

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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Москва 2021

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

Научный консультант:

Вдовин Константин Николаевич,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Кабаков Зотей Константинович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный
университет», г. Череповец

Золотухин Владимир Иванович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Тульский государственный
университет», г. Тула

Горбатюк Сергей Михайлович.
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСиС», г. Москва

Ведущая организация: АО «НПО «ЦНИИТМАШ», г. Москва

Защита состоится «23» июня 2021г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.111.03 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте <http://www/magtu.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Терентьев Дмитрий Вячеславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Постоянная забота передовых машиностроительных компаний («SMS-Demag», «Primetals Technologies», «Danieli» и др.) об улучшении показателей работы машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) привела к их широкому промышленному внедрению. Во всем мире свыше 1100 МНЛЗ и более 5000 ручьев производят продукцию на передовых металлургических заводах. При этом более сотни из них со сроком службы, превышающим 20 лет. Хотя многих из этих машин непрерывного и полунепрерывного литья заготовок (МПНЛЗ) 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 продукции и энергопотребления, уменьшении экологической нагрузки на окружающую среду, а также – повышении качества непрерывно-литых заготовок (НЛЗ).

Качество стальных заготовок, производимых на машинах непрерывного литья, в значительной степени зависит от конструктивных особенностей оборудования МНЛЗ и применяемой технологии разлива. Существует целая группа дефектов НЛЗ (например – центральная пористость, подсадочная ликвация, развитая дендритная структура слитка и др.), которые невозможно исключить даже, применяя передовое, современное оборудование МНЛЗ и рациональную технологию непрерывной разлива. Предотвращение или подавление развития указанных выше дефектов возможно за счёт применения различных методов внешнего физического воздействия на затвердевающий расплав, предполагающих интенсивное вмешательство в процесс кристаллизации непрерывных заготовок по ходу разлива. Одним из наиболее эффективных и технологичных способов воздействия является создание принудительно управляемого движения жидкой фазы кристаллизующегося слитка, в частности – с помощью электромагнитного перемешивания (ЭМП). На российских металлургических заводах системы ЭМП при непрерывной разливе стали, в основном, представлены оборудованием иностранного производства. Обладая рядом преимуществ, данные системы имеют существенные недостатки технологического и конструктивного характера. Кроме того, применяемые, в основном, в настоящее время на МНЛЗ гильзовые кристаллизаторы имеют конструктивное несовершенство, из-за которого кольцевой зазор между гильзой и рубашкой, по которому проходит охлаждающая гильзу вода, может иметь существенные отклонения от заданных значений. Поэтому работа, имеющая целью разработку научных основ совершенствования систем электромагнитного перемешивания и

кристаллизаторов сортовых и блюмовых МНЛЗ, а также радикальное улучшение качественных показателей их работы, является актуальной.

Степень разработанности темы

Вопросы, решаемые в представленной работе, посвящены научно-технической проблеме разработки и совершенствования систем электромагнитного перемешивания и кристаллизаторов при непрерывной разливке стали и направлены на повышение их надежности, ремонтпригодности, снижение эксплуатационных затрат и улучшение качества производимой продукции.

Оборудование и технологию ЭМП при непрерывной разливке стали начали исследовать в 50–х годах XX века, а первые публикации о промышленном применении начали появляться в 70–х годах. Практический опыт использования оборудования электромагнитного перемешивания свидетельствует, что разработка рациональных, эффективных и экономичных конструкций систем ЭМП не завершена и требует её продолжения.

Важнейшей основой для совершенствования кристаллизаторов и оборудования ЭМП являются труды отечественных и зарубежных ученых. Среди них следует отметить исследования А.Д. Акименко, Ю.А. Самойловича, З.К. Кабакова, А.И. Цаплина, К.Н. Вдовина, В.А. Ефимова, Э.В. Щербинина, Л.А. Верте, А.С. Смолякова, И.Н. Шифрина, Ю.М. Рогачикова, Т. Аята, Л. Бейтельмана, Р. Шаудхари, С. Кунстрайха и др.

Цель и задачи исследований

Целью 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 «Vaku 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 подусадочной 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 многоручьевого 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 методом металлографического исследования 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 результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на XIII–XV Конгрессах сталеплавателей (г. Полевской, 2014 г.; г. Электросталь, 2016 г.; г. Тула, 2018 г.), международной конференции

«Проблемы разливки 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 – «Создание нового оборудования для реконструкции действующих сортовых и блюмовых МНЛЗ с целью литья круглых заготовок с целью производства труб и железнодорожных осей и колес», 2015 г. и «Разработка оборудования для электромагнитного перемешивания жидкой стали в кристаллизаторах сортовых и блюмовых МНЛЗ», 2019 г. – 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 осуществлении, организации и реализации всех теоретических и экспериментальных исследований, анализе полученных результатов, систематизации 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, список использованной литературы 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении доказана своевременность работы, сформулированы цель, задачи и основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость диссертационного исследования.

В первой главе выполнена оценка современного состояния систем электромагнитного перемешивания и кристаллизаторов сортовых и блюмовых МНЛЗ.

Во всем мире владельцы существующих МНЛЗ расходуют значительные средства на то, чтобы принадлежащее им технологическое оборудование соответствовало современным требованиям. Анализ особенностей гидродинамики расплава и тепломассопереноса, происходящих на стадии затвердевания, показал, что возможно создание соответствующих мероприятий по усовершенствованию конструкции машины и технологии разлива с целью улучшения качества продукции и увеличения производительности. В связи с этим разработка новых современных, высокоэффективных и малозатратных конструктивных решений является главной задачей настоящей работы, заключающейся в устранении тех дефектов поверхности и макроструктуры производимых заготовок, которые возможно устранить путем перемешивания стального расплава с помощью электромагнитных сил, образующихся при взаимодействии внешнего магнитного поля и электрического тока.

Рассматривая эффективность ЭМП, следует отметить, что оно зависит от многих переменных факторов, главными из которых являются:

- расстояние от индуктора ЭМП до жидкой фазы слитка;
- толщина закристаллизовавшейся корки слитка в месте установки перемешивателя ЭМП;
- электротехническая характеристика материала, из которого выполнены стенки, через которые индуктор взаимодействует с жидкой сталью;
- толщина вышеупомянутой стенки;
- формат слитка как по размерам, так и по форме – круг, квадрат, прямоугольник;
- электротехнические параметры индуктора;
- необходимость использования одного типа перемешивателя и систем его питания и управления для производства заготовок различных форматов, т.е. универсальность системы ЭМП;
- необходимость установки индуктора ЭМП на расстоянии от мениска, исключающем интенсивное перемешивание расплава в зоне мениска, покрытого слоем шлакообразующей смеси;
- необходимость поддержания скорости движения стали в зоне перемешивания в пределах, обеспечивающих как улучшение качества, так и исключающих появление дефектов в виде отрицательной ликвации («белой полосы»);
- необходимость замены индуктора ЭМП конструкций инофирм на индукторы отечественной разработки.

В связи с этим, с целью решения вышеперечисленных проблем необходимо усовершенствовать существующие системы электромагнитного перемешивания и кристаллизаторы сортовых и блюмовых МНЛЗ.

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.

На основании проведенного теоретического анализа научной литературы и патентов, а также результатов промышленной эксплуатации существующих систем ЭМП и кристаллизаторов, сформулированы цель и задачи исследований, намечены методы их реализации.

Во второй главе представлены результаты теоретических исследований систем электромагнитного перемешивания жидкой стали в сортовых и блюмовых МНЛЗ

Выполнено теоретическое исследование магнитогидродинамических процессов при воздействии на жидкий металл в кристаллизаторе МНЛЗ в условиях наложения постоянного магнитного поля и электромагнитного перемешивания.

Была поставлена задача 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 в направлении, перпендикулярном плоскостям, если металл имеет конечную проводимость – σ и магнитную проницаемость – μ , близкую к единице. Требовалось найти величину – H_x (поле «сноса») в направлении скорости течения металла.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{div} \vec{H} = 0, \text{div} \vec{V} = 0, \quad (1) \\ \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{H} = (\vec{H} \nabla) \vec{V} + \frac{c^2}{4\pi\sigma} \Delta \vec{H} \quad (2) \\ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} = \frac{1}{\rho} \nabla \left(P + \frac{H^2}{8\pi} \right) + \frac{1}{4\pi\rho} (\vec{H} \nabla) \vec{H} + \nu \Delta \vec{V} \quad (3) \end{array} \right.$$

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; σ – проводимость жидкого металла, См; ρ – плотность, кг/м³; $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ – кинематическая вязкость, м²/с.

Третье слагаемое в правой части уравнения (3) есть $f = \frac{1}{c} [j\vec{H}] = \frac{1}{4\pi} [rot \vec{H} \cdot \vec{H}] = -\frac{1}{\pi} grad H^2 + \frac{1}{4\pi} (\vec{H} \nabla) \vec{H}$ – плотность объемных сил, Н/м³, в данном случае электромагнитных, входящих в первое слагаемое правой части уравнения (3).

Чтобы общую систему МГД-уравнений (1–3) привязать к задаче, выбрали систему координат, связанную с неподвижными параллельными пластинами, между которыми при $x=0$ течет жидкий металл (рисунок 1).

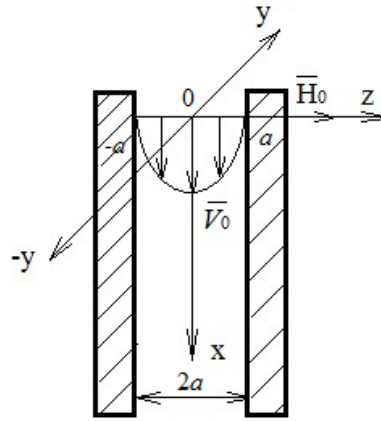


Рисунок 1 – Схематическое изображение течения жидкого металла с заданной скоростью

Для определения профиля скорости несжимаемого вязкого, проводящего и парамагнитного жидкого металла, текущего между параллельными плоскостями, а также величины магнитного поля в направлении x (поле «сноса») сделали дополнительно ряд предположений:

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

Кроме того, из уравнения (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) и (3) после некоторых преобразований для x -компоненты сводятся к следующим:

$$\begin{cases} H_0 \frac{dV}{dt} + \frac{c^2}{4\pi\sigma} \frac{d^2 H_x}{dz^2} = 0, & (4) \\ \eta \frac{d^2 V}{dz^2} + \frac{H_0}{4\pi} \frac{dH_x}{dz} = \text{const} = \frac{dP}{dx}, & (5) \end{cases}$$

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

$$-\frac{dP}{dx} = -\frac{dp}{dx} = \text{const},$$

т.е. гидростатическое давление вдоль оси x не есть величина постоянная.

Решение системы уравнений (4) и (5) проводили методом исключения. После однократного дифференцирования уравнения (5) по (d/dz) , выразив $\frac{d^2 H_x}{dt^2}$

и подставив это выражение в уравнение (4), получили дифференциальное уравнение относительно скорости:

$$\frac{dV}{dz} - \frac{c^2 \eta}{\sigma H_0^2} \frac{d^3 V}{dz^3} = 0, \quad (6)$$

где $c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu}}$ – скорость света, м/с; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, Ф/м; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; η – 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 $G = \frac{a}{k} = \frac{a H_0}{c} \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}}$ – является критерием степени влияния

магнитного поля на течение жидкого металла.

Граничные условия, соответствующие задаче, имеют следующий вид:

1) $V=0$ при $z = \pm a$, где $2a$ – расстояние между пластинами (рисунок 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 (6), получили следующее решение для скорости течения жидкого металла:

$$V = V_0 \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{a}{k}\right) - \operatorname{ch}\left(\frac{z}{k}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{a}{k}\right) - 1}. \quad (7)$$

Магнитное поле «сноса» – H_x нашли из уравнения, полученного после преобразований (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

$$V = V_0 \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{a}{k}\right) - \operatorname{ch}\left(\frac{z}{k}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{a}{k}\right) - 1},$$

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

где V_0 – скорость жидкого металла в средней плоскости $z=0$; sh и ch – гиперболические \sin и \cos . Величина поля «сноса» определяется скоростью течения металла в плоскости $z=0$, и зависит от проводимости и вязкости жидкого металла.

Среднюю скорость течения жидкого металла нашли из выражения:

$$\bar{V} = \frac{1}{2a} \int_{-a}^a V dz = -\frac{dP}{dx} \frac{ak}{\eta} \left(\operatorname{cth} \left(\frac{a}{k} \right) - \frac{k}{a} \right). \quad (8)$$

Таким образом:

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

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

магнитного поля;

в) $\left(\frac{a}{k}\right) = \frac{aH_0}{c} \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}} \gg 1$, т.е. H_0 – велико при заданных σ и η , профиль скоростей

согласно (7) имеет вид, показанный на рисунке 2.

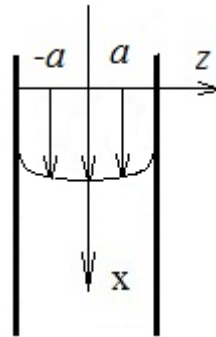


Рисунок 2 – Профиль скоростей текущего металла, при больших H_0 и заданных σ и η

Анализируя формулы, приведенные выше, сделали вывод, что выравнивание профиля скоростей слоев текущего со скоростью V жидкого металла, при включении магнитного поля в направлении перпендикулярном движению расплава, происходит за счет следующих процессов:

1) плотность потока импульсов молей из более быстрых слоев текущего жидкого металла передается в медленные слои, увеличивая суммарный импульс медленного слоя;

2) медленные слои обогащаются молями 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, увеличивая при этом градиент температуры вблизи фронта кристаллизации.

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

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 это должно влиять на скорость зарождения центров кристаллизации, на их рост, а также – на линейную скорость роста толщины закристаллизовавшегося металла (скорость движения фронта кристаллизации).

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 можно определить, как:

$$V_x = V \frac{ch(Ha) - ch\left(Ha \cdot \frac{y}{a}\right)}{Ha \cdot ch(Ha) - sh(Ha)} Ha, \text{ (м/с)}, \quad (9)$$

где V – средняя скорость потока, y – горизонтальная ось, Ha – число Гартмана, квадрат которого определяет отношение электромагнитных и вязкостных сил

$$Ha^2 = \frac{\sigma \cdot B^2 L^2}{\rho \cdot \nu}, \quad (10)$$

где 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

$$\lambda_0 = \frac{6}{Re} \quad (11)$$

а при наличии магнитного поля

$$\lambda \approx \frac{2 \cdot Ha}{Re}; \quad (12)$$

где $Re = \frac{V \cdot L}{\nu}$ – число Рейнольдса.

Оценив относительное изменение коэффициента гидравлического сопротивления при $H \sim 10^4 - 10^5$ А/м, $a \sim 0,1$ м, $\nu \sim 10^{-6}$ м²/с, получили $k \sim 5 - 50$. Поэтому гидравлическое сопротивление под действием электромагнитных сил становятся 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 $\alpha = \sigma_{ст} \cdot \delta_{ст} / (\sigma \cdot a)$ материала стенок и жидкого металла, где $\sigma_{ст}$ – эффективная электропроводность материала стенки, $\delta_{ст}$ – толщина стенки. Из-за того, что жидкий металл непосредственно не контактирует с медной стенкой, то в качестве электропроводности стенки надо брать некую эффективную электропроводность, а не электропроводность меди.

В этом случае относительное изменение коэффициента гидравлического сопротивления

$$k = \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{Ha^2}{3 \cdot F \cdot (Ha - th(Ha))}, \quad (13)$$

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

На рисунке 3 показана зависимость $k(Ha)$ при разных α .

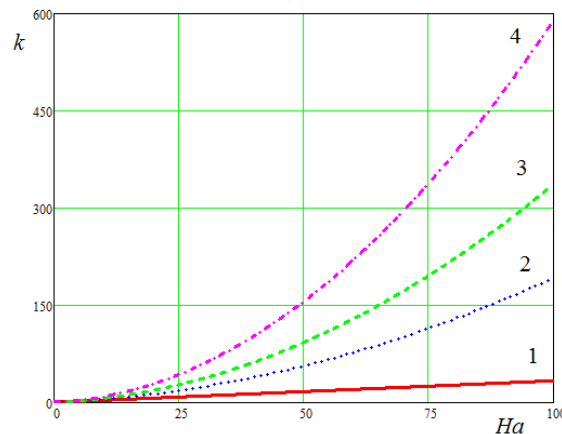


Рисунок 3 – Зависимость относительного коэффициента гидравлического сопротивления плоскопараллельного течения между двумя проводящими стенками от числа Гартмана при разной относительной проводимости материала стенок и жидкого металла α , равной 0 (1); 0,05 (2); 0,1 (3), 0,2 (4)

Видно, что при электропроводящих стенках относительный коэффициент гидравлического сопротивления пропорционален квадрату числа Гартмана и существенно зависит от α , 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 $\delta_{ст}=0,02$ 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 – $k=1300$.

Электропроводность расплавов всех шлакообразующих смесей (ШОС) зависит, в основном, от температуры и содержания оксидов щелочных металлов

$$\sigma_{\text{шл}} = 3,47(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) + 0,124t - 141,2, (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}, \quad (14)$$

где Na_2O и K_2O – содержание соответствующих компонентов в расплаве, %; t – температура, °С. Для содержания щелочных металлов в шлаке 4 % при температуре $t = 1500$ °С имеем $\sigma_{\text{шл}} = 59 (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$.

Видно, что шлак имеет довольно низкую электропроводность и, хотя эффективная 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 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 $k = \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{H a}{3}$.

По результатам исследований движения жидкого металла в поперечном магнитном сделали выводы:

1. Магнитное поле выравнивает профиль скоростей 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 перегретого жидкого металла в кристаллизаторе;

3. 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;

4. 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;

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

6. Наличие электрического контакта между жидким металлом и медным кристаллизатором с использованием ШОС с высокой электропроводностью позволит повысить эффективность электромагнитного торможения;

7. 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.

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

- 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.

Выведена зависимость скорости перемешивания V от электротехнических параметров устройств, в виде функции $V = k \cdot f(\bar{W})$, где \bar{W} – вектор электротехнических параметров, k – эмпирический коэффициент. Эту формулу, которая адаптируется по результатам экспериментальных исследований (глава 3), можно использовать при разработке исходных данных при проектировании.

На основании проведенных исследований электромагнитного перемешивания в кристаллизаторах горизонтальных МНЛЗ 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.

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

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

В результате исследований системы ЭМП наружного исполнения в кристаллизаторе блюмовой МНЛЗ для производства заготовок диаметром 150–410 мм установлено, что 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 и к несимметрии гидродинамики жидкого расплава в сечении заготовки.

Толщина стенок медных гильз кристаллизатора также существенно влияет на интенсивность ЭМП. Чем толще стенка, тем сильнее экранирование магнитного поля статора. Поэтому рациональная частота питания статора в кристаллизаторе, при которой достигаются максимальные значения сил вращения, снижается. На рисунке 4, в качестве примера, приведены расчетные зависимости силы вращения у фронта кристаллизации заготовок диаметром

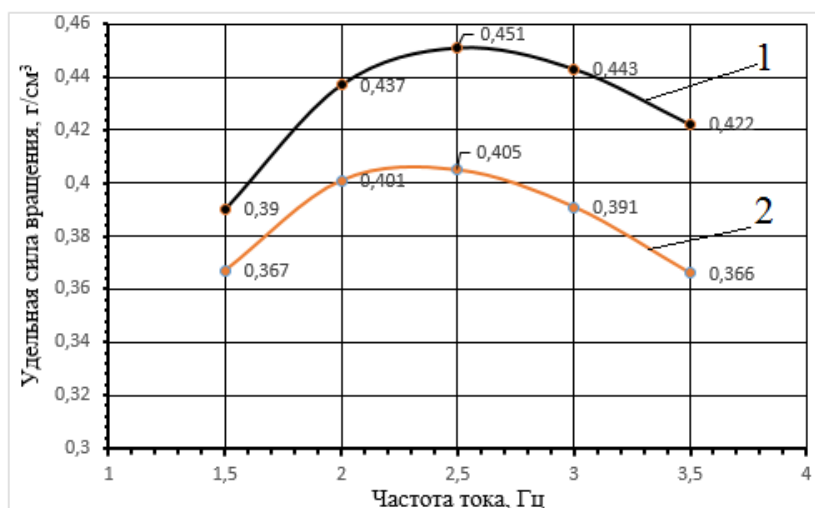


Рисунок 4 – Зависимость силы вращения в заготовках диаметром 228 мм от частоты при токе фазы 250 А (стенки гильзы толщиной: 17 (1) и 19 мм (2))

228 мм от частоты питающего тока.

На основании произведенных расчетов с использованием системы «Ansys Multiphysics» установлены рациональные частоты питающего тока для ЭМП в кристаллизаторе наружного исполнения для заготовок диаметром 228 мм 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.

В соответствии с полученными результатами при электромагнитном перемешивании в кристаллизаторе МПНЛЗ максимальные скорости жидкой фазы 0,85 м/с и 0,65 м/с достигаются у фронта затвердевания заготовок диаметром 250 мм и 360 мм при фазном токе 200 А и частоте 3,5–5,0 Гц и 1,5–2,5 Гц соответственно (рисунок 5).

