

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора

Сарапулова Федора Никитича на диссертацию Авдулова Антона Андреевича

«Электромагнитный модификатор слитка в роторной литейной машине», представленной на

соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 –

Электротехнические комплексы и системы

**Актуальность темы.** Большинство проводов и кабелей производят из алюминиевой катанки методом холодной пластической деформации на волочильных станах. Катанка изготавливается на агрегатах непрерывного литья и прокатки. Свойства катанки зависят от ее кристаллической структуры, которая в свою очередь зависит от структуры исходной литой заготовки, полученной на роторной литейной машине. Одним из способов улучшения структуры заготовки, является впервые предлагаемое автором магнитогидродинамическое воздействие на расплав в процессе кристаллизации (электромагнитное модифицирование).

В свете сказанного выше разработка электромагнитного модификатора для роторной литейной машины и исследование процесса электромагнитного модифицирования является актуальной темой.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций,** сформулированных в диссертации, достаточна, поскольку они получены с помощью современных математических моделей и программных средств путем исследования электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в электромагнитном модификаторе. Они также проверены с помощью созданных физической модели и опытно-промышленной установки и корректно отражают процессы кристаллизации слитка в электромагнитном поле.

**Структура и объем диссертации** соответствуют требованиям, предъявляемым к работам на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В первой главе представлен обзор применения МГД-устройств в технологических процессах литейных производств. Рассмотрены структуры линий непрерывного литья и прокатки для производства катанки из алюминиевых сплавов. Дано описание способов и технологий улучшения структуры слитков, представлен краткий обзор МГД-технологий и устройств, используемых для повышения качества слитков. Рассмотрены конструкция и особенности роторных литейных машин с точки зрения применения МГД-технологий. В результате анализа сформулирована задача исследований и намечены пути ее решения.

Вторая глава посвящена математическому моделированию физических процессов при электромагнитном модифицировании слитка в роторной литейной машине. Формируются



математические модели кристаллизации слитка с учетом основных влияющих факторов; электромагнитных процессов в кристаллизаторе, слитке и в индукторе электромагнитного модификатора; гидродинамических процессов в жидкой фазе слитка. Построение геометрической и сеточной моделей производится в *ANSYS Workbench*; моделирование процесса кристаллизации - в *ANSYS Fluent* с использованием метода конечных объемов, анализ термогидродинамических процессов проводится в *ANSYS CFD-Post*; электромагнитная модель реализована в пакете *ANSYS Emag*. Сформулированы выводы о результатах моделирования указанных связанных процессов в системе.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям процесса электромагнитного воздействия на жидкую сердцевину слитка. Сформулированы задачи и особенности постановки эксперимента на лабораторной модели с учетом ее отличия от реального магнитного модификатора. Изложена методика проведения экспериментов и параметры литья. Приведены результаты экспериментов. Проведено сопоставление результатов физического и математического моделирования.

В четвертой главе приведено описание и результаты испытаний опытно-промышленной установки магнитного гидродинамического модификатора, разработанной для кристаллизатора литейно-прокатного агрегата № 3 Филиала ОАО «СУАЛ» ИркАЗ-СУАЛ». Изложены рекомендации по проектированию и промышленным испытаниям комплексов магнитного гидродинамического модификатора для роторных литейных машин.

**Основные результаты** диссертационной работы заключаются в следующем:

1. На основе анализа работы агрегатов для производства алюминиевой катанки и МГД-устройств для модифицирования структур слитков в процессе кристаллизации определено место установки индуктора и построена расчетная модель исследуемой системы.
2. Разработаны модели тепловых, электромагнитных и гидродинамических явлений с использованием современных программных продуктов *ANSYS*, *CFX* и *FLUENT* и физического моделирования, обеспечивающих модифицирование структуры слитка.
3. Получена взаимосвязь структуры слитка с характеристиками воздействующего электромагнитного поля в жидкой фазе слитка; получены дифференциальные и интегральные параметры системы; осуществлена разработка электромагнитного модификатора для промышленной литейной машины.
4. Определены границы жидкой фазы слитка и влияние на них технологических параметров литья, а также дифференциальные и интегральные характеристики электромагнитного поля в системе. Проведена оценка влияния магнитных свойств магнитопровода индуктора и стальной ленты литейной машины на процесс преобразования энергии. Определен диапазон частот, обеспечивающий эффективное воздействие на жидкую фазу слитка.



5. Экспериментально установлены зависимости структуры слитка от режимов работы индуктора; сделан вывод о необходимости получения в жидкой фазе слитка тангенциальных электромагнитