. – 2013. – No.104. – August, P.p. 117–122.

132. Rogberg, B. Influence of Soft Reduction on the Liquid Flow Velocity and Pore Formation in the Mushy Zone // The 2<sup>nd</sup> ISIJ–VDEh–Jernkontoret Joint Symposium 12–13 June, 2017 Stockholm, Sweden. P.p. 187–195.

133. Смирнов, Е.Н. Исследование особенностей изменения пространственной геометрии жидко–твёрдой составляющей непрерывнолитой сортовой заготовки с использованием нового способа обжатия на стадии кристаллизации / Е.Н. Смирнов, В.Н. Ручко, Д.О. Демченко // Обработка материалов давлением. – 2012. – №4 (33). – С. 189–195.

134. Smirnov, Y. Development of the method prevention of internal cracks in process of soft reduction continuously cast blooms / Y. Smirnov, V. Sklyar // Proceedings of Int. Conf. "Metal 2010". 18.-20.5.2010, Roznov pod Radhostem, Czech Republic, EU.

135. Маточкин, В.А. / Идея «мягкого обжатия» как способ управления усадочными и ликвационными процессами при затвердевании НЛЗ / В.А. Маточкин, А.Б. Стеблов, А.В. Оленченко // Литье и металлургия. – 2003. – №1. – С. 37–40.

136. Разработка головного образца системы обжатия заготовки на блюмовой МНЛЗ Белорусского метзавода / В.А. Маточкин, А.Б. Стеблов, Ю.М. Айзин, А.В. Куклев // Литье и металлургия. – 2003 – №2. – С. 110–112.

137. Богомолов, А.В. Моделирование сдвигового обжатия непрерывнолитых заготовок на алюминиевых деформируемых сплавах / А.В. Богомолов, Р.И. Сержанов, П.О. Быков // Наука и техника Казахстана. – 2010. – №3. – С. 7–10.

138. Смирнов, Е.Н. Исследование особенностей изменения пространственной геометрии жидко–твердой составляющей непрерывнолитой сортовой заготовки с использованием нового способа обжатия на стадии кристаллизации / Е.Н. Смирнов, В.Н. Ручко, Д.О. Демченко // Обработка материалов давлением. – 2012. – №4 (33). – С. 189–195.

139. Оленченко, А.В. Исследование факторов, влияющих на ликвацию углерода кордовой стали / А.В. Оленченко, М.Е. Константинов // Литье и металлургия. – 2007. – №4 (44). – С. 32–36.

140. Cherkashina, T.S. Investigation of the rolling with soft reduction of continuously cast billets / T.S. Cherkashina, T.S. Aksenov, O. Kosilov // Metal 2012. 23. – 25. 5. 2012, Brno, Czech Republic, EU.

141. Thome, R. Principles of Billet Soft–reduction and Consequences for Continuous Casting / R. Thome, K. Harste // ISIJ Int. – 2006. – Vol. 46. – No.12. P.p. 1839–1844.

142. Soft reduction in the continuous casting of billets / R. Thome, T. Ralf, V. Ostheimer, G. Ney, F. Rüppel, A.Girgensohn, U. Plociennik, W. Schmitz, C. Geerkens, M. Becker // Millennium steel. – 2007. P.p. 112–118.

143. Результаты испытания системы мягкого обжатия непрерывнолитого сляба с жидкой сердцевиной / А.М. Ламухин, А.В. Зиборов, В.Я. Имгрунт и др. // Сталь. – 2002. – №3. – С. 57–59.

144. Получение толстого листа на вертикальной УНРС с использованием «мягкого обжатия» непрерывнолитых заготовок / А.А. Степанов, А.В. Зиборов, Н.И. Купцов и др. // Metallurg. – 2005. – №6. – С. 42.

145. Мошкунов, В.В. Анализ влияния мягкого обжатия на макроструктуру слябовой непрерывнолитой заготовки из трубной стали / В.В. Мошкунов, А.М. Столяров, А.С. Казаков // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2012. – №4. – С.84–89.

146. Мошкунов, В.В. Влияния мягкого обжатия на макроструктуру слябовой непрерывнолитой заготовки из трубной стали / В.В. Мошкунов, А.М. Столяров // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, – 2012. – №4. – С. 84–89.

147. Мошкунов, В.В. Мягкое обжатие непрерывнолитых слябов толщиной 300 мм в ККЦ «ММК» / В.В. Мошкунов, А.М. Столяров, А.С. Казаков // Вестник МГТУ им. Носова. – 2011. – №11. – С. 41–45.

148. Анализ влияния параметров мягкого обжатия на качество непрерывнолитого сляба / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, М.Б. Левит, С.В. Семирягин // Сб. науч. трудов ДонГТУ. – 2013. – №40. – С. 81–86.

149. Мазур, И.П. Исследование операции "мягкого обжатия" на модельных образцах / И.П. Мазур, Т.И. Черкашина, Е.Н. Смирнов // Вестник НТУ Украины «Киевский полит. институт». – 2011. – С. 281–284.

150. Система управлением качеством непрерывнолитых заготовок / В.Ю. Авдонин, Л.В. Буланов, Н.А. Юровский, Е.П. Парфенов, Е.Г. Корзунин, А.Б. Дернягин, А.А. Смирнов // Сб. трудов и семинаров «Неделя металлов в Москве», 14–18 ноября 2005 г.: – М.: Информация–XXI век. – С. 1–7.

151. El-Bealy, M.O. Macro-segregation Quality Criteria and Mechanical Soft Reduction for Central Quality Problems in Continuous Casting of Steel // Materials Sciences and Applications. – 2014. – No.5. P.p. 724–744.

152. Humes, D.M. Dynamic Soft Reduction of Continuously Cast Slabs // Iron & Steel Technology. – 2008. – July. P.p.29–36.

153. Подбор оптимальных параметров настройки системы «мягкого обжатия» на МНЛЗ №6 для снижения осевых дефектов слябов, предназначенных для производства нефте- и газопроводных труб / С.В. Прохоров, Д.В. Юречко, А.С. Казаков, В.В. Мошкунов, Е.П. Лозовский, А.М. Столяров // Сб. трудов XII Межд. конгресса сталеплавателей. Выкса (Нижегородская область), 21–26 октября 2012 г. Изд-во Черметинформация. – 2013. – С. 286–288.

154. Мошкунов, В.В. Эффективность мягкого обжатия слябовой непрерывнолитой заготовки / В.В. Мошкунов, А.М. Столяров // Теория и технология металлургического производства. – 2012. – №12. – С. 78–82.

155. Буланов, Л.В., Системы динамического регулирования вторичного охлаждения и мягкого обжатия непрерывнолитых заготовок / Л.В. Буланов, Н.А. Юровский, Е.П. Парфёнов // Чёрные металлы, – 2006. – март. – №3. – С. 37–42.

156. Семирягин, С.В. Экспериментальная оценка условий образования трещин и выпучивания граней при мягком обжатии непрерывнолитого сляба / С.В. Семирягин, М.Б. Левит // Сб. трудов конфер. «Соврем. огнеупоры: ресурсосбереж. и примен. в металлург. технологиях» 4.09.2013, г. Донецк. – С. 166–173.

157. Modeling the Formation and the Reduction of Macrosegregation in Continuously Cast Steel Slabs / J. Domitner, M. Wu, F. Mayer, A. Ludwig, B. Kaufmann, J. Reiter, T. Schaden // Proceedings of 7th European Continuous Casting Conf. Dusseldorf, 27 June – 1 July 2011.

158. Rec, T. Numerical modeling of macrosegregation and stress–strain state distribution in slab during continue casting with soft reduction / T. Rec, A. Milenin // Archives of metallurgy and materials – 2010. – Vol.55. – Issue 3. P.p. 915–919.

159. Samoilovich, Yu. A. Destruction of the Dendritic Bridge in Soft Reduction of Continuous–Cast Slab / Yu. A. Samoilovich // Stal. – 2009. – No.2. P.p. 20–25.

160. Физическое моделирование процесса динамического мягкого обжатия непрерывнолитого сляба / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, М.Б. Левит, С.В. Семирягин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2012. – №7. – С. 133–136.

161. Расчётное исследование влияния конструктивных и технологических параметров МНЛЗ на центральную пористость слябовых заготовок: Неделя металлов в Москве. 13–17 ноября 2006 г.: сб. трудов конференций и семинаров пред. ред. кол. Н.В. Пасечник. / Л.В. Буланов, Н.А. Юровский, Е.П. Парфенов, И.Ф. Волегов, М.В. Масаев, П.А.Фарнин: – М.: ВНИИметмаш – Metallurgizdat, 2007. – С. 214–227.

162. Модификация оборудования МНЛЗ №6 с целью освоения разлива сляба толщиной 350 мм / Д.Б. Рабаджи, М.В. Злов, В.А. Авраменко, А.В. Изотов, А.А. Кульков, В.В. Мошкунов// Сб. трудов XV Конгресса сталеплавателей и производителей металла, Москва–Тула. – 15–19.10.2018. – С. 409–411.

163. Смирнов, А.Н. Исследование условий всплытия неметаллических включений при продувке аргоном жидкой ванны промежуточного ковша МНЛЗ / А.Н. Смирнов, В.Г. Ефимова, А.В. Кравченко // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2014. – №1. – С. 19–25.

164. Многофункциональный промковш для разлива чистых сталей / А.Н. Смирнов, А.В. Кравченко, А.А. Сердюков, А.Ф. Тонкушин // Сб. науч. тр. конф. «50 лет непрерывной разливки стали в Украине» (Донецк. 2010). – С.409–420.

165. Electromagnetic Devices for Continuous Steel Casting Tundishes / R. Chaudhary, K. R. Kumar, M.Seden, B. Rydholm, J.–E.A. Eriksson, H.Yang // HAL Id: hal–01334849 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal–01334849>

166. Ayata, K. Control of Teeming Rate of Steel by Rotary Type Electromagnetic Stirrer / K. Ayata, F. Takahiko // ISIJ Int. – 1989. – Vol. 29. – No.12. P.p. 1069–1075.

167. Low Superheat Teeming with Electromagnetic Stirring / K. Ayata. H. Morl. K. Taniguch, H. Matsud // ISIJ Int. – 1995. – Vol. 35. – No.6. P.p. 680–685.

168. Yokooya, S. Влияние завихрения в погружном стакане на массо– и теплоперенос в кристаллизаторе УНРС / S. Yokooya S. Takagi, M. Iguch // Новости черной металлургии за рубежом. – 1999. – №3. – С. 82–84.

169. Effects of Electromagnetic Swirling Flow in Submerged Entry Nozzle on Square Billet Continuous Casting of Steel Process / D. Li, Z. Su, C. Jin, W. Qiang // ISIJ Int. – 2013. – Vol. 53. – No.7. P.p. 1187–1194.

170. Куберский, С.В. Гидравлический расчёт промежуточного ковша МНЛЗ, оборудованного электромагнитным перемешивателем // Сб. научных трудов ДонГТУ. – 2013. – №40. – С. 87–96.

171. Иващенко, И.К. Исследование движения расплава в промежуточном ковше МНЛЗ, снабженном электромагнитным перемешивателем // Междун. конфер.: Литье: Metallurgy. – Запорожская ТПП. – 2014. – С. 332–333.

172. Куберский, С.В. Расширение функциональных возможностей промежуточного ковша МНЛЗ для условий металлургических микро–заводов / С.В. Куберский // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». – 2017. – №6 (49). – С. 57–65.

173. Куберский, С.В. Кондукционный электромагнитный перемешиватель для стальной ванны / С.В. Куберский, С.Б. Эссельбах // Черные металлы. – 2012. – №8. – С. 17–22.

174. Смирнов, А.Н. Многофункциональный промежуточный ковш для разливочных агрегатов металлургических микро–заводов / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, С.Б. Эссельбах // Сб. научных трудов ДонГТУ. – 2013. – №38. – С. 97–105.

175. Баранова, В.Н. Влияние газоимпульсного перемешивания на загрязненность металла неметаллическими включениями / В.Н. Баранова, Р.Я. Якобше, В.Л. Найдек // Процессы литья. – 2011. – №3 (87). – С. 9–14.

176. Баранова, В.Н. Влияние газоимпульсного перемешивания жидкого металла на качество слитков и непрерывнолитых слябов / В.Н. Баранова, Р.Я. Якобше, В.Л. Найдек // Процессы литья. – 2010. – №6 (84). – С. 20–26.

177. Эффективность газоимпульсного перемешивания стали в процессе формирования слитка / Р.Я. Якобше, О.В. Носаченко, В.Н. Баранова, Г.Б. Кирсанова // Процессы литья. – 1992. – №3. – С. 42–47.

178. Эльдарханов, А.С. Некоторые аспекты применения внешних воздействий при непрерывной разливке стали / А.С. Эльдарханов, А.С. Нурадинов, В.Н. Баранова // Сталь. – 2015. – №10. – С. 17–20.

179. Воздействие вибрационной и газоимпульсной обработки затвердевающего металла на гидродинамические процессы формирования непрерывнолитых заготовок / А.С. Нурадинов, А.С. Эльдарханов, В.Н. Баранова, С.С.–С. Ахтаев, Н.С. Уздиева, А.Г. Осадчий // Процессы литья. – 2014. – №6 (108). – С. 18–22.

180. Пути повышения качества металлопродукции / П.О. Быков, А.Т. Канаев, А.В. Богомолов и др. // Труды международной научно–технической конференции «Современные проблемы механики, строительства и машиностроения». Павлодар, – 2006. – Т.2. – С. 98–104.

181. Качество непрерывнолитых заготовок / П.О. Быков, Г.М. Никитин, Р.И. Сержанов, А.В. Богомолов, Ж.М. Иксан // Труды Международной научно–практической конференции «Актуальные проблемы горно–металлургического комплекса Казахстана» (6–7 декабря 2007 г.) / Мин. обр. и науки Республики Казахстан; Караганд. гос. техн. ун–т. Караганда. – 2007. – С. 379–383.

182. Королёв, А.С. Современные способы активного воздействия на процесс кристаллизации непрерывнолитых заготовок / А.С. Королёв // Теория и технология металлургического производства. – 2010. – №1. – С. 86–91.

183. Кудрин, В.А. Теория и технология производства стали – М.: Мир, 2003. – 528 с.

184. Погружной стакан / В.Н. Хлопонин, Э.А. Шумахер, И.В. Зинковский, Э.Э. Шумахер // патент РФ №2359782, г. Москва, 2009.

185. Способ непрерывной разливки стали из промежуточного ковша в кристаллизатор и погружной стакан для его реализации / Э.А. Шумахер, В.Н. Хлопонин, И.В. Зинковский, Э.Э. Шумахер // патент РФ 2236326, г. Москва, 2009.

186. Хлопонин, В.Н. Механическое перемешивание и торможение потока металла в кристаллизаторе МНЛЗ / В.Н. Хлопонин, И.В. Зинковский // Сталь. – 2010. – №1. – С. 33–37.

187. Шумахер, Э. Погружные стаканы FOSULIS конструкции Techcom улучшают качество специальных сталей / Э. Шумахер, В. Эндерс, И. Бондаренко // Литье и металлургия. – 2012. – №2 (85). – С. 113–115.

188. Кёль, Р. Улучшение качества специальных сталей в результате использования погружных стаканов FOSULIS конструкции Techcom / Р. Кёль, В.В. Эндерс, И.А. Бондаренко // *Металлург.* – 2012. – №7. – С. 36–39.

189. Внепечная обработка и разливка стали / В.А. Ульянов, В. Л. Сивков, В. Н. Гущин и др. – Н.Новгород: НГТУ им. Р.Е.Алексеева, 2008. – 129 с.

190. Скворцов, А.А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок / А.А. Скворцов, А.Д. Акименко, В.А. Ульянов. – М.: *Металлургия*, 1991. – 216 с.

191. Сургаева, Е.В. Совершенствование непрерывной разливки и повышение качества коррозионностойких титансодержащих сталей в условиях мини-агрегатов: дис. на соискание ученой степени канд. технич. наук: Сургаева Елена Васильевна: 05.16.02 – М., 2004. – 134 с.

192. Совершенствование качества непрерывнолитой заготовки при вращении металла в кристаллизаторе при помощи погружных стаканов / Е.В. Сургаева, М.П. Галкин, В.И. Брагин и др. // *Электрометаллургия.* – 2004. – №10. – С. 546–548.

193. Андрианов, Д.Н. Управление потоками стали в кристаллизаторе с помощью глуходонного стакана / Д.Н. Андрианов, М.Н. Новиков, А.И. Столяров // *Литье и металлургия.* – 2008. – №1(45). – С. 90–92.

194. Испытания безнапорных погружных стаканов при разливке колесобандажного металла / В.И. Ильин, С.К. Носов, Л.К. Федоров, Е.В. Шеховцов, В.М. Паршин // *Сталь.* – 2001. – №12. – С. 22–23.

195. Использование безнапорных погружных стаканов при отливке колесобандажного металла на МНЛЗ №1 ОАО 'НТМК' / Л.К. Федоров, Е.В. Шеховцов, В.И. Ильин, В.И. Паршин // *Сб. трудов VII конгресса сталеплавателей: (Магнитогорск, 15–17 октября 2002 г.) / Конгресс. Г.Н. Еланский.* – М.: [Б.и.], 2003.

196. Yong, T. Optimization of submerged entry nozzles to improve steel cleanliness and productivity / T. Yong, G. Hackl, G. Nitzl // *Proceedings of 8<sup>th</sup> European Continuous Casting Conf., 23 – 26 June 2014, Graz, Austria*, P.p. 487–497.

197. Вдовин, К.Н. Влияние магнитного поля на процесс кристаллизации алюминиевых расплавов / К.Н. Вдовин, Г.А. Дубский, Л.Г. Егорова // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2018. – №2. – С. 34-42.
198. Мочалов, П.П. Литье в электромагнитные кристаллизаторы / П.П. Мочалов, Э.Н. Гецелев // Цветные металлы. – 1970. – №8. – С. 62-63.
199. Микельсон, А.Э. МГД-методы и устройства в промышленности / А.Э. Микельсон, В.М. Фолифоров // Магнитная гидродинамика. – 1975. – № I. – С. 129-140.
200. Самойлович, Ю. А. Кристаллизация слитка в электромагнитном поле. – М.: Металлургия, 1996. – 168 с.
201. Разработка перспективных направлений развития отечественных ЭМП жидкой сердцевины заготовок на МНЛЗ / О.К. Храпченков, С.А. Филатов, Ф.С. Солодовник и др. // Отчёт о НИР. ВНИМЕТМАШ. - 1981. – 86 с.
202. Непрерывное литьё во вращающемся магнитном поле / А.Д. Акименко, Л.П. Орлов, Л.А.Скворцов, Л.Б.Шендеров // – М., «Металлургия», 1971. – 176 с.
203. Применение электромагнитных воздействий для повышения качества металла и производительности машин непрерывного литья заготовок / З.К. Кабаков, Ю.А. Самойлович, В.Ф. Чирихин, А.Г. Подорванов, Э.Р. Ширман, В.М. Брыксин // — Череповец: Из-во ГОУ ВПО ЧГУ, 2008. – 239 с.
204. Габелая, Д.И. Теплофизические основы технологии непрерывной разливки стали / Д.И. Габелая, З.К. Кабаков, Ю.В. Грибкова. - М.; Вологда: Изд-во "Инфра-Инженерия", 2019. – 400 с.
205. Цаплин, А.И. Моделирование теплофизических процессов и объектов в металлургии / А.И. Цаплин, И.Л. Никулин. – Пермь. Изд-во Пермского государственного технического университета., 2011. – 299 с.
206. Цаплин, А.И. Экспериментально расчётное моделирование электромагнитного перемешивания жидкого ядра слитка / А.И. Цаплин, В.Г. Грачёв // Магнитная гидродинамика. – 1987. – №2. – С. 103–108.

207. Вдовин, К.Н., Непрерывная разливка стали / К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин, И.М. Ячиков //– Магнитогорск: Из-во МГТУ им Носова, 2012. – 540 с.
208. Ефимов, В.А. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М., «Металлургия» 1995. – 272 с.
209. Щербинин, Э.В. Струйные течения вязкой жидкости в магнитном поле. – Рига: Зинатне, 1973. – 303 с.
210. Гельфгат, Ю.М. Жидкий металл под действием электромагнитных сил / Ю.М. Гельфгат, О.А. Лиелаусис, Э.В. Щербинин. – Рига: Зинатне, 1976. – 247 с.
211. Щербинин, Э.В. Кондукционное перемешивание расплава в осесимметричном магнитном поле // Магнитная гидродинамика. – 1994. – Т.30. – №2. – С. 231–236.
212. Верте, Л.А. МГД-технология в производстве черных металлов. - М., «Металлургия», 1990. – 121 с.
213. Сталеплавильное производство. Улучшение качества непрерывнолитого слитка методом электромагнитного перемешивания / В.Г. Грачёв, Н.Н. Дружинин, А.С. Смоляков и др. // Сталь. – 1983. – №9. – С. 28–30.
214. Применение электромагнитного перемешивания в технологии непрерывной разливки стали / В.Г. Грачёв, И.Н. Шифрин, В.И. Плантус и др. // Сталь. – 2005. – №1. – С. 17–20.
215. Электромагнитное перемешивание на сортовых, блюмовых и слябовых МНЛЗ / В.Г. Грачёв, И.Н. Шифрин, Б.А. Сивак и др. // Сталь. – 2002.– №11. – С. 21–26.
216. Системы электромагнитного перемешивания для промышленных машин непрерывного литья стали / И.Н. Шифрин, А.А. Целиков, В.Г. Грачёв и др. // Тяжелое машиностроение. – 2003. – №5. – С. 7–12.
217. Электромагнитное перемешивание жидкой стали в металлургии / Р.С. Айзатулов, А.Г. Кузьменко, В.Г. Грачёв, Ф.С. Солодовник, А.Ф. Ермоленко // – М., «Металлургия», 1996. – 184 с.

218. Кондукционное ЭМП при разливке стали на горизонтальной МНЛЗ / Ю.М. Рогачиков В.Б. Ганкин, В.В. Звягин, М.Ф. Панин // Сталь. – 1990. – №7. – С. 26–28.

219. Кристаллизатор-электромагнитный перемешиватель – современный синтез механического и электротехнического оборудования для получения высококачественных непрерывнолитых заготовок / Ю.М. Рогачиков, В.Г. Грачёв, Л.И. Кузьмина, И.Н. Шифрин, Б.А. Сивак // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2007. – №8. – С. 50–55.

220. Рогачиков, Ю.М. Расчёт магнитного поля статоров установок ЭМП стали // Электричество. – 2007. – №7. – С. 53–59.

221. Ayata, K. Control of Teeming Rate of Steel by Rotary Type Electromagnetic Stirrer / K. Ayata, F. Takahiko // ISIJ Int. – 1989. – Vol. 29. – No.12. P.p. 1069–1075.

222. Low Superheat Teeming with Electromagnetic Stirring / K. Ayata, H. Morl, K. Taniguch, H. Matsud // ISIJ Int. – 1995. – Vol. 35. – No.6. P.p. 680–685.

223. Бейтельман, Л. Управление процессом перемешивания в кристаллизаторах сортовых и блюмовых МНЛЗ // Сб. трудов VI конгресса сталеплавильщиков. – М.: ОАО «Черметинформация», 2001. – С. 519–525.

224. Бейтельман, Л. Улучшение качества сортовых заготовок путем электромагнитного перемешивания стали в кристаллизаторе // Сталь. – 1997. – №4. – С. 21–24.

225. Kunstreich, S. Strand EMS (S–EMS) for thick slab casters: Box–type or In–roll stirrers? / S. Kunstreich // Millenium Steel. – 2008. P.p. 122–124.

226. Kunstreich, S. Recent developments of electro–magnetic actuators for continuous casting of long and flat products / S. Kunstreich // Millennium Steel. – 2014. P.p. 64–69.

227. Stransky, K. Сортовая УНПС Concast и электромагнитное перемешивание расплава / K. Stransky, F. Kavicka, B. Sekanina // ОАО «Черметинформация». Новости черной металлургии за рубежом. – 2011. – No.1. P.p. 33–35.

228. Андрианов, Н. В. Освоение технологии разлива стали для металлокорда в условиях РУП «БМЗ» / Н.В. Андрианов, Н.Л. Годинский // *Литье и металлургия*. – 2005. – №2 (34). – С. 32–35.

229. Cabai, G. STS bloom caster for special steels / G. Cabai, F. Cabai, M. Bellina // *Millenium Steel*. – 2015. P.p. 79–85.

230. Control of columnar-to-equiaxed transition in continuous casting of 16 % Cr stainless steel / J.C. Kim, J.J. Kim, J.Y. Choi, J.H. Choi // *La metallurgia italiana*. – 2009. – September. P.p. 43–48.

231. Lehman, A. Electromagnetic equipment for non-contacting treatment of liquid metal in metallurgical processes / A. Lehman, O. Sjoden, A. Kuchaev // *Magnetohydrodynamics*. – 2006. – Vol. 42. – No.2/3. P.p. 299–306.

232. Improvement of Macrosegregation in Continuously Cast Bloom and Billet by Electromagnetic Stirring / K. Ayata, T. Mori, T. Fujimoto, T. Ohnishi, I. Wakasugi // *Transactions ISIJ*. – 1984. – Vol. 24. P.p.931–939.

233. Oh, K.S. Macrosegregation Behavior in Continuously Cast High Carbon Steel Blooms and Billets at the Final Stage of Solidification in Combination Stirring / K.S. Oh, Y.W. Chang // *ISIJ Intl*. – 1995. – Vol. 35. – No.7. P.p. 866–875.

234. ABB Industries AB Optimize<sup>IT</sup> – Electromagnetic Stirrers for Billet and Bloom casters. – 2016.

235. Грачёв, В.Г. Исследование, разработка и создание оборудования электромагнитного перемешивания жидкой стали в сортовых машинах непрерывного литья заготовок для улучшения качества и увеличения производительности: дис. на соискание ученой степени канд. технич. наук: Грачёв Виктор Григорьевич: 05.02.13 – М., 2005. – 190 с.

236. Системы электромагнитного перемешивания для промышленных машин непрерывного литья стали / И.Н. Шифрин, А.А. Целиков А.М. Ротенберг, Ф.С. Солодовник, В.Г. Грачёв, Л.И. Кузьмина // *Тяжелое машиностроение*. – 2003. – №5. – С. 7–12.

237. Влияние интенсивности ЭМП стали в кристаллизаторе МНЛЗ на структуру непрерывнолитой круглой заготовки / Р.Я. Якобше, З.Л. Козлова, А.А.

Кучаев, В.И. Дубоделов, Ф. Сиддики, Г.И. Касьян // *Металлургия и горнорудная промышленность*. – 2006. – №2. – С. 19–23.

238. Грачёв, В.Г. Системы электромагнитного перемешивания жидкой фазы формирующегося слитка: Новые направления в развитии оборудования непрерывной разливки металлов: Материалы межд. научно–практич. семинара. 19.09.2009. / В.Г. Грачёв – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2009. – С. 25–49.

239. Travaglini, C. Casting of large diameter round blooms at Jangsu Huaigang // *Millennium Steel*. – 2008. P.p. 137–140.

240. Javurek, M. Flow Modelling in Continuous Casting of Round Bloom Strands with Electromagnetic Stirring / M. Javurek, M. Barna // *Steel research int.*– 2008. – Vol.79. – No.8. P.p. 617–626.

241. Electromagnetic Field Distribution in Two–section Slitless Mold for Soft–contact Electromagnetic Continuous Casting / B. Jin, Q. Wang, A. Gao, Y. Yu, J. He // *ISIJ Int.*, – 2009. – Vol. 49. – No.1. P.p. 44–50.

242. МГД–процессы при ЭМП жидкого металла в сортовых и блюмовых МНЛЗ / Б.А. Сивак, В.Г. Грачёв, В.М. Паршин, С.В. Зарубин, В.Г. Фисенко, А.А. Соловьев // *Металлург*. – 2009. – №8. – С. 39–46.

243. Певзнер, Б.В. Получение слитков большого сечения с улучшенными макроструктурой и поверхностью на УПНРС металлургического завода «Электросталь» // Новые направления в развитии оборудования непрерывной разливки металлов: Материалы международного научно–практического семинара / ГОУ ВПО УГТУ–УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – 2009. – С. 50–55.

244. Использование электромагнитного перемешивания в кристаллизаторах при разливке стали на сортовых МНЛЗ / Д.В. Юречко, А.В. Сапычев, В.Г. Суспицын, А.С. Казаков // *Металлург*. – 2006. – №3. – С. 50–51.

245. Особенности технологии производства высокоуглеродистой катанки / А.Б. Сычков, В.В. Парусов, И.А. Ивин, А.Ю. Дзюба, Г.С. Зайцев // *Вестник МГТУ им. Носова*. – 2014. – №1 (45). – С. 38–42.

246. Совершенствование технологии производства высококачественной катанки / А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, С.Ю. Жукова, А.В. Перчаткин, А.В. Перегудов // *Литье и металлургия*. – 2011. – №4(63). – С. 85–92.

247. Применение электромагнитного перемешивания в технологии непрерывной разливки стали / И.Н. Шифрин, В.Г. Грачёв, В.И. Плантус, С.Н. Мазанов, В.С. Зенин // *Сталь*. – 2005. – №1. – С. 17–20.

248. Влияние ЭМП стали в кристаллизаторе МНЛЗ на процессы затвердевания заготовки сечением 150×150 мм / Р.Я. Якобше, А.А. Кучаев, В.Л. Найдек, Г.И. Касьян, В.А. Белый // *Металлургия и горнорудная промышленность*. – 2012 – №1. – С. 16–18.

249. Sgro, A. A new benchmark in special steel casting: new twin–strand vertical caster at Posco specialty steel, Korea / A. Sgro, M. Rinaldi, A. Giovanni // *Proceedings of 8<sup>th</sup> European Continuous Casting Conf., 23 – 26 June 2014, Graz, Austria*. P.p. 338–346.

250. ABB Metallurgy, Tommy Jonsson, Electromagnetic stirring for Billet & Bloom casters //2012–01–26. P.p. 42–43.

251. Nippon Steel In–Mould Electro–Magnetic Stirrer «M–EMS» for Slab Caster / S. Kittaka, T. Kanki, T. Watanabe, Y. Mura // *Nippon steel technical report – 2002. – No.86. – July. 3. P.p. 68–73.*

252. Iwasaki, M. Change and Development of Steelmaking Technology / M. Iwasaki, Mi. Matsuo // *Nippon steel technical report. – 2012. – No.101. – November. P.p. 89–94.*

253. Синельников, В.А. Применение электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторе при непрерывной разливке слябов / В.А. Синельников, Г.А. Филиппов // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2014. – №7 (1375). – С. 43–50.

254. The Linear–motor Type In–mold Slab Continuous Caster / N. Genma, T. Soejima, T. Saito, M. Kimura, Y. Okaihara, H. Fukumoto, K. Ayata // *ISIJ Int.* – 1989. No.12. Vol. 29. P.p. 1056–1062.

255. Yokota, K. Electromagnetic Coil Designed by Magneto–Hydro–Dynamic–Simulation / K. Yokota, K. Fujisaki // Nippon Steel Technical Report – 2004. – No. 89. – January. P.p. 68–73.

256. ABB AB /ABB Slab Strand ElectroMagnetic Stirrers, Slab EMS, for Ferritic Stainless Steels Greatly improved quality achieved at TISCO, China. – 2015.

257. New Strong Strand Stirrer Boosting Quality for Ferritic Stainless Steel, / V. Lambert, J. Galpin, H.R. Hackl, N.P. Jacobson // Iron & Steel Technology. – 2008. – Vol. 5. – No.7. P.p. 71–79.

258. Chen, J.–H. Process Simulation of S–EMS and Its Application in Slab Continuous Casting / J.–H. Chen, L. Sheng–Yang., M.–J. Lu // China Steel Technical Report. – 2010. – No.23. P.p. 6–13.

259. Madhavan, V. Ramanarayanan Effect of annular secondary conductor in a linear electromagnetic stirrer // Sadhanaa. – 2008. – Vol. 33. – Part 5. – October. P.p. 689–698.

260. EI–Kaddah, N. Electromagnetic Stirring of steel: effect of stirrer design on mixing in horizontal Electromagnetic Stirring of steel slabs / N. EI–Kaddah, T.T. Natarajan // Second Int.Conf. on CFD of the Minerals and Process Industries CSIRO. 6–8.12. 1999. P.p. 339–344.

261. Nippon Steel Strand Electro–Magnetic Stirrer “S–EMS” for Slab Caster / S. Kittaka, T. Fukuokaya, Y. Maruki, T. Kanki // Nippon steel technical report. – 2003. – No.87. – Jan. P.p. 70–74.

262. Lin, S.–y. Electromagnetic Force Predictions of a Stand Electromagnetic Stirring System Using an Analytical Model / S.–y., Lin K. Shih–kang // China Steel Technical Report. – 2008. – No.21. P.p. 29–33.

263. Chang, F.C. Simulation of fluid flow induced by opposing AC magnetic fields in a continuous casting mold / F.C. Chang, J.R. Hull // Proceedings of 78<sup>th</sup> Steelmaking Conference and 53<sup>rd</sup> Ironmaking Conference, Nashville, TN, April 2–5, 1995.

264. Shaikh, M.B.N. Application of electromagnetic forces in continuous casting mold: A Review/ M.B. Shaikh, A.N. Maqusud, H.S. Md Irfanul // Int.journal of advances

in production and mechanical engineering (IJAPME). – 2016. – Vol. 2. – Issue 5. P.p. 43–49.

265. Кабаков, З.К. Методология обоснования параметров устройств кондуктивного электромагнитного перемешивания для повышения качества непрерывнолитых заготовок / З.К. Кабаков, Ю.А. Самойлович, В.Ф. Чирихин // *Фундаментальные исследования*. – 2006. – №1. – С. 76–78.

266. Способ электромагнитного кондукционного перемешивания жидкой фазы непрерывного слитка / Н.И. Тихонов, В.М. Трошин, В.Д. Субоч, В.М. Федотов // Пат. SU 1553232 F2 Российская федерация. В22D11/10 заявл. 1987–07–08; опубл. 30.03.1990.

267. Кирко, И.М. Устройство для электровихревого перемешивания жидкой сердцевины непрерывного литого слитка / И.М. Кирко, Ю.А. Самойлович // Пат. SU 12253719 Российская федерация. Опубл. (август) 1986.

268. Устройство для непрерывного литья стали / Ю.А. Самойлович, В.М. Поживанов, В.М. Брыксин, З.К. Кабаков // Пат. SU 1555048 Российская федерация. Опубл. (дек.) 1986.

269. Способ электромагнитного кондукционного перемешивания жидкой фазы непрерывного слитка / В.М. Федотов, В.Д. Субоч, Ю.А. Самойлович и др. // Пат. SU 1235637 Российская федерация. Опубл. (ноябрь) 1986.

270. Самойлович, Ю.А. Повышение качества непрерывного слитка при перемешивании стали в кристаллизаторе / Ю.А. Самойлович, П.Г. Шмидт, В.С. Кошман // *Сталь*. – 1980. – №3. – С. 191–193.

271. Мощность синхронного электромагнитного перемешивателя жидкого металла в кристаллизаторе / Т.В.Виштак, А.Н.Карлов, И.П.Кондратенко, А.П.Ращепкин // *Техн. Электродинамика*. – 2015. – №5. – С. 74–80.

272. Электрофизические процессы в жидкометаллических и газоразрядных процессах / И.В. Божко, И.П. Кондратенко, А.П. Ращепкин, И.П. Фальковский // *Праці Інституту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр.* — К.: ІЕД НАНУ. – 2010. — Вип 26. — С. 72–78.

273. Электромагнитная мощность магнитной системы перемешивателя жидкого металла в кристаллизаторе машин непрерывного литья заготовок / Т.В. Виштак, А.Н. Карлов, И.П. Кондратенко, А.П. Ращепкин // Вестник института электродинамики НАК Украины. – 2013. – Вып. 36. – С. 103–109.

274. Кондратенко, И.П. Синхронный магнитоэлектрический перемешиватель жидкого металла в кристаллизаторе машин непрерывного литья заготовок стали / И.П. Кондратенко, А.П.Ращепкин // Техн. електродинаміка. – 2014. – №4. – С. 126–127.

275. Zhang, S. Hydro-power type permanent magnetic stirrer for caster // S. Zhang // Пат. CN 101508012 Китай, МПК В22D 11/115. заявитель и патентообладатель Senlin Zhang; опубл. 19-Aug-2009.

276. Permanent magnetic mixer for continuous casting machine / J. Chai, X. Su, Q. You, H. Zhang, H. Wang / Пат. CN 200984633 Китай, МПК В22D 11/11; В22D 11/115. / Jianyun Chai, Xingpu Su, Qiyuan You, Huiwen Zhang, Huimin Wang; заявитель и патентообладатель Anshan Yasai Electro Magnetic; опубл. 05.12.2007.

277. Zhang, S. Hydraulically-driven permanent magnetic blender for continuous casting machine / Пат. CN 201744635 Китай, МПК В22D 11/115. / Senlin Zhang, Bing Li, заявитель и патентообладатель SENLIN ZHANG; опубл. 16.02.2011.

278. Zeng, J. Development and Application of Final Permanent Magnet Stirring during Continuous Casting of High Carbon Rectangular Billet / J. Zeng, C. Weiqing, Z. Senlin // ISIJ Int. – 2015. – Vol. 55. – No. 10. P.p. 2142–2149.

279. Карлов, А.Н. Сравнительный анализ магнито-электрических перемешивателей жидкого металла в кристаллизаторе МНЛЗ / А.Н. Карлов, И.П. Кондратенко, А. П. Ращепкин // Электромеханические системы и автоматизация. – 2011. Вып.2 (14). – С. 22–27.

280. Электромагнитное перемешивание жидкого металла в кристаллизаторе МНЛЗ с использованием постоянных магнитов / Т.В. Виштак, А.Н. Карлов, И.П. Кондратенко, А.П. Ращепкин // Вестник КГТУ им. М. Остроградского. – 2009. – №3 (56). – Ч. 2. – С. 82 – 85.

281. Смирнов, А.Н. Применение электромагнитных систем при разливке стали на современных МНЛЗ / А.Н. Смирнов: по материалам 8-й научно-технич. конфер. по электромагнитной обработке материалов ЕРМ-2015) // Сталь. – 2016. – №4 – С. 12–15.
282. Kurth, H. // Stahl Eisen, 1917, 39, (19), P. 512.
283. Shtanko, D.A. Solidification of Steel in a Magnetic Field // Zh. Tekh Fiz., 3 (6), 1933, P.p. 1085-1090.
284. Bruchanov, A. Solidification of Steel in a Rotating Magnetic Field // Stahl Eisen, 54 (1934), p. 1111.
285. Процессы непрерывной разливки /Смирнов А.Н., Пилюшенко В.Л., Минаев А.А., Момот С.В., Белобров Ю.Н. // - Донецк: Дон НТУ, 2002. – 536 с.
286. G. Speith, A. Bungeroth // Stahl Eisen, 1952, 72, (15), P.p. 869-881.
287. W. Poppmeier, B. Tarmann, O. Schnaaber // J.Met., 1966, 18, (10), P.p. 1109-1114.
288. Electromagnetic stirring and induction heating systems / Danieli-Rotelec // 2002. P. 50.
289. Kunstreich, S. Electromagnetic stirring for continuous casting // La Revue de Métallurgie – CIT. 2003. P.p. 1-16.
290. Каменская, Н.П. Применение электромагнитного перемешивания при непрерывной разливке / Н.П. Каменская, О.Д. Колесникова, И.Н. Шифрин // М.: Черметинформация, 1982, вып. 2, – 27 с.
291. Electromagnetic stirring and induction heating systems / Danieli-Rotelec // 2002. P. 50.
292. Ventavoli, R. Controle de la propte de peau des billetsde couleeecontinue der par champs electromagnetiques glissans appligues au niveau de la lingotiere / R. Ventavoli, R. Alberny, P. Birat // Report EUR, 6136/II FR, Comission of the European Communities, Luxenburg, 1978.
293. Референс лист АВВ. Системы электромагнитного перемешивания для сортовых и блюмовых МНЛЗ. 2010.

294. Стендовые испытания и исследования параметров первой опытной партии ЭМП, изготовленных электротехнической промышленностью // Отчет ВНИИМЕТМАШ. – 1987. – 74 с.

295. Limoges, J. Continuous Casting of High Carbon and Alloy Steel Billets With In-Mold Dual-Coil Electromagnetic Stirring System / J. Limoges, L. Beitelman // Proceedings of ISS 80th Steelmaking Conference, Chicago, 1997, April, P.p. 49-57.

296. Elektromagnetic Stirring for Continuous Casting of Billets and Blooms. «Rotelec» prospect. Printed in France by IMPACT GRAPHIC SA, September 1988.

297. Лякишев, Н.П. Развитие технологии непрерывной разливки / Н.П. Лякишев, А.Г. Шалимов. – М.: «Элиз», 2002. - 208 с.

298. Shah, N.A review of the effects of electromagnetic stirring (EMS) in continuously cast steel / N. Shah, I. Moore // Iron and Steel-maker, 1982, 9, №10, P.p. 31–36.

299. Кадои, М. Применение электромагнитного перемешивания при непрерывной разливке подшипниковой стали / М. Кадои, Н. Когава // J. Iron and Steel Inst. of Japan, 1978, 64, №11, P.p. 196.

300. Якоби, Х. Электромагнитное перемешивание на МНЛЗ / Х. Якоби, Р. Штеффен // Черные металлы. М.: Metallurgia. – 1978. - №22. – С. 36–47.

301. Шмидт, П.Г. Влияние механического перемещения жидкой стали на процесс кристаллизации непрерывного слитка // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1977. - №4, - С. 35–38.

302. Улучшение качества непрерывнолитого слитка методом электромагнитного перемешивания / Н.Н. Дружинин, А.А. Целиков, Ф.С. Солодовник и др. // Сталь. – 1983. - №9. – С. 28–30.

303. Применение электромагнитных воздействий для повышения качества металла и производительности машин непрерывного литья заготовок / З.К. Кабаков, Ю.А. Самойлович, В.Ф. Чирихин, А.Г. Подорванов, Э.Р. Шифман, В.М. Брыксин // Монография. – Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2008. – 239 с.

304. Experimental Investigations of Rotary Electromagnetic Mould Stirring in Continuous Casting Using a Cold Liquid Metal Model / B. Willers, M. Barna, J. Reiter, S. Eckert // *ISIJ International*, Vol. 57 (2017), No. 3, P.p. 468–477.

305. Experimental and Computational Investigation Stirring in a Woods Metal System of Rotary Electromagnetic in a Woods Metal System// J. Partinen. N. Saluja, J. Szekely, J. Kirtley Jr. // *ISIJ Int.* Vol. 34 (1994). No.9, P.p. 707-714.

306. Experimental and Numerical Modelling of the Steel Flow in a Continuous Casting Mould Under the Influence of a Transverse DC Magnetic Field / K. Timmel, X. Miao, D. Lucas, S. Eckert, G. Gerbeth // *Proceedings of Int. Scientific Colloquium “Modelling for Material”*. - Riga, September 16-17, 2010, P.p. 241-246.

307. Смирнов, А.Н. Исследование особенностей формирования кристаллической структуры непрерывнолитой заготовки при принудительном перемешивании ее жидкой сердцевины / А.Н. Смирнов, В.Е. Ухин, А.П. Верзилов // *Металл и литье Украины*. - 2019. - № 5-6 (312-313). – С.21-27.

308. Influence of Electromagnetic Pressure on the Early Solidification in a Continuous Casting Mold / I.S. Miyoshino, I. Takeuchi, H. Yano, J. Sakane, T. Saeki, H. Kajioaka // *ISIJ Int.*, Vol. 29 (1989), No.12, P.p. 1040-1047.

309. Остроумов, Г.А. Физико-математические основы магнитного перемешивания расплавов. М., Metallurgia, 1960. – 64 с.

310. О расчёте затвердевания плоского слитка в бегущем магнитном поле / В.А. Берзинь, Я.Я. Клявинь, Н.С. Бугров и др. // В сб. «Седьмое Рижское совещание по магнитной гидродинамике», Рига, Зинатне, – 1972. – С. 56–58.

311. Гецелев, З.Н., Расчёт поля скоростей, возникающего в жидкой фазе слитка под действием электромагнитных сил / З.Н. Гецелев, Г.И. Мартынов // *Магнитная гидродинамика*. - 1975. - №2. – С. 106–111.

312. Szekely, B.I. The General Mathematical Statement of Turbulent Recircularotory Flows / B.I. Szekely, S. Asai // *Transactions of the Iron and Steel Inst. of Japan*, 1975. v.5, P.p. 270–275.

313. Szekely, B.I. Practical Application of the Mathematical Representation for Turbulent Recirculatory Flows / B.I. Szekely, S. Asai // Transactions of the Iron and Steel Inst. of Japan, 1975. v.15, №1, P.p. 276–285.
314. Самойлович, Ю.А. Гидродинамические явления при затвердевании непрерывного слитка в условиях индуктивного МГД-воздействия / Ю.А. Самойлович, Л.Н. Ясницкий, З.К. Кабаков // Магнитная гидродинамика. - 1983. - №4. – С. 123–130.
315. Цаплин, А.И. Исследование затвердевания непрерывного слитка при электромагнитном перемешивании / А.И. Цаплин, К.С. Галягин // Отчет Пермского политехнического института. Пермь, 1983, Г.Р. N01821050901.
316. Ergolines lab. S.R.L. EMS–Electromagnetic Stirrer. – 2015.
317. Liao, Y. Applications Analysis of the Technology of Mold Electromagnetic Stirring in A Steel Mill / Y. Liao, Y. Yao // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 721. P.p. 471–474.
318. Индукционные электротехнологические устройства для целей металлургии / С.А. Бычков, Б.А. Сосунов, С.Ф. Сарапулов, В.Э. Фризен // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. – С. 1–3.
319. Fang, Q. Effects of EMS Induced Flow on Solidification and Solute Transport in Bloom Mold / Q. Fang, H. Ni, B. Wang // Metals. – 2017. – No.7(72). P.p. 1–19.
320. Analysis of the effects of electromagnetic stirring on solidification structure of bearing steel / B. Wang, Z.G. Yang, X.F. Zhang, Y.T. Wang // Metalurgija. – 2015. – No.54 (2). P.p. 327–330.
321. Влияние электромагнитного перемешивания на структуру и химическую неоднородность сортовой непрерывнолитой заготовки / А.Б. Великий, А.С. Казаков, В.П. Филиппова, А.Г. Алексеева // Вестник МГТУ им Носова. – 2007. – №4. – С. 37–39.
322. Столяров, А.М. О способах воздействия на процесс формирования стальной непрерывнолитой заготовки / А.М. Столяров, Б. Сомнат, М.В. Потапова // Вестник МГТУ им. Носова. – 2014. – С. 24–27.

323. Choudhary, S.K. Influence of Modified Casting Practice on Steel Cleanliness / S.K. Choudhary // ISIJ Int. – 2011. – Vol.51. – No.4. P.p. 557–565.

324. Nakashima, J. Improvement of Continuously Cast Slabs by Decreasing Nonmetallic Inclusions / J. Nakashima, T. Toh // Nippon steel technical report. – 2013. – No.104. – August. P.p. 42–47.

325. Wang, S. The Related Characteristics of Square Billet Continuous Casting Mold Electromagnetic Stirring / S. Wang, J. Li // Int. Journal of Science. – 2014. – Vol.1. – No.5. P.p. 46–49.

326. Шифрин, И.Н. Разработка параметров блумовых машин непрерывного литья с электромагнитным перемешиванием для производства высококачественных заготовок: дис. на соискание ученой степени канд. технич. наук: Шифрин Игорь Николаевич: 05.04.04 – М., 1984. – 205 с.

327. Hou, Z. Solidification Structure and Compactness Degree of Central Equiaxed Grain Zone in Continuous Casting Billet Using Cellular Automaton–Finite Element Method / Z. Hou, F. Jiang, G. Cheng // ISIJ Int. – 2012. – Vol.52. – No.7. P.p. 1301–1309.

328. Zhou, Shu–cai Effect of M–EMS on the macroscopic quality on TP–347 heat resistant stainless steel billet / Shu–cai Zhou // The Minerals, Metals & Materials Society. EPO Congress. – 2014. P.p. 325–330.

329. Конструкции и анализ работы оборудования для подачи стали в промежуточный ковш двухручьевого МНЛЗ / К.Н. Вдовин, С.И. Шахов, Василий В. Точилкин, А.М. Филатов, Виктор В.Точилкин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2019. – №7. – С. 67–70.

330. Конструкции системы промежуточный ковш – погружной стакан – круглый кристаллизатор сортовой МНЛЗ в условиях линейных смещений осей стакана и кристаллизатора / К.Н. Вдовин, С.И. Шахов, В.В. Точилкин, О.А. Филатова // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2019. – № 9 (Т. 75). – С. 1037–1045.

331. Вдовин, К.Н. Анализ процесса разлива металла системы промежуточный ковш - кристаллизатор сортовых МНЛЗ / К.Н. Вдовин, С.И.

Шахов // В книге: Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 76-ой международной научно-технической конференции. – 2018. – С. 171.

332. Точилкин, В.В. Конструкции и особенности процесса движения стали системы промежуточный ковш - кристаллизатор МНЛЗ // В.В. Точилкин, С.И. Шахов // В книге: «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции». – 2019. – С. 203-204.

333. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Электродинамика сплошных сред. Т.8. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц // М.: Наука, 1982. 621 с.

334. Александров, Л. Н. Кинетика образования и структуры твердых слоев: к изучению дисциплины / Под ред. А.В. Ржанова. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1972. – 228 с.

335. Данилов, В.И. Строение и кристаллизация жидкости: Избранные статьи / Под ред. Г.В. Курдюмова; АН УкрССР. Киев: Изд-во АН УкрССР, 1956. – 568 с.

336. Бояревич, В.В. Электровихревые течения / В.В. Бояревич, Я.Ж. Фрейберг, Е.И. Шилова, Э.В. Щербинин // Рига: Зинатне, 1985. – 315 с.

337. Yachikov, I.M. Modelling of electrovortex flows and heat/mass transfer in the DC ARC furnace bath // Magnetohydrodynamics. – 2016. – Vol. 52(1). – No.1. P.p. 301–310.

338. Дюльдина. Э.В. Физико-химические свойства расплавов шлакообразующих смесей, используемых при непрерывной разливке стали / Э.В. Дюльдина, В.Н. Селиванов, Е.П. Лозовский и др. // Расплавы. – 2009. – №6. – С. 3–11.

339. МГД-метод расчёта некоторых параметров течения и кристаллизации жидкого металла / Г.А. Дубский, К.Н. Вдовин, С.И. Шахов, Л.Г. Егорова, А.А. Нефедьев // Электротехнология. – 2020. – №4. – С. 2–11.

340. Совершенствование оборудования электромагнитного перемешивания в кристаллизаторах сортовых и блюмовых МНЛЗ / Шахов С.И., Сивак Б.А., Вдовин К.Н., Шахов Д.С., Керимов Р.И., Байрамов А.Т. // Черная металлургия. Бюллетень

научно-технической и экономической информации. – 2020. – №10 (Т. 76). – С. 1014–1020.

341. Смоляков, А.С. Системы электромагнитного перемешивания для машин непрерывного литья заготовок / А.С. Смоляков, С.И. Шахов, Ю.М. Рогачиков // Тяжелое машиностроение. – 2017. – №5. – С. 7–11.

342. Шахов, С.И. Работы ВНИИМЕТМАШ по применению электромагнитного перемешивания при непрерывной разливке стали / С.И. Шахов, А.С. Смоляков, Ю.М. Рогачиков // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2015. – № 10 (1310). – С. 79–84.

343. Шахов, С.И. Работы ВНИИМЕТМАШ по применению электромагнитного перемешивания при непрерывной разливке стали / С.И. Шахов, А.С. Смоляков, В.Я. Тонконогов, Ю.М. Рогачиков // Сб. трудов V междун. и практич. конференции “Modern problems of physics of metals” devoted to 80th anniversary of prof. T.M. Panahov, Baki, 10–11 June, 2016. P.p. 381–388.

344. Современные электромагнитные перемешиватели жидкой стали в кристаллизаторе и ЗВО на блюмовой МНЛЗ / В.Г. Грачёв, Б.А. Сивак, А.С. Смоляков, С.И. Шахов, А.Н. Соловьев, В.М. Паршин, С.И. Колтышев, А.М. Комаров // Тяжёлое машиностроение. – 2011. – №2. – С. 18–22.

345. Шахов, С.И. Влияние электромагнитного перемешивания на качество непрерывнолитого металла / С.И. Шахов, И.Н. Шифрин, В.Г. Грачёв, Ф.С. Солодовник, А.В. Кутаков // Сб. трудов VI конгресса сталеплавателей. г. Череповец, октябрь, 2001. – С. 530–536.

346. Применение электромагнитного перемешивания в технологии непрерывной разливки стали / И.Н. Шифрин, А.А. Целиков, С.И. Шахов, А.М. Ротенберг, Ф.С. Солодовник, В.Г. Грачёв, Л.И. Кузьмина // Сб. трудов Всероссийской научно–технич. конфер., посвящ. 100–летию со дня рождения академика А.И. Целикова, апрель 2004, МГТУ им. Н.Э. Баумана г. Москва. – С. 17–23.

347. Статический преобразователь частоты для электромагнитного перемешивания жидкой стали / А.В. Васильев, В.Г. Грачёв, В.И. Кузькин и др. // Электротехника. – 2002. - №12. – С.27-30.

348. Nutte. Справочник для инженеров, техников и студентов // – Государственное научно-техническое издательство по машиностроению и металлообработке, 1933.

349. Способ электромагнитного перемешивания жидкой фазы непрерывнолитой заготовки индукторами с бегущим электромагнитным полем / И.Н. Шифрин, С.И. Шахов, А.С. Смоляков, В.Г. Грачёв, А.И. Цаплин // патент РФ №2325970, г. Москва, 2008 г.

350. Шахов, С.И. Электромагнитное перемешивание жидкой стали при непрерывной разливке слябовой, блюмовой и сортовой заготовки / С.И. Шахов, И.Н. Шифрин, А.Х. Чарный, В.Г. Грачёв // Сб. трудов I конгресса сталеплавильщиков, г. Москва. – 1992. – Октябрь. – С. 290–293.

351. Влияние электромагнитного перемешивания на качество непрерывнолитого металла / С.И. Шахов, И.Н. Шифрин, В.Г. Грачёв, Ф.С. Солодовник, А.В. Кутаков // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2001. – № 10. – С. 26–30.

352. Разработка системы электромагнитного перемешивания при модернизации горизонтальной МНЛЗ/ С.И. Шахов, К.Н. Вдовин, Ю.М. Рогачиков, Д.С. Шахов // Бюллетень «Черная металлургия». – 2019. –№3 (Т. 75). – С. 344–350.

353. Improvement of built-in electromagnetic stirring in the molds of bloom continuous-casting machines / Shakhov S.I., Vdovin K.N., Kerimov R.I., Rogachikov Y.M., Shakhov D.S. // Metallurgist. – 2020. - Vol. 64. Nos. 5-6, September, P.p. 410-416.

354. Реконструкция действующей сортовой МНЛЗ Vaku Steel Company с целью литья круглых заготовок для нужд трубной промышленности / А.С. Смоляков, С.И. Шахов, Р.И. Керимов, О.Ю. Рафиев // Бюллетень «Черная металлургия». – 2017. – №1 (1405). – С. 43–46.

355. Smolyakov, A.S. Modernization of Baku Steel Company Metallurgical Plant Section CBCM for Producing Round Pipe Billets / A.S. Smolyakov, S.I. Shakhov, R. Kerimov // Metallurgist. – 2017. – Vol.61. – No. 7–8. November. P.p. 543–548.

356. Шахов, С.И. Модернизация действующей сортовой МНЛЗ завода «Baku Steel Company» с целью производства круглых трубных заготовок / С.И. Шахов, Р.И. Керимов // Тяжелое машиностроение. – 2018. – № 5. – С. 9–13.

357. Усовершенствование оборудования для электромагнитного перемешивания жидкой стали в кристаллизаторах МНЛЗ / С.И. Шахов, К.Н. Вдовин, Ю.М. Рогачиков, Д.С. Шахов // Бюллетень «Черная металлургия». – 2019. – №7 (Т. 75). – С. 828–834.

358. Смоляков, А.С. Разработки ВНИИМЕТМАШ систем электромагнитного перемешивания для машин непрерывного литья заготовок / А.С. Смоляков, С.И. Шахов, Ю.М. Рогачиков // Бюллетень «Черная металлургия». – 2017. – №2 (1406). – С. 33–38.

359. Разработка системы электромагнитного перемешивания жидкой стали в кристаллизаторах сортовых и блюмовых МНЛЗ / С.И. Шахов, Б.А. Сивак, Ю.М. Рогачиков, К.Н. Вдовин // Тяжелое машиностроение. – 2020. – №5-6. – С. 34-36.

360. Шахов, С.И. Разработка оборудования для электромагнитного перемешивания жидкой стали в кристаллизаторах МНЛЗ / С.И. Шахов, Б.А. Сивак, К.Н. Вдовин, Ю.М. Рогачиков, Д.С. Шахов // Материалы Недели металлов в Москве. Сборник трудов конференций 12-15 2019 г. – М.: ВНИИМЕТМАШ. – 2020. – С. 274-279.

361. Development of a System for Electromagnetic Stirring of Liquid Steel in Molds of Billet and Bloom CCMS / B.A. Sivak, S.I. Shakhov, K.N. Vdovin, Y.M. Rogachikov, R.I. Kerimov // Metallurgist. – 2020. – Vol. 63. – No. 9–10. P.p. 910–914.

362. Разработка системы электромагнитного перемешивания жидкой стали в кристаллизаторах сортовых и блюмовых МНЛЗ / С.И. Шахов, Б.А. Сивак, Ю.М. Рогачиков, К.Н. Вдовин // Тяжелое машиностроение. – 2020. – №5-6. – С. 34-36.

363. Новое высокоэффективное оборудование для электромагнитного перемешивания жидкого металла при непрерывном литье круглых заготовок из

спецсплавов и легированных марок стали / С.И. Шахов, А.С. Смоляков, В.Г. Грачёв, А.А. Соловьёв // *Литьё и металлургия*. – 2011. – №3 (62). – С. 68–71.

364. Вдовин, К.Н. Электромагнитное перемешивание металла для машины полунепрерывного литья заготовок / К.Н. Вдовин, С.И. Шахов // *Теория и технология металлургического производства*. – 2019. – №1 (28). – С. 4–8.

365. Скворцов, А.А. Теплопередача и затвердевание стали в установках непрерывной разливки / А.А. Скворцов, А.Д. Акименко // М.: Металлургия, 1966. – 191 с.

366. Kreyelskis, V. The influence of mould tube taper and distortion on cast billet quality / V. Kreyelskis, J. Cook // *Steelmaking Conference Proceedings*, 1988, P.p. 349-353.

367. Ефимов, В.А. Разливка и кристаллизация стали // М.: Металлургия, 1976. – 552 с.

368. Сафронов, А.А. Освоение производства НЛЗ диам. 550 мм из трубных марок стали на МНЛЗ №2 в ЭСПК «Железный озон 32» / А.А. Сафронов, В.И. Тазетдинов, Г.В. Торохов // *Сталь*. – 2013. – №10. – С. 58–62.

369. Разливка высококачественной блюмовой заготовки. Ключевые аспекты технологии Siemens VAI / Презентация на XII конгрессе Сталеплавильщиков, Выкса, 22–26.10.2012.

370. Шахов С.И. Кристаллизатор машины непрерывного литья металла / С.И. Шахов, А.С. Смоляков, Б.А. Сивак, Е.В. Егармин, В.Н. Хребин // патент РФ №2709078, г. Москва, 2019 г.

371. Billet quality improved by electromagnetic stirring in continuous casting / S.I. Shakhov, I.N. Shifrin, A.Kh. Charnyj, L.I. Kuz'mina // *Stal'*. – 1993. – No. 4. P.p. 30–32.

372. Шахов, С.И. Электромагнитное перемешивание в кристаллизаторах сортовых МНЛЗ и качество непрерывно–литой заготовки / С.И. Шахов, К.Н. Вдовин // *Бюллетень «Черная металлургия»*. – 2019. – №8 (Т. 75). – С. 955–961.

373. Промышленная система ЭМП в кристаллизаторе сортовых машин непрерывного литья заготовок / И.Н. Шифрин, С.И. Шахов, А.М. Ротенберг, А.К.

Белитченко, И.В. Деревянченко, В.Г. Грачёв, Ф.С. Солодовник // Сб. трудов VII конгресса сталеплавильщиков, г. Магнитогорск, октябрь 2002. – С. 560–563.

374. Industrial ES System in the graded CBCM crystallizer / I.N. Shifrin, S.I. Shakhov, A.M. Rotenberg, A.K. Belitchenko, N.A. Bogdanov, V.G. Grachev, V.N. Meleshkin // *Tyazheloe Mashinostroenie*. – 2002. – No. 5. P.p. 7–9.

375. Промышленная система ЭМП в кристаллизаторе сортовых машин непрерывного литья заготовок / И.Н. Шифрин, С.И. Шахов, А.М. Ротенберг, А.К. Белитченко, Н.А. Богданов, В.Г. Грачёв, Ф.С. Солодовник // Труды междунаучно-технической конференции «Современные проблемы металлургического производства», г. Волгоград, октябрь 2002. – С. 271–279.

376. Влияние электромагнитного перемешивания на качество непрерывнолитого металла / С.И. Шахов, И.Н. Шифрин, В.Г. Грачёв, Ф.С. Солодовник, А.В. Кутаков // Сб. трудов VI конгресса сталеплавильщиков, г. Череповец, октябрь. – 2001. – С. 530-536.

377. Industrial ES System in the graded CBCM crystallizer / I.N. Shifrin, S.I. Shakhov, A.M. Rotenberg, A.K. Belitchenko, N.A. Bogdanov, V.G. Grachev, V.N. Meleshkin // *Tyazheloe Mashinostroenie*. – 2002. – No. 5. P.p. 7–9.

378. Шахов, С.И. Модернизация МНЛЗ с целью повышения качества готовой продукции / С.И. Шахов, Д.С. Шахов / *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2018. – №10 (1406). – С. 33–38.

379. Модернизация сортовых и блюмовых УНРС с целью расширения размерного и марочного сортамента отливаемых заготовок, улучшения их качества и увеличения производительности / С.И. Шахов, А.С. Смоляков, Г.И. Николаев // *Черные металлы*. – 2015. – №3 (999). – С. 25–29.

380. Шахов, С.И. Модернизация машин непрерывного литья стали с целью повышения качества готовой продукции / С.И. Шахов, Д.С. Шахов // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2018. – № 10 (1406). – С. 33–38.

381. Шахов, С.И. Разработка, исследование и промышленное освоение оборудования с устройствами электромагнитного перемешивания для блюмовых и сортовых машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ): дис. на соискание ученой степени канд. технич. наук: Шахов Сергей Иосифович: 05.02.13 – М., 2008. – 173 с.

382. Shakhov, S.I. Electromagnetic Stirring in Continuous–Casting Machines / S.I. Shakhov, K.N. Vdovin // *Steel in Translation*. – 2019. – Vol. 49. – No. 4, P.p. 261–264.

383. Шахов С.И. Технологии и оборудование ВНИИМЕТМАША для электромагнитного перемешивания жидкого металла при непрерывном литье стальных заготовок / С.И. Шахов, Ю.М. Рогачиков // В сборнике: Научно-технический прогресс в черной металлургии - 2017. Материалы III Международной научной конференции. Ответственный редактор М.А. Тимофеева. – 2017. – С. 278–285.

384. Смоляков, А.С. Разработки ВНИИМЕТМАШ систем электромагнитного перемешивания для машин непрерывного литья заготовок / А.С. Смоляков, С.И. Шахов, Ю.М. Рогачиков // Материалы Недели металлов в Москве. Сборник трудов конференций 10–13 2016 г. – М.: ВНИИМЕТМАШ. – 2017. – С. 155–165.

385. Шахов, С.И. Работы ВНИИМЕТМАШ по модернизации сортовых и блюмовых машин непрерывного литья стали с целью расширения сортамента отливаемых заготовок, улучшения их качества и увеличения производительности / С.И. Шахов, А.С. Смоляков, Г.И. Николаев // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации* – 2015. – № 8 (1388). – С. 45–51.

386. Модернизация действующих сортовых и блюмовых МНЛЗ с целью литья круглых заготовок для нужд трубной промышленности и транспорта / С.И. Шахов, С.Ю. Бойко, А.С. Смоляков, Г.И. Николаев, Ю.М. Рогачиков // *Электрометаллургия*. – 2016. – №6. – С. 41–48.

387. Шахов, С.И. Высокоэффективное оборудование ВНИИМЕТМАШ для электромагнитного перемешивания жидкого металла в кристаллизаторах МНЛЗ при литье круглых и сортовых заготовок / С.И. Шахов, А.С. Смоляков, В.Г. Грачёв, А.А. Соловьёв // *Литьё и металлургия*, – 2013. – №3 (72). – С.199–203.

## Приложение 1

### КОНТРАКТ №

г. Москва

21.06.2017г.

Акционерное общество Акционерная холдинговая Компания «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения имени академика Целикова» (АО АХК «ВНИИМЕТМАШ»), именуемое в дальнейшем «Поставщик», в лице Генерального директора Ковалёв Юрия Павловича, действующего на основании Устава, с одной стороны и ООО «Vaku Steel Company», именуемое в дальнейшем – «Покупатель», в лице Генерального директора Мамедова С.М., действующего на основании Устава, с другой стороны, в дальнейшем при совместном упоминании именуемые – «Стороны», заключили настоящий Контракт (далее - «Контракт») о нижеследующем:

#### ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Оборудование** – Оборудование, поставляемое Поставщиком, указанное в Приложении №1 (далее по тексту также Товар).

**Акт приема-передачи Оборудования** – документ, подписанный уполномоченными представителями сторон, подтверждающий поставку Оборудования Покупателю в соответствии с Приложением №1.

**Акт приемки гарантийных испытаний** – документ, подписанный уполномоченными представителями сторон, подтверждающий успешное достижение гарантийных параметров в соответствии с Приложением № 2.

#### 1. ПРЕДМЕТ КОНТРАКТА

1.1. Поставщик обязуется передать в собственность Покупателя, а Покупатель обязуется принять и оплатить **систему электромагнитного перемешивания в кристаллизаторах МНЛЗ-2 Vaku Steel Company** (далее по тексту «Оборудование»).

1.2. Наименование (характеристика) и количество поставляемого Оборудования указываются в Спецификации, являющейся неотъемлемой частью настоящего Контракта (Приложение 1).

1.3. Поставляемое Оборудование должно обеспечить достижение гарантийных параметров, указанных в Приложении № 2 к настоящему Контракту.

1.4. Поставщик осуществит проведение шеф-монтажных, пуско-наладочных работ на предприятии Покупателя и авторский надзор за изготовлением и вводом в эксплуатацию Оборудования и гарантийными испытаниями путем командирования своих специалистов на заводы-изготовители Оборудования и/или на завод Покупателя.

1.5. Покупатель осуществляет работы и несет обязанности по приобретению необходимых материалов, согласно Техническому заданию от Поставщика и Перечню работ (Приложение №3 к настоящему Контракту).

#### 2. ЦЕНА КОНТРАКТА И УСЛОВИЯ ОПЛАТЫ

2.1. Общая стоимость поставляемого по Контракту Оборудования составляет Евро и включает в себя упаковку и поставку на условиях FCA г. Москва, склад Поставщика (ИНКОТЕРМС 2010).

2.2. Цена на Оборудование фиксируется и остаётся неизменной с момента подписания Контракта, уполномоченными представителями обеих сторон и заверения печатями Поставщика и Покупателя.

2.3. Для проведения шеф-монтажных и пусконаладочных работ Покупатель вызывает представителей Поставщика. Время прибытия представителей Поставщика составляет 7 дней с момента письменного вызова Покупателя. Срок выполнения шеф-монтажных и пусконаладочных работ составляет 30 дней и начинается течь с момента поставки

Приложение №1  
к Контракту  
№ \_\_\_\_\_ от 21.06.2017г.

### СПЕЦИФИКАЦИЯ ПОСТАВКИ

№	Наименование	Кол-во	Цена за единицу, Евро	Стоимость всего, Евро
1	Статор электромагнитного перемешивания (ЭМП) жидкой стали в кристаллизаторах МНЛЗ-2 с электромагнитным тормозом (ЭМТ) с коробкой выводов для разливки заготовок Ø 130 мм ÷ Ø 220 мм. Вес 1 шт. – 430 кг*	3 шт.		
2	Преобразователь частоты – выпрямительный агрегат 250 А, 400 В, 3 ф, фвых 1...10 Гц (ПЧ-ВА) для статоров ЭМП-ЭМТ. Вес 1 шт. – 750 кг*	2 шт.		
3.	Комплект ЗИП на 1 ПЧ-ВА, содержащий комплект силовых узлов и плат	1 компл.		
4	Оборудование системы дистанционного управления ПЧ-ВА Вес 1 шт. – 100 кг*	1 компл.		
5	Шкаф подключения промежуточный ЭМП-ЭМТ к ПЧ-ВА. Вес 1 шт. – 20 кг*	2 шт.		
5	Гибкий силовой кабель (между ПЧ и шкафом подключения) с медными проводниками сечением 120 мм <sup>2</sup> на напряжение 0,66 кВ (3 фазы, земля).			
6	Гибкий силовой экранированный кабель (между статором ЭМП и шкафом подключения) с медными проводниками сечением 95 мм <sup>2</sup> на напряжение 0,66 кВ (3 фазы, земля)			
Итого по поставке				

\* - окончательный вес оборудования уточняется после рабочего проектирования

Поставщик:



Генеральный директор

Ю.П. Коваль

Покупатель:



Генеральный директор

С.М. Мамедов

## Приложение 2

Приложение № 1  
к Договору поставки  
от 07.11.2017г. № 08-023-17

## СПЕЦИФИКАЦИЯ №1 от 07.11.2017 г.

№ п/п	Наименование товара, работ, услуг	Кол-во	Срок выполнения	Цена с НДС за шт., руб.	Сумма с НДС, руб.
1	Техно-рабочий проект модернизации кристаллизатора и датчиков температуры гильзы, реконструкция рамы кристаллизатора и системы измерения показаний датчиков температуры.	1			
2	Разработка технологии производства непрерывно литых заготовок Ø 80 мм, Ø 100 мм и ø120 мм из легированных марок стали на ГМНЛЗ с применением ЭМП в кристаллизаторе	1			
3	Поставка статора ЭМП с коробкой выводов для разливки заготовок Ø 80 мм, Ø 100 мм и ø120 мм.	1			
4	Поставка преобразователя частоты двухфазного	1			
5	Шефмонтажные и пуско-наладочные работы (30 человеко-дней)	1			
				Итого:	
				В том числе НДС 18%	

Способ поставки товара: Доставка автотранспортом за счет Заказчика.

Адрес поставки: г. Ижевск, ул. Телегина, 30/590

Поставщик:  
Генеральный директор

Ю.П. Коваль

М.П.

Поставщик

Заказчик:

Генеральный директор

А.Ю. Кузнецов

М.П.

Заказчик

11

## Приложение 3

СПЕЦИФИКАЦИЯ № 005 от 15.06.2018 г.  
к договору на поставку № Н/25-15 от 12.08.2015 г.



АО «Волжский трубный завод», именуемое в дальнейшем «Покупатель», в лице директора по коммерческой работе Гужова Л.Г., действующего на основании доверенности № ВТ-58 от 11.03.2016 г., и Акционерное общество Акционерная холдинговая Компания «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения имени академика Целикова» (АО АХК «ВНИИМЕТМАШ»), именуемое в дальнейшем «Поставщик», в лице генерального директора Ковалева Юрия Павловича, действующего на основании Устава, заключили настоящую спецификацию о нижеследующем:

1. «Поставщик» поставляет, а «Покупатель» принимает следующую «Продукцию»:

№ п/п	Наименование/ Номенклатура	Номер чертежа "Поставщика"	Единица измерения	Количество	Цена за единицу без НДС, руб.	Сумма без НДС, руб.	Цена за единицу с НДС, руб.	Сумма с НДС, руб.
1	Катушка электромагнитного перемешивания стали ЭМПУ 880	Чертеж №26-1435496СБ	шт.	1				

Итого:

Упаковка: деревянный ящик.

- Требования к качеству: Поставляемая продукция должна соответствовать Техническим требованиям чертежа "Поставщика", согласованным "Покупателем".
- Срок поставки: в течение 8 месяцев с даты поступления предоплаты. С правом досрочной поставки.
- Условия доставки: EXW г. Москва склад Поставщика (Инкотермс-2010).
- Гарантийный срок на поставляемую продукцию составляет 12 (Двадцать) месяцев с даты поставки оборудования на склад Покупателя, при условии правильной эксплуатации в соответствии с требованиями, оговоренными инструкцией по эксплуатации при точном выполнении указаний Поставщика по монтажу и пуску оборудования.
- Отгрузочные реквизиты:  
"Грузоотправитель" АО АХК "ВНИИМЕТМАШ" г. Москва, Рязанский пр-т, д. 8а  
"Грузополучатель" АО "ВТЗ" г. Волжский, ул. 7-я Автодорога, 6

С дополнительным  
Соглашением №1

«Поставщик»  
Генеральный директор  
Ковалев Ю.П.



«Покупатель»  
Директор по коммерческой работе  
Гужова Л.Г.  
(подпись, печать)

## Приложение 4

**УТВЕРЖДАЮ:**

Заместитель генерального директора-  
директор по науке



И.В.Кабанов

12.02.2010

### Акт

внедрения системы электромагнитного перемешивания металла производства фирмы ЗАО «ЭТМ» - АО АХК ВНИИМЕТМАШ на УПНРС-1 АО «Металлургический завод «Электросталь».

Система электромагнитного перемешивания металла фирмы ЗАО «ЭТМ» - АО АХК ВНИИМЕТМАШ внедрена в промышленную эксплуатацию на УПНРС-1 металлургического завода «Электросталь» в 2009 году. Данное оборудование было предназначено для организации электромагнитного перемешивания жидкой фазы непрерывнолитой заготовки. В СПЦ-4 АО «Металлургический завод «Электросталь» работает 2-х ручьевая УПНРС-1 вертикального типа. Данная машина служит для отливки заготовок, предназначенных не только для дальнейшего переplava на ЭШП и ВДП, но и непосредственно для прямой деформации. Сечение отливаемых непрерывнолитых заготовок  $\varnothing 250$ мм.

На УПНРС-1 статор ЭМП установлен не только в кристаллизаторе (ЭМП-К), но ещё и на подвижной каретке (ЭМП-3). Применяемое оборудование позволяет осуществлять одновременную работу всех четырех статоров, обеспечивая непрерывное перемешивание жидкой сердцевины по всей длине заготовок. Также, особенностью этой системы является то, что статоры ЭМП кристаллизатора расположены внутри его корпуса, что снижает потери мощности при перемешивании металла.

Утверждаю:  
Технический директор  
СЗАО «Молдавский  
металлургический завод»



А.Н. Савьюк

### Акт

внедрения системы электромагнитного перемешивания металла  
в кристаллизаторах 6-ти ручьевой сортовой МНЛЗ Молдавского  
металлургического завода.

Мы, нижеподписавшиеся, начальник технического отдела СЗАО «ММЗ» И.В. Деревянченко и главный электрик СЗАО «ММЗ» В.И. Плантаус, составили настоящий акт о том, что в октябре 2001г. на 6-ти ручьевой сортовой МНЛЗ СЗАО «Молдавский металлургический завод» внедрена система ЭМП в кристаллизаторах.

Освоена разливка из среднеуглеродистых и высокоуглеродистых, в том числе кордовых марок сталей. При эксплуатации системы ЭМП в режиме 200 А, частоте 5...7 Гц, скорости вытягивания 2...3 м/мин и перегреве  $30 \pm 5^\circ\text{C}$  над температурой ликвидуса получены следующие металлургические результаты:

- поражённость трещинами по сечению снизилась в среднем на 0,9 балла;
- поражённость трещинами в осевой зоне снизилась в среднем на 0,3 балла;
- краевые точечные загрязнения снизились в среднем на 0,2 балла;
- коэффициент осевой ликвации уменьшился до 1,04;
- средний балл по центральной пористости снизился на 0,5 балла, максимальный балл по центральной пористости снизился с 4,0 до 2,5 балла. Центральная пористость носит рассредоточенный характер, размер пор не превышает 2 мм;
- зона равноосных кристаллов (ЗРК) увеличилась ~ в 2 раза и составляет 40...50% от размера грани заготовки в зависимости от температуры перегрева и скорости вытягивания. При снижении температуры перегрева ниже  $25^\circ\text{C}$  и скорости вытягивания ниже 2 м/мин ЗРК превышает 50%.

Начальник технического отдела  
СЗАО «ММЗ»

 И.В. Деревянченко

Главный электрик СЗАО «ММЗ»

 В.И. Плантаус

## Характеристики оборудования ЭМП, установленного на УПНРС-1:

Параметр	ЭМП-К	ЭМП-3
1. Тип обмотки – катушечная с явно выраженными полюсами		
2. Тип обмоточного провода – водопогружной с допустимой температурой жилы до 100°C		
3. Число фаз	3	
4. Соединение катушек полюсов в фазе	последовательное	
5. Соединение фаз	звезда	
6. Диапазон частот питания статора ЭМП, Гц	1,5-3,0	5,0-8,0
7. Ток фазный, А	200-225	170-225
8. Напряжение фазы максимальное, В	115-155	200-220
9. Активная мощность, кВт	64-80	55-85
10. Коэффициент мощности	0,8-0,92	0,45-0,6
11. Охлаждение обмотки статора – водой для охлаждения	кристаллизатора	корпуса каретки
12. Температура воды на входе в статор, °С	35	35
13. Давление воды в статоре, атм	до 10	
14. Внешний диаметр статора, мм	750	
15. Расстояние между полюсами, мм	437	
16. Толщина меди кристаллизатора для заготовки Ø250, мм	16	
17. Высота статора, мм	515	
18. Вес статора, кг	350	

В период внедрения системы ЭМП были опробованы различные режимы её эксплуатации (ЭМП-К: ток фазы 50 А, частота – 3 Гц), (ЭМП-3: ток фазы 175-200 А, частота – 8 Гц) и определены наиболее эффективные. Следствием применения электромагнитного перемешивания явились следующие металлургические эффекты: выравнивание температуры по сечению застывающей заготовки, улучшение качества поверхности, подкоркового слоя и осевой зоны литых заготовок, сокращение количества неметаллических включений, сокращение центральной пористости и увеличение зоны мелкозернистой структуры. В ходе проведённой работы было установлено, что ЭМП необходимо для формирования качественной сортовой заготовки.

и.о. Начальник технического отдела

Начальник ЦИЛ

  
12.02.20

И.М. Воробьева

К.В. Троянов

С.В. Муруев

  
12.02.20г.

## Приложение 5

CONTRACT No. 126/1000/04-AXK

Resita 15.06. 2018

Between:  
**TMK-RESITA S.A.**  
 Traian Lalescu Str. no. 36, Resita, Caras-Severin, Ro-320050  
 C.U.I. 1064207  
 RESITA, Romania  
 - hereinafter referred to as **CUSTOMER** -  
 and  
**VNIIMETMASH Holding Company**  
 8a, Ryazansky pr-t, 109428,  
 Moscow, RUSSIA  
 - hereinafter referred to as **SELLER**-  
 Hereinafter also referred to as  
**PARTY/PARTIES.**

**TMK-RESITA S.A.**, Cristian Drinciu – Chief Operational Officer and Cristina Vaduva, Chief Accounting Officer, acting on the basis of the Charter, hereinafter referred to as "the Customer", on the one hand,

«**VNIIMETMASH HOLDING COMPANY**», represented by **Y.P. Koval** - General Director, acting on the basis of the Charter, hereinafter referred to as "the Seller", on the other hand,

hereinafter referred to as "the Parties", have concluded the present Contract as follows:



КОНТРАКТ № 126/1000/04-АХК

г. Решица «15» 06 2018 г.

Между:  
**TMK-RESITA S.A.**  
 ул. Траяна Лалеску, 36, Решица, Караш-Северин, Ro-320050  
 C.U.I. 1064207  
 РЕШИЦА, Румыния  
 - далее по тексту «**ЗАКАЗЧИК**» -  
 и  
**АО АХК «ВНИИМЕТМАШ»**  
 Рязанский проспект, 8А  
 Москва, 109428, Россия  
 - далее по тексту «**ИСПОЛНИТЕЛЬ**»  
 Далее по тексту также «**СТОРОНА/СТОРОНЫ**».

Фирма **TMK-RESITA S.A.** в лице КРИСТИАНА ДРИНЧУ (CRISTIAN DRINCIU) – Операционный директор и КРИСТИНЫ ВЗДУВА (CRISTINA VADUVA) – Заместитель генерального директора - экономика и бухгалтерия, действующие на основании Устава, именуемые в дальнейшем "Заказчик", с одной стороны, и Акционерное общество Акционерная холдинговая Компания «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения имени академика Целикова» (**АО АХК «ВНИИМЕТМАШ»**) в лице Ю.П. Коваля, генерального директора, действующего на основании Устава, именуемое в дальнейшем "Исполнитель", с другой стороны, далее именуемые "Стороны", заключили настоящий Contract о нижеследующем:

CONTRACT No. 126/1000/04-AXK

Resita 15.06.2018

Intre:  
**TMK-RESITA S.A.**  
 Traian Lalescu Str. no. 36, Reșița, Caras-Severin, Ro-320050  
 C.U.I. 1064207  
 RESITA, Romania  
 - denumit în continuare **CUMPARATOI**  
 and  
**VNIIMETMASH Holding Company**  
 8a, Ryazansky pr-t, 109428,  
 Moscow, RUSSIA  
 - denumit în continuare **VANZATOR** -  
 Denumite în continuare si ca: **PARTEI**

**TMK-RESITA S.A.**, reprezentata prin C Drinciu – Director General Adjunct- Oț și Cristina Vaduva - Director General A Economic și Contabilitate, acționand pe Statutului, denumita în continuare "Clic de o parte,

și **VNIIMETMASH Holding Company**, reprezentata de **Y.P.Koval**– Director G acționand pe baza Statutului, denumit în continuare "Vanzator", pe de altă parte împreuna denumite în continuare ca "P incheiat prezentul Contract despre cee urmeaza:



## DEFINITIONS

**Services** – means the performing of the design & engineering services indicated in Annex No. 1 and the development of technical documentation for the casting of bloom 380mm x 340mm.

**Certificate of Acceptance** - means the document signed by the Parties' authorized representatives, confirming delivery of technical documentation and rendering of the Services according to Annex No.1

**Final Acceptance Certificate** - means the document signed by the parties' authorized representatives, confirming successful achievement of guarantee performance parameters according to Annex No.2.

**Confirmation Certificate** – means the document signed by the parties' authorized representatives, confirming the supervision activities of the Seller's specialists and the total number of man-days.

## 1. Subject of the Contract

1.1. The Seller, based on the Customer's order, shall perform the design & engineering in the scope specified in Annex No.1 to the Contract, and the development of technical documentation for casting blooms 380mm x 340mm, which is hereinafter referred as the "Services".

1.2. The Seller shall supervise the manufacturing of equipment of his design, commissioning of the equipment for casting of the bloom 380mm x 340mm and guarantee performance tests by deputing his specialists to manufacturers' plants and / or TMK-RESITA S.A.

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Услуги** – означает выполнение инжиниринга (проектно-конструкторские работы), указанного в Приложении № 1, и разработку технической документации для разливки бляма 380x340 мм.

**Акт приема-передачи** - означает документ, подписанный уполномоченными представителями сторон, подтверждающий поставку технической документации и оказание Услуг в соответствии с Приложением № 1.

**Акт окончательный приемки** – означает документ, подписанный уполномоченными представителями сторон, подтверждающий успешное достижение гарантийных параметров в соответствии с Приложением № 2.

**Подтверждающий Акт** – означает документ, подписанный уполномоченными представителями сторон, подтверждающий работу специалистов Исполнителя по авторскому надзору и общее количество человеко-дней.

## 1. Предмет Контракта

1.1. Исполнитель, по поручению Заказчика, выполнит проектно-конструкторские работы в объеме, указанном в приложении № 1 к настоящему Контракту, и осуществит разработку технологической документации для литья бляма 380x340 мм, что в дальнейшем именуется «Услуги».

1.2. Исполнитель осуществит авторский надзор за изготовлением спроектированного Исполнителем оборудования, вводом в эксплуатацию оборудования для разливки бляма 380x340 мм и гарантийными испытаниями путем командирования

## DEFINIȚII

**Servicii** - înseamnă efectuarea de engineering și servicii indicate în Anexa nr. 1 și elaborarea documentației tehnice pentru turnarea blumului 380mm x 340mm.

**Act de predare-primire** - înseamnă documentul semnat de reprezentanții împuterniciți ai părților, care confirmă predarea documentației tehnice și prestarea de servicii în conformitate cu Anexa nr. 1

**Act de recepție finală** - înseamnă documentul semnat de către reprezentanții împuterniciți ai părților care confirma îndeplinirea cu succes a parametrilor din garanția de bună execuție în conformitate cu anexa nr. 2.

**Act de confirmare** - înseamnă documentul semnat de către reprezentanții împuterniciți ai părților care confirma activitatea Vânzătorului legata de supervizare și numărul total de zile-om.

## 1. Obiectul contractului

1.1. Vânzătorul, pe baza comenzii Clientului, va efectua proiectarea și ingineria specificată în Anexa nr. 1 a Contractului și va elabora documentația tehnică pentru producerea blumului de 380 mm x 340 mm, denumită în continuare "Servicii".

1.2. Vânzătorul va asigura supervizarea fabricației echipamentului proiectat de Vânzător, punerea în funcțiune a echipamentului de turnare a bloomului 380mm x 340mm și testele de performanță

Annex No. 1  
to the Contract No. 126/1000/04-AXK  
Dated « 15 » 06 2018

Приложение № 1  
к Контракту № 126/1000/04-AXK  
от « 15 » 06 2018 г.

Anexa nr 1  
la Contractul Nr. 126/1000/04-AXK  
Data « 15 » 06 2018

**SCOPE OF SUPPLY  
of design**

**ОБЪЕМ  
проектно-конструкторских работ**

**LISTA DE FURNITURA  
pentru partea de proiectare**

1. Technical documentation for manufacturing of moulds, taking into account the reusing of the body of the existing moulds.

In the upper side of the moulds will be needed space for the installation of isotopic source Co 60 and scintillation detector made by "Berthold", similarly as with the existing from the Ø 280 / Ø 350 mm.

2. Technical documentation for manufacturing of the mould's tube (copper-silver alloy; 800 mm length) and water jacket.

3. Technical documentation for the modifications of roller sections No.3; No.4.

4. Technical documentation for manufacturing of Roller Section No.1; No.2;

5. Technical documentation for manufacturing of 2 templates used to control and for the setting of the moulds and Roller Section no 1 (and, if necessary, modification of verification stands);

6. Technical documentation for manufacturing of secondary cooling zone headers No. 1, 2, 3, 4 with nozzles made by "Lechler";

7. Technical documentation for head part and head of dummy bar;

8. Technical documentation for all rollers' profiles which must be modified.

9. Water flow trends in the mould and secondary cooling system (for each zone) correlated to

1. Рабочий проект кристаллизатора, имея в виду применение корпуса существующих кристаллизаторов.

В верхней части кристаллизатора будет предусмотрена установка изотопного источника Co 60 и сцинтилляционного детектора фирмы «Berthold», аналогично как при разливке заготовки Ø 280 / Ø 350 mm.

2. Рабочий проект гильзы (медно-серебряный сплав, 800 мм длиной и рубашки охлаждения).

3. Рабочий проект модификации роликовых секций № 3; № 4

4. Рабочий проект изготовления роликовой секций № 1; № 2;

5. Техническая документация для изготовления двух шаблонов для контроля и выставки кристаллизатора и первой секции (и если необходимо, изменение стендов проверки);

6. Рабочий проект коллекторов зон вторичного охлаждения №№ 1, 2, 3, 4 с форсунками фирмы «Lechler».

7. Рабочий проект головной части и головки затравки.

8. Техническая документация для изготовления всех профилей роликов, которые необходимо изменить.

9. Расчеты расхода воды в кристаллизаторе и на вторичное охлаждение (для каждой зоны) и

1. Documentația tehnică pentru fabricarea cristalizoarelor, ținând cont că se vor reutiliza corpurile cristalizoarelor existente. Partea de sus a cristalizoarelor va fi astfel executata astfel incit sa permită instalarea unei surse de izotopi Co 60 si a unui detector de scintilație producție "Berthold", la fel ca la echipamentul existent pentru turnarea țaglei cu diametrul de Ø 280 / Ø 350 mm.

2. Documentația tehnică pentru execuția tubului de cristalizor (din aliaj de cupru-argint; lungime 800mm) si water jacket corespunzator.

3. Documentația tehnică pentru modificarea segmentelor cu role No.3; No.4

4. Documentația tehnică de execuție a segmentelor raciite No.1; No.2;

5. Documentația tehnică de execuție a două șabloane utilizate pentru controlul și alinierea cristalizorului și a segmentului cu role nr. 1 (și, dacă va fi necesar, modificarea standurilor de control);

6. Documentația tehnică pentru execuția inelelor de racire secundara pentru zonele Nr 1, 2, 3, 4 dotate cu duze producție „Lechler”;

7. Documentația tehnică pentru partea intermediara a barei false și capul barei false;

8. Documentația tehnică de execuție a tuturor rolelor ce trebuie schimbate;

9. Calculele debitului de apă in sistemul de răcire a cristalizorului și in răcirea secundara (pentru fiecare zonă), precum si vitezele de turnare

steel indicated by the Customer.

10. Calculations of pressure and counter-pressure in hydraulic system of withdrawal stands.

сталей, указанные Заказчиком.

10. Расчеты давления и противодействия в гидросистеме тянуще-правильных клетей.

turnare pentru 10 tipuri diferite de oțeluri care se vor turna, indicate de Client.

10. Calculele presiunii și contrapresiunii în sistemul hidraulic al cajelor de tragere-îndreptare.

**CUSTOMER / ЗАКАЗЧИК/CLIENT**

COO /Операционный Директор/ Director General Adjunct - Operational  
Cristian Drinciu / Кристиан Дринчу

CEAO/Заместитель генерального директора - экономика и бухгалтерия / Director General Adjunct - Economic si Contabilitate  
Cristina Vaduva / Кристина Вадува

CFO / Заместитель генерального директора по финансам /Director General Adjunct - Financiar  
Evgeny CHERNYI/Евгений Черный

Department for Quality, Environmental and SMI / Директор качество, Окружающая среда и ИСМ /Director Calitate, Mediu si SMI  
Magdalena POPESCU/Магдалена Попеску

Executive Director / Исполнительный генеральный директор/Director General Executiv  
Ioan Romulus / Иоан Ромулус

**SELLER/ ИСПОЛНИТЕЛЬ/VANZATOR**

General Director / Генеральный директор/ Director General  
Y.P. Koval, Ю.П.Коваль



Certificate of Acceptance No. 1	Акт приема-передачи № 1	Act de predare-primire No.1
To the Contract No 126/1000/04-AXK Dated 15/06/2018	к Контракту № 126/1000/04-AXK от 15.06.2018 г.	la Contractul Nr. 126/1000/04-AXK Data 15.06.2018
Resita 28. 12. 2018	г. Решица 28. 12. 2018 г.	Resita 28. 12. 2018
<p>Between:  <b>TMK-RESITA S.A.</b>  <b>Traian Lalescu Str. no. 36, Resita, Caras-Severin, Ro-320050</b>  C.U.I. 1064207  RESITA, Romania  - hereinafter referred to as <b>CUSTOMER</b> -  and  <b>VNIIMETMASH HOLDING COMPANY</b>  8a, Ryazansky pr-t, 109428,  Moscow, RUSSIA  - hereinafter referred to as <b>SELLER</b>-  Hereinafter also referred to as <b>PARTY/PARTIES</b>.</p>	<p>Между:  <b>TMK-RESITA S.A.</b>  ул. Траяна Лалеску, 36, Решица, Караш-Северин, Ро-320050  С.У.И. 1064207  РЕШИЦА, Румыния  - далее по тексту «<b>ЗАКАЗЧИК</b>» -  и  <b>АО АХК «ВНИИМЕТМАШ»</b>  Рязанский проспект, 8А  Москва, 109428, Россия  - далее по тексту «<b>ИСПОЛНИТЕЛЬ</b>»  Далее по тексту также «<b>СТОРОНА/СТОРОНЫ</b>».</p>	<p>Intre:  <b>TMK-RESITA S.A.</b>  <b>Traian Lalescu Str. no. 36, Reșița, Caraș-Severin, Ro-320050</b>  C.U.I. 1064207  RESITA, Romania  - denumit în continuare <b>CUMPARATOR</b> -  and  <b>VNIIMETMASH Holding Company</b>  8a, Ryazansky pr-t, 109428,  Moscow, RUSSIA  - denumit în continuare <b>VANZATOR</b> -  Denumite în continuare si ca: <b>PARTIE/PARTI</b></p>
<p><b>TMK-RESITA S.A.</b>, Cristian Drinciu – Chief Operational Officer and Cristina Vaduva, Chief Accounting Officer, acting on the basis of the Charter, hereinafter referred to as "the Customer", on the one hand,  and</p>	<p>Фирма <b>TMK-RESITA S.A.</b> в лице КРИСТИАНА ДРИНЧУ (CRISTIAN DRINCIU) – Операционный директор и КРИСТИНЫ ВЗДУВА (CRISTINA VADUVA) – Заместитель генерального директора - экономиста и бухгалтерия, действующие на основании Устава, именуемые в дальнейшем "Заказчик", с одной стороны, и</p>	<p><b>TMK-RESITA S.A.</b>, reprezentata prin Cristian Drinciu – Director General Adjunct- Operatiuni si Cristina Vaduva - Director General Adjunct Economic si Contabilitate, actionand pe baza Statutului, denumita în continuare "Cumparator", pe de o parte,  si</p>
<p>«<b>VNIIMETMASH HOLDING COMPANY</b>», represented by <b>P.V. Rasskazov</b> - General Director, acting on the basis of the Charter, hereinafter referred to as "the Seller", on the other hand,  have made up the present Certificate of Acceptance that the Seller handed over and the Customer accepted the technical documentation in accordance with the conditions specified in cl. 1.1. of the Contract No 126/1000/04-AXK dated</p>	<p>Акционерное общество Акционерная холдинговая Компания «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения имени академика Целикова» (<b>АО АХК «ВНИИМЕТМАШ»</b>) в лице П.В. Рассказова, генерального директора, действующего на основании Устава, именуемое в дальнейшем "Исполнитель", с другой стороны, составили настоящий Акт приема-передачи о</p>	<p><b>VNIIMETMASH Holding Company</b>, reprezentata de <b>P.V. Rasskazov</b> – Director General, actionand pe baza Statutului, denumit în continuare "Vanzator", pe de alta parte, au intocmit acest prezentul Act de Acceptanta (act de Predare Primire) avind in vedere faptul ca Vanzatorul a inmanat si Cumparatorul a acceptat documentatia tehnica în conformitate cu conditiile specificate în paragraful alin. 1.1. din Contractul nr. 126/1000/04-AXK din 15.06.2018 și în Anexa nr. 1 la Contractul nr. 126/1000/04-AXK din 15.06.2018, care</p>

<p>15.06.2018 and in the Annex No 1 to the Contract No 126/1000/04-AXK dated 15.06.2018, which corresponds to the implementation of the full scope of the Services provided by the Contract No 126/1000/04-AXK dated 15.06.2018.</p> <p>The Customer have no objections to quality and volume of the technical documentation handed over by the Seller.</p> <p>The present Certificate of Acceptance is the basis for payment by the Customer for the services fulfilled by the Seller under the art.4.1 from the Contract No 126/1000/04-AXK dated 15.06.2018.</p>	<p>том, что Исполнитель передал, а Заказчик принял техническую документацию в соответствии с условиями, указанными в п. 1.1. Контракта № 126/1000/04-AXK от 15.06.2018 г. и в Приложении № 1 к Контракту № 126/1000/04-AXK от 15.06.2018 г., что соответствует выполнению полного объема Услуг, предусмотренных Контрактом № 126/1000/04-AXK от 15.06.2018 г. Претензий к объему и качеству переданной Продавцом технической документации Заказчик не имеет.</p> <p>Настоящий Акт приема-передачи технической документации является основанием для оплаты Заказчиком выполненных Продавцом по пункту 4.1 Контракта № 126/1000/04-AXK от 15.06.2018 г.</p>	<p>corespunde implementării întregului domeniu al Serviciilor furnizate prin contractul nr. 126/1000/04-AXK din data de 15.06.2018.</p> <p>Clientul nu are obiecții cu privire la calitatea și volumul documentației tehnice predate de către Vânzător.</p> <p>Prezentul Certificat de Acceptare este baza pentru plata de către Client pentru serviciile îndeplinite de Vânzător în baza art.4.1. din Contractul nr. 126/1000/04-AXK.</p>
---	---	--

**CUMPARATOR / ЗАКАЗЧИК / CLIENT**  
**TMK-RESITA S.A./ ТМК Решица S.A.**

Executive Director / Исполнительный генеральный директор/  
 Director Executiv  
 Ioan Romulus / Иоан Ромулус

ME Chief Engineer  
 Gabriel Baluta



**SELLER / ИСПОЛНИТЕЛЬ / VANZATOR**  
**VNIIMETMASH HOLDING COMPANY**  
**АО АХК «ВНИИМЕТМАШ»**

*Correction OK / исправлено верно /*  
*General Director / Генеральный директор /*  
*P.V. Rasskazov / П.В. Рассказов*  
 General Director / Генеральный директор / Director general  
 A.A. Rasskazov / А.А. Рассказов



## Приложение 6

Утверждаю:  
Технический директор  
СЗАО «Молдавский  
металлургический завод»

 А.Н. Савбюк



### Акт

внедрения системы электромагнитного перемешивания металла  
в кристаллизаторах 6-ти ручьевой сортовой МНЛЗ Молдавского  
металлургического завода.

Мы, нижеподписавшиеся, начальник технического отдела СЗАО «ММЗ» И.В. Деревянченко и главный электрик СЗАО «ММЗ» В.И. Плантус, составили настоящий акт о том, что в октябре 2001г. на 6-ти ручьевой сортовой МНЛЗ СЗАО «Молдавский металлургический завод» внедрена система ЭМП в кристаллизаторах.

Освоена разливка из среднеуглеродистых и высокоуглеродистых, в том числе кордовых марок сталей. При эксплуатации системы ЭМП в режиме 200 А, частоте 5...7 Гц, скорости вытягивания 2...3 м/мин и перегреве  $30 \pm 5^{\circ}\text{C}$  над температурой ликвидуса получены следующие металлургические результаты:

- поражённость трещинами по сечению снизилась в среднем на 0,9 балла;
- поражённость трещинами в осевой зоне снизилась в среднем на 0,3 балла;
- краевые точечные загрязнения снизились в среднем на 0,2 балла;
- коэффициент осевой ликвации уменьшился до 1,04;
- средний балл по центральной пористости снизился на 0,5 балла, максимальный балл по центральной пористости снизился с 4,0 до 2,5 балла. Центральная пористость носит рассредоточенный характер, размер пор не превышает 2 мм;
- зона равноосных кристаллов (ЗРК) увеличилась ~ в 2 раза и составляет 40...50% от размера грани заготовки в зависимости от температуры перегрева и скорости вытягивания. При снижении температуры перегрева ниже  $25^{\circ}\text{C}$  и скорости вытягивания ниже 2 м/мин ЗРК превышает 50%.

Начальник технического отдела  
СЗАО «ММЗ»

  
И.В. Деревянченко

Главный электрик СЗАО «ММЗ»

  
В.И. Плантус