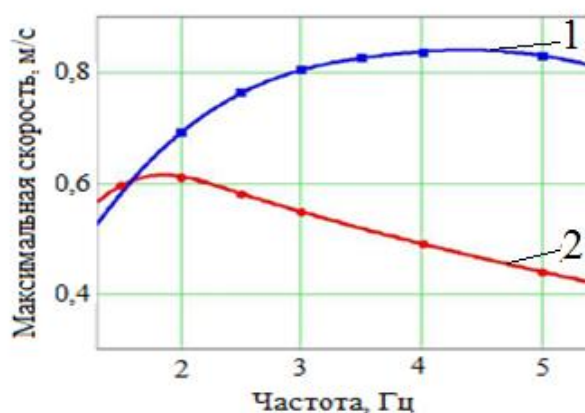


Рисунок 5 – Зависимость максимальных скоростей потоков при ЭМП в кристаллизаторе от частоты в заготовках диаметром 250 (1) и 360 мм (2)

При ЭМП в зоне окончания затвердевания максимальная скорость перемешивания 0,5–1,0 м/с достигается при частоте 7–9 Гц. Установленные скорости перемешивания находятся в интервале требуемых значений (0,3–1,0 м/с) для получения качественной макроструктуры заготовок.

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 движения жидкой стали в зависимости от частоты;
- индукции магнитного поля;
- энергетических параметров статора.

Созданная инженерная методика применяется с учетом корректировок, полученных в результате исследования статора на физической модели, рассмотренного в третьей главе.

Третья глава посвящена исследованию процесса электромагнитного перемешивания стального расплава на жидкометаллических моделях.

Для физического моделирования МГД-процессов при ЭМП, происходящих в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ, разработали лабораторный стенд в масштабе М 1:1 с использованием низкотемпературного сплава Роузе в качестве моделирующей жидкости (рисунок 6).



Рисунок 6 – Общий вид стенда (слева) и магнитопровода статора (справа) для физического моделирования МГД-процессов при ЭМП в кристаллизаторе

В лабораторных условиях исследовали параметры магнитного поля, поля скоростей расплава и электротехнические параметры статора ЭМП для заданных условий непрерывного литья. На стенде смоделировали различные режимы электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ для заготовок сечением 125x125 мм. В результате проведенных

экспериментальных исследований установлено, что скорости движения расплава 0,55-0,65 м/с достигались при токе фазы 150 А и частоте тока 6-7 Гц.

На рисунке 7 приведены сравнительные результаты физического и математического моделирования, выполненного во 2 главе, гидродинамики в кристаллизаторе сечением 125x125 мм для максимальных горизонтальных полей скоростей расплава в центральном сечении статора при наложении вращающегося электромагнитного поля.

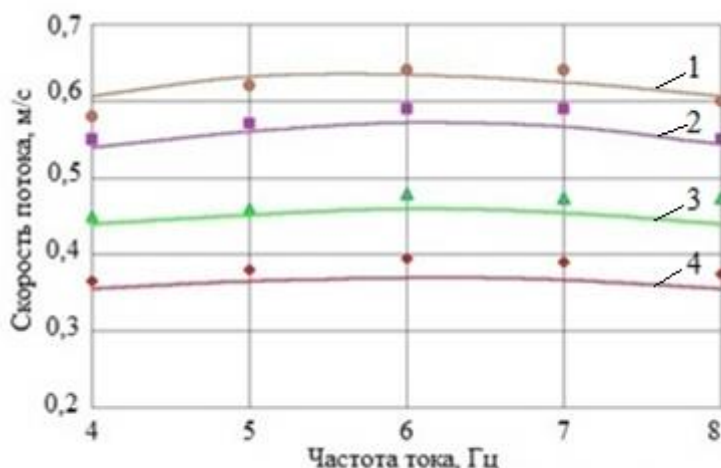


Рисунок 7 – Зависимость максимальных скоростей потоков от частоты при токах фазы 150 (1), 115 (2), 100 (3) и 78 А (4).

Сплошные линии – математическая модель, знаки – эксперимент

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

Рассмотрено влияние работы встроенного электромагнитного перемешивания на тепловой режим кристаллизатора. 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 м³/ч и работе статора в режиме 150 А и 6 Гц нагрев воды от потерь в ЭМП составит 0,02 °С. Активная мощность статора при этом режиме составила 18 кВт.

Для физического моделирования МГД-процессов при ЭМП, происходящих в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания машины полунепрерывного литья заготовок разработали лабораторный стенд в масштабе 1:1 с использованием низкотемпературного сплава Роузе в качестве моделирующей жидкости (рисунок 8).

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

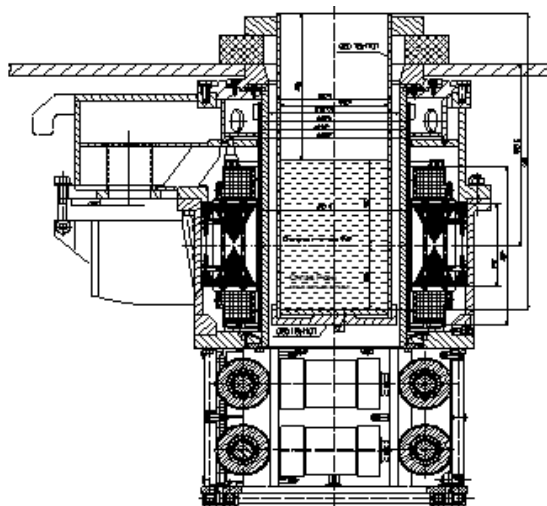


Рисунок 8 – Стенд для физического моделирования ЭМП в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания круглых заготовок

изменением величины тока фазы и частоты тока статора.

По итогам экспериментальных исследований получены закономерности, которые подтвердили результаты теоретических исследований, рассмотренных 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 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.

На основании проведенных экспериментальных исследований разработали рациональные конструкции устройств ЭМП в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания и режимы электромагнитного перемешивания для промышленных сортов МНЛЗ Молдавского металлургического завода и блюмовой МПНЛЗ металлургического завода «Электросталь».

В четвертой главе рассмотрена разработка принципов конструирования устройств электромагнитного перемешивания и кристаллизаторов сортовых и блюмовых МНЛЗ. При установке статоров ЭМП в кристаллизаторы основной задачей, которую требовалось решить, было достижение наибольшего металлургического эффекта при наименьших энергозатратах. Конструктивно это выполнено за счет размещения статора ЭМП вплотную со стенками гильзы (медных плит) кристаллизатора, при этом воду, предназначенную для охлаждения гильзы, использовали также и для охлаждения статора ЭМП.

В этих системах применена оригинальная конструкция обмоток полюсов статоров из водопогружного провода, с двойной изоляцией повышенной

теплостойкости, высокой механической и электрической прочности. В отличие от зарубежных аналогов, выполненных из медных трубок или сплошных полюсов, охлаждаемых специально подготовленной, деминерализованной водой, в разработанных конструкциях обмоток полюсов статоров, происходит наружное охлаждение каждого витка обмотки водой кристаллизатора.

Разработанное техническое решение было испытано, а потом внедрено в промышленных масштабах на шестиручьевой сортовой МНЛЗ Молдавского металлургического завода. Ток фазы на преобразователе частоты регулировали в диапазоне 20–200 А, частоту питающего тока – 1–15 Гц. Максимальная активная мощность устройства ЭМП составляет 25 кВт.

Подобный же метод размещения ЭМП в кристаллизаторе был конструктивно решен для 4-х ручьевой блюмовой МНЛЗ «ОЭМК». Отличие конструкции состояло в том, что кристаллизатор МНЛЗ «ОЭМК» был сборным с четырьмя медными стенками, а форматом непрерывно-литой заготовки был блюм сечением 300х360 мм. Кроме того, индуктор ЭМП для кристаллизатора сортовой МНЛЗ был двухфазным, для блюмовой МНЛЗ – трехфазным. Номинальный ток фазы устройства ЭМП в кристаллизаторе блюмовой МНЛЗ составлял 150 А, частоту питающего тока регулировали в диапазоне 1–7 Гц. Активная мощность статора при номинальном режиме составила 45 кВт.

На МНЛЗ «ОЭМК» дополнительно установили статор в районе зоны окончания затвердевания, что позволило существенно улучшить качество осевой зоны НЛЗ из высокоуглеродистых марок стали. Номинальный ток фазы устройства ЭМП в зоне окончания затвердевания – 200 А, частота тока – 1–10 Гц. Активная мощность статора при номинальном режиме – 46 кВт. Охлаждение полюсов статора электромагнитного перемешивания осуществляли технической водой для охлаждения корпуса статора.

На основании проведенных исследований сделали вывод, что стационарная установка системы ЭМП в зоне окончания затвердевания МНЛЗ имеет существенный недостаток: при изменении скорости разливки – например, при смене сталеразливочного или промежуточного ковшей, изменении формата разливаемых заготовок или переходе на другую марку стали – в районе установки перемешивателя меняются условия кристаллизации. Вследствие этого для ЭМП в зоне окончания затвердевания необходимо предусмотреть возможность перемещения статора вдоль технологической оси МНЛЗ в соответствии с марочным и размерным сортаментами производимых заготовок и применяемой технологией непрерывного литья.

С целью повышения стабильности литья и улучшения качества заготовок диаметром 80, 100 и 120 мм из легированных, в том числе – из нержавеющей марки стали, производимых на горизонтальной машине непрерывного литья, разработали рациональную систему ЭМП для модернизированного кристаллизатора ГМНЛЗ.

Кристаллизатор со встроенным статором ЭМП двухфазного исполнения (рисунок 9) включает четыре электромагнитных полюса, межполюсные соединения, герметизирующие узлы уплотнения выводных концов статора,

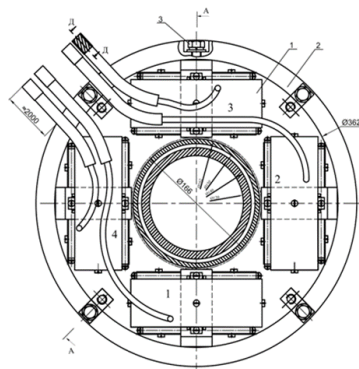


Рисунок 9 – Статор ЭМП в кристаллизаторе горизонтальной МНЛЗ
(вид сверху)

коробку выводов статора с быстроразъемными соединениями для присоединения питающих кабелей.

Диапазон регулирования тока фазы разработанного устройства ЭМП составляет 0–250 А, частоты питающего тока – 3–20 Гц. Максимальная активная мощность статора – 25 кВт.

С целью подтверждения на качественном уровне результатов теоретических расчетов, рассмотренных во 2 главе, разработали конструкцию двухуровневого электромагнитного воздействия в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ (рисунок 10), объединяющую в одну систему два комплекта катушек.

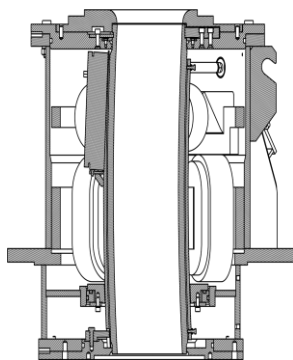


Рисунок 10 – Продольный разрез кристаллизатора со статором ЭМП в нижней и электромагнитным тормозом в верхней части кристаллизатора

Один комплект катушек расположен в нижней части кристаллизатора и обеспечивал перемешивание расплава, другой, – в зоне мениска для его успокоения (торможения), позволяющее более эффективно влиять на качество отливаемой заготовки. Формат разливаемых заготовок – диаметры 130–220 мм. В разработанной конструкции электромагнитное торможение (ЭМТ) обеспечивается электромагнитами постоянного тока, перемешивание – переменным электромагнитным полем.

Устройство ЭМП - трехфазного исполнения по две катушки на каждой фазе. В конструкции ЭМТ используют четыре полюса. Диапазон частот питания:

ЭМП – 0,5–10,0 Гц, ЭМТ – 50 Гц. Максимальная активная мощность ЭМП – 84 кВт, ЭМТ – 15 кВт. Максимальный ток фазы на один ручей составляет 250 А.

По результатам исследований разработанного оборудования установлено, что, обладая рядом преимуществ, среди которых надежность, эффективность и экономичность, встроенные системы ЭМП в кристаллизаторе имеют существенный недостаток, которым следует признать необходимость оснащения практически всего парка сменных корпусов кристаллизаторов устройствами электромагнитного перемешивания. Этот недостаток особенно важен при широком сортаменте разливаемых форматов заготовок. Поэтому в ряде случаев экономически более целесообразным является применение систем ЭМП в кристаллизаторе наружного исполнения.

После ряда обращений российских металлургических заводов с просьбой о ремонте вышедших из строя систем иностранных производителей, разработали устройство ЭМП в кристаллизаторе наружного исполнения (далее ЭМПУ 880), в котором устранены указанные выше недостатки. Разработанная катушка ЭМП наружного исполнения (рисунок 11) состоит из трехфазного (по четыре полюса на каждую фазу) водопогружного статора, встроенного в разборный корпус из коррозионностойкой стали.

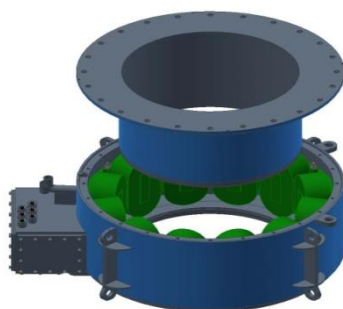


Рисунок 11 – Сборка (разборка) ЭМПУ 880

Корпус, состоящий из сварного контейнера, содержит клеммный узел со съёмными крышками, позволяющими выполнять подсоединение силовых кабелей. Основные характеристики ЭМПУ 880: диаметры наружный и внутренний – 1326 мм и 880 мм, максимальный ток фазы 250 А, диапазон частот питающего тока 1–5 Гц, максимальная активная мощность 190 кВт.

Для организации протока воды в кольцевой внутренней полости контейнера вход и выход воды выполнили с противоположных сторон. Вода, поступающая снизу через подводящий штуцер, снизу обтекает статор с двух сторон (по кольцевой полости), непосредственно охлаждая катушки полюсов, и отводится через отверстие в верхней части контейнера и отводящий штуцер.

Статор ЭМП содержит цилиндрическое ярмо, выполненное из углеродистой стали и шихтованное из колец толщиной 2–3 мм, двенадцать полюсов, катушки которых намотаны непосредственно на их сердечниках. Полюса в одной фазе соединены последовательно, фазы обмотки соединены в клеммной коробке в звезду. В разработанном статоре применен более узкий

магнитопровод высотой 200 мм вместо 340 мм в зарубежном 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) уменьшалась, а расстояние до мениска увеличивалось, получили значительно более спокойный мениск при более интенсивных режимах перемешивания. Указанное обстоятельство позволяет существенно улучшить качество непрерывно-литой заготовки

Разработанная конструкция ЭМПУ 880 полностью разборная для профилактики и ремонта в условиях электроцеха завода. Все материалы отечественные и легкодоступные. ЭМПУ 880 интегрируется в существующие системы питания, управления и АСУ ТП МНЛЗ.

Конструкция разработанной двухуровневой системы ЭМП в кристаллизаторе (ЭМП-К) и зоне окончания затвердевания (ЭМП-3) МПНЛЗ «МЗ «Электросталь», отличается от примененной на блюмовой МНЛЗ «ОЭМК», тем, что для кристаллизатора и зоны окончания затвердевания разработаны устройства электромагнитного перемешивания с симметричным расположением полюсов по длине окружности статора (рисунок 12).

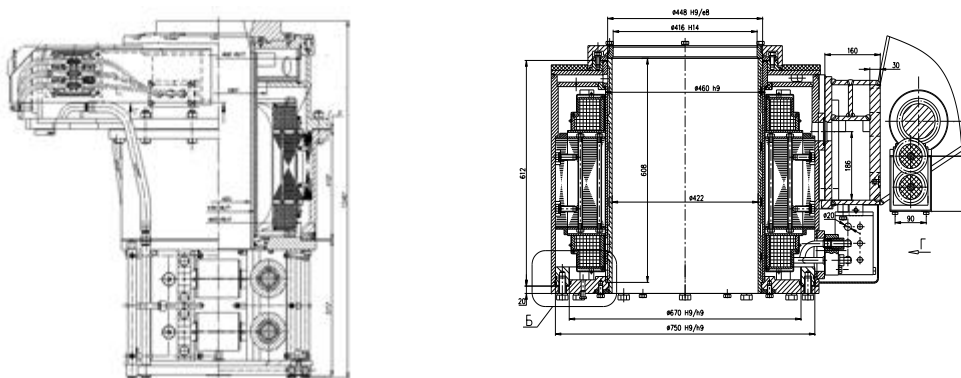


Рисунок 12 – Статор ЭМП-К, встроенный в корпус кристаллизатора (слева), статор ЭМП-3 для зоны окончания затвердевания (справа)

Кроме того, если в ЭМП кристаллизатора блюмовой МНЛЗ «ОЭМК» ярмом магнитопровода статора служил корпус кристаллизатора, то в разработанной системе ярмо выполнено шихтованным. При этом статоры ЭМП в зоне окончания затвердевания МПНЛЗ расположены на движущихся каретках, в отличие от стационарно установленных статоров МНЛЗ «ОЭМК». Перемещение статоров ЭМП-3 позволяет обеспечивать электромагнитное перемешивание жидкой фазы заготовок в зоне схождения фронтов кристаллизации путем слежения за «лункой», что способствует разрушению дендритов и заполнение порциями жидкого металла образующихся усадочных раковин.

Частота тока статора ЭМП в зоне окончания затвердевания в 3 раза больше, чем в статоре ЭМП в кристаллизаторе, а потребляемая мощность – в 1,5 раза.

Установлено, что применяемые, в основном, в настоящее время на МНЛЗ гильзовые кристаллизаторы имеют конструктивный недостаток, заключающийся в том, что для центрирования рубашек охлаждения относительно гильзы используют вкрученные в рубашку болты, которые необходимо отводить от гильзы вручную с учетом её температурного расширения, из-за чего кольцевой зазор между гильзой и рубашкой, по которому проходит охлаждающая гильзу вода, может иметь существенные отклонения от заданных значений. При этом, теоретические значения зазора обычно колеблются в пределах 3,25–4,0 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. 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 – эта величина, например, для заготовок диаметром 550 мм, может быть равной 0,75 мм. Из-за этого расчетный 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 приводит к нарушению равномерности первичного охлаждения, и соответственно, различной будет температура стенки гильзы на этих участках и различными по толщине будут соответствующие участки корочки слитка, что в результате приведет к ухудшению качества НЛЗ. При производстве круглых заготовок это приводит к овальности и возникновению продольных трещин, в случае квадратных – к ромбичности и околоугловым продольным трещинам.

С целью устранения указанных недостатков 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 и получение равномерной по толщине корки затвердевающего слитка. Это обеспечит получение заготовки, соответствующей требованиям, предъявляемым к её качественным показателям и геометрическим размерам. Эта конструкция кристаллизатора защищена патентом Российской Федерации.

На основании анализа процессов разработки и создания оборудования электромагнитного перемешивания, рассмотренного в настоящей работе, сформулировали основные принципы конструирования систем ЭМП для сортовых и блюмовых МНЛЗ, обеспечивающих получение оптимальных конструкторско-компоновочных решений. 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.

В случае выбора системы ЭМП в кристаллизаторе для снижения стоимости производства и эксплуатации следует определить конструкцию данного

устройства. Критерии выбора систем ЭМП в кристаллизаторе для разных МНЛЗ приведены на рисунке 13.



Рисунок 13 – Критерии выбора системы ЭМП в кристаллизаторе

В пятой главе изложены результаты внедрения и опытно-промышленных испытаний разработанных устройств электромагнитного перемешивания на МНЛЗ заводов: Молдавского металлургического, Ижевского опытно-механического, металлургического «МЗ «Электросталь», а также Оскольского электрометаллургического комбината.

В ходе проведения испытаний систем ЭМП решали задачи:

- исследования влияния электромагнитного перемешивания на качество заготовок и проката из разных марок стали;
- определения рациональных режимов ЭМП.

В соответствии с полученными данными испытаний встроенной системы ЭМП в кристаллизаторе на сортовой МНЛЗ Молдавского металлургического завода по 34 плавкам из высокоуглеродистых марок стали установлено, что количество непрерывно-литых заготовок с коэффициентом осевой ликвации углерода менее 1,1 составило 80 % при использовании ЭМП в кристаллизаторе, а без электромагнитного перемешивания – 62 %, в том числе для слитков из кордовых марок стали – 100 и 75 % соответственно. После изучения структуры заготовок, отлитых с ЭМП и по существующей технологии, сделали вывод о положительном влиянии ЭМП на кристаллическую структуру заготовок, в частности - из высокоуглеродистых марок стали. Размер зоны равноосных кристаллов (ЗРК) у заготовок из высокоуглеродистых марок стали сечением 125x125 мм, отлитых с ЭМП, составил 28–57 мм при среднем значении 44 мм или 35,2 % от размера грани заготовки (рисунок 14).

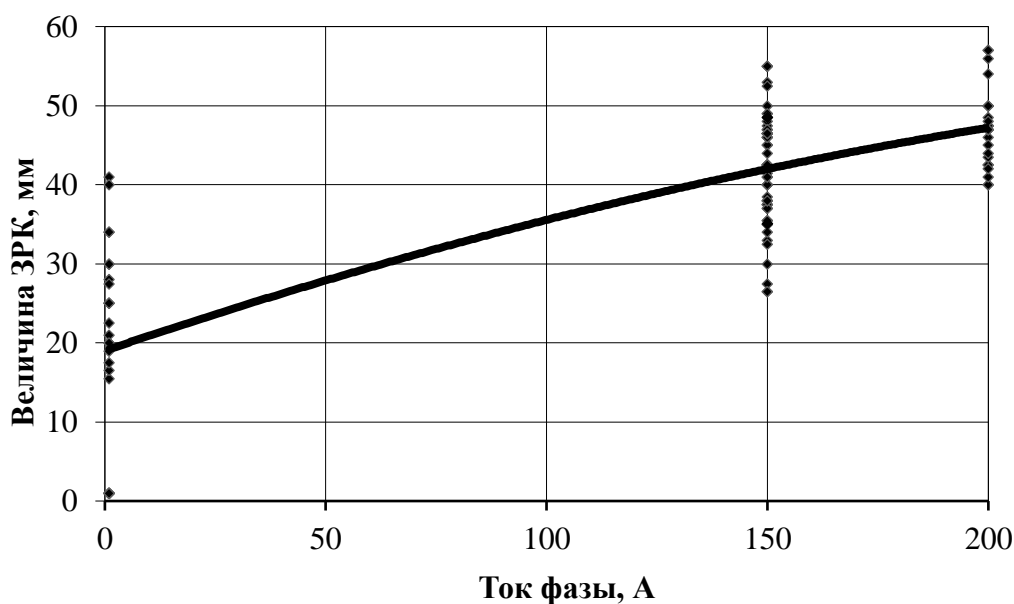


Рисунок 14 – Влияние ЭМП в кристаллизаторе на кристаллическую структуру зоны равноосных кристаллов сортовых заготовок

Зона равноосных кристаллов заготовок, произведенных с ЭМП в кристаллизаторе, увеличилась в 2,3 раза относительно контрольных.

Проведен анализ влияния ЭМП на кристаллическую структуру заготовок при разных положениях статора в кристаллизаторе: в первом случае верхняя кромка статора находилась на расстоянии 225 мм от мениска металла, во втором – 445 мм. Протяженность ЗРК в заготовках, отлитых с ЭМП в кристаллизаторах с положением статора 225 мм, была менее развита. Таким образом для достижения лучших металлургических результатов и исключения интенсивного вращения мениска с возможностью затягивания шлакообразующей смеси в расплав, ведущему к возможному ухудшению качества поверхности, необходимо максимально удалить статор ЭМП от мениска или применять торможение расплава в верхней части кристаллизатора, что подтверждает теоретические расчеты, приведенные во второй главе.

В макроструктуре заготовок, произведенных с использованием ЭМП в кристаллизаторе, сократился максимальный балл по центральной пористости в заготовках из высокоуглеродистых марок стали с балла 4,0 до балла 2,5.

На основании металлографических исследований катанки из заготовок высокоуглеродистых марок стали, разлитых с ЭМП и без ЭМП установлено:

- ЭМП рассредоточивает осевую ликвацию в 1,3–1,4 раза;
- протяжённость подусадочных ликвационных полосок в заготовках с ЭМП меньше, в среднем – 0,158 мм вместо 0,223 мм без ЭМП;
- усредненная протяженность мартенситных участков в катанке с ЭМП не превысила 20 микрон, что отвечало нормативам заказчиков кордового металла.

Для сортовой МНЛЗ установлены рациональные режимы электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе при литье высокоуглеродистых марок стали: ток фазы ($I\phi$) – 200 А, частота тока (f) – 6,5

Гц. Применение ЭМП на этом заводе впервые позволило освоить на сортовой МНЛЗ производство кордовой стали.

Промышленные испытания встроенной системы ЭМП в кристаллизаторе горизонтальной МНЛЗ проводили на Ижевском опытно-механическом заводе. В процессе исследований разлили 62 плавки в заготовки сечением диаметром 80, 100 и 120 мм из легированных марок стали при различных режимах перемешивания.

По результатам металлографических исследований темплетов НЛЗ выявлено влияние электромагнитного перемешивания на улучшение среднего балла по центральной пористости в заготовках: из стали 12Х18Н10Т 1,2–1,8 балла; из стали 05Х16Н4Д2Б: 1,0–1,7 балла.

Было установлено, что макроструктура непрерывно-литых заготовок, произведенных с применением ЭМП, характеризуется более высоким качеством. Так как ЭМП на промышленной МНЛЗ горизонтального типа в России было применено впервые, научный интерес представляют установленные при этом рациональные электротехнические параметры статора для заготовок диаметром 80 мм: $I\phi = 150$ А, $f=15$ Гц; диаметром 100 мм: $I\phi = 175$ А, $f=10$ Гц; диаметром 120 мм: $I\phi = 175$ А, $f=8$ Гц.

В процессе испытаний на блюмовой МНЛЗ ОЭМК с применением ЭМП в кристаллизаторе и в зоне окончания затвердевания разлили 21 плавку подшипниковых марок стали. С учетом рабочей скорости литья заготовок сечением 300x360 мм 0,5–0,55 м/мин было определено наиболее рациональное расположение устройства ЭМП в зоне окончания затвердевания: в пределах 10–11 м от уровня металла в кристаллизаторе, где соотношение жидкой и твердой фаз находится в интервале 0,3–0,5.

На основе анализа макроструктуры установлено, что применение систем ЭМП на двух уровнях блюмовой МНЛЗ (в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания) уменьшает на 3 балла максимальный балл по подусадочной ликвации. Средний балл подусадочной ликвации в прокате с ЭМП на двух уровнях составил 1,0 балл, а в контрольном – 2,1.

По итогам испытаний для блюмовой МНЛЗ определены рациональные режимы электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе: $I\phi = 135$ А, $f = 3$ Гц; ЭМП в зоне окончания затвердевания: $I\phi = 100$ А, $f = 7$ Гц.

Промышленные испытания двухуровневой системы ЭМП в кристаллизаторе и в зоне окончания затвердевания на машине полунепрерывного литья заготовок проводили на вертикальной двухручьевой МПНЛЗ МЗ «Электросталь». Разливку в круглые заготовки диаметром 250 и 360 мм с применением ЭМП провели по схеме: после начала вытягивания включали электромагнитное перемешивание в кристаллизаторе, после выхода слитка из зоны окончания затвердевания останавливали каретку вытягивания заготовки и включали ЭМП в зоне окончания затвердевания.

В процессе исследований использовали различные режимы ЭМП, при которых меняли ток фазы и частоту питания. При разливке заготовок диаметром 250 мм ток фазы устройства электромагнитного перемешивания в

кристаллизаторе составлял 50 А, 125 А, 150 А, частота – 2 Гц и 3 Гц; для ЭМП в зоне окончания затвердевания режимы были 150 А и 175 А, 7 Гц и 8 Гц соответственно.

Оценка качества заготовок и проката из них (рисунок 15) и контрольных показала, что применение системы ЭМП на двух уровнях МПНЛЗ снижает балл

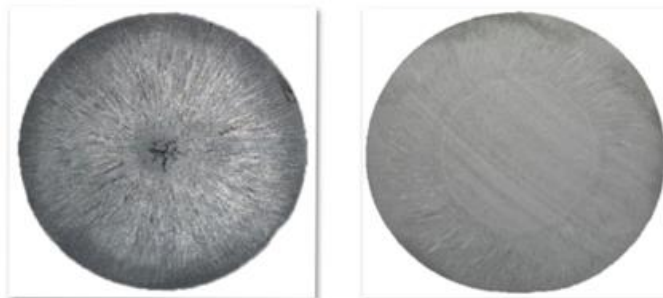


Рисунок 15 – Макроструктура поперечных темплетов заготовок диаметром 250 мм из стали 12Х13, разлитых с ЭМП в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания (справа) и контрольных без ЭМП (слева)

по центральной пористости и осевой ликвации с 1,5–2,5 до 0,5–1,0; балл по осевым ликвационным полоскам и трещинам с 1,5–2,0 до 0,5–1,0; а краевые точечные загрязнения (КТЗ) полностью отсутствуют (в серийном металле без ЭМП балл по КТЗ составлял 2 – 3 балла).

Обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований, промышленных испытаний предложенных технических решений позволили создать методологию разработки и опробования систем ЭМП для сортовых и блюмовых МНЛЗ (рисунок 16).

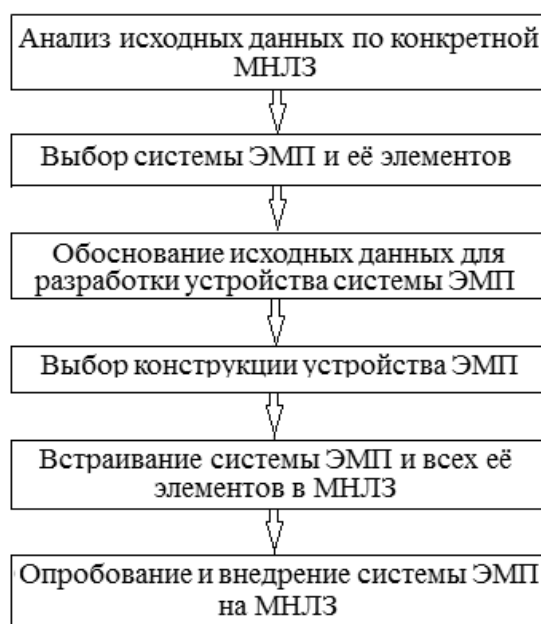


Рисунок 16 – Общая схема методологии разработки и опробования систем электромагнитного перемешивания на МНЛЗ

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.

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 многоручьевого МНЛЗ 320 дней в году, что подтверждается актами опробования и внедрения.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

В рецензируемых научных изданиях (из перечня ВАК):

1. Современные электромагнитные перемешиватели жидкой стали в кристаллизаторе и ЗВО на блюмовой УПНРС / В.Г. Грачев, Б.А. Сивак, А.С. Смоляков, С.И. Шахов, А.Н. Соловьев, В.М. Паршин, С.И. Колтышев, А.М. Комаров // Тяжелое машиностроение. – 2011. – № 2. – С. 18–22.

2. Шахов, С.И. 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.

3. 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 // Электросталь. – 2016. – № 6. – С. 41–48.

4. 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.

5. Шахов, С.И. Модернизация действующей сортовой МНЛЗ завода «Vaku Steel Company» с целью производства круглых трубных заготовок / С.И. Шахов, Р.И. Керимов // Тяжелое машиностроение. – 2018. – № 5. – С. 9–13.

6. Разработка системы электромагнитного перемешивания при модернизации горизонтальной МНЛЗ / С.И. Шахов, К.Н. Вдовин, Ю.М. Рогачиков, Д.С. Шахов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2019. – № 3 (Т. 75). – С. 344–350.

7. Усовершенствование оборудования для электромагнитного перемешивания жидкой стали в кристаллизаторах МНЛЗ / С.И. Шахов, К.Н. Вдовин, Ю.М. Рогачиков, Д.С. Шахов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2019. – № 7 (Т. 75). – С. 828–834.

8. Шахов, С.И. Электромагнитное перемешивание в кристаллизаторах сортовых МНЛЗ и качество непрерывно-литой заготовки / С.И. Шахов, К.Н. Вдовин // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2019. – № 8 (Т. 75). – С. 955–961.

9. 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.

10. МГД-метод расчета некоторых параметров течения и кристаллизации жидкого металла / Г.А. Дубский, К.Н. Вдовин, С.И. Шахов, Л.Г. Егорова, А.А. Нефедьев // Электрометаллургия. – 2020. – № 4. – С. 2–11.

11. 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.

12. Совершенствование оборудования электромагнитного перемешивания в кристаллизаторах сортовых и блюмовых МНЛЗ / С.И. Шахов, Б.А. Сивак, К.Н. Вдовин, Д.С. Шахов, Р.И. Керимов, А.Т. Байрамов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – №10 (Т. 76). – С. 1014-1020.

В изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science:

1. 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.

2. 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.

3. Analysis of the formation of the solidifying skin of a round continuous-cast semifinished product inside the sleeve of the mold / B.A. Sivak, G.I. Nikolaev,

A.S. Smoliakov, S.I. Shakhov // Metallurgist. – 2011. – Vol. 55. – No. 3–4. P.p. 158–162.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

В прочих изданиях:

1. 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.

2. 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. – № 3S (62). – С. 68–71.

3. 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. Грачев, А.А. Соловьёв // Литьё и металлургия. – 2013. – № 3S (72). – С. 199-203.

4. 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.

5. 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.

6. Реконструкция действующей сортовой МНЛЗ Baku Steel Company с целью литья круглых заготовок для нужд трубной промышленности /

А.С. Смоляков, С.И. Шахов, Р.И. Керимов, О.Ю. Рафиев // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2017. – № 1 (1405). – С. 43–46.

7. Смоляков, А.С. Разработки ВНИИМЕТМАШ систем электромагнитного перемешивания для машин непрерывного литья заготовок / А.С. Смоляков, С.И. Шахов, Ю.М. Рогачиков // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2017. – № 2 (1406). – С. 33–38.

8. 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.

9. Шахов, С.И. Модернизация машин непрерывного литья стали с целью повышения качества готовой продукции // В сборнике: XV Международный конгресс сталеплавильщиков. Сборник трудов, к 100-летию Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и 380-летию российской металлургии. 2018. – С. 400-409.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

Авторские свидетельства и патенты

1. Способ электромагнитного перемешивания жидкой фазы непрерывнолитой заготовки индукторами с бегущим электромагнитным полем / И.Н. Шифрин, С.И. Шахов, А.С. Смоляков, В.Г. Грачев, А.И. Цаплин // патент РФ № 2325970, г. Москва, 2008 г.

2. 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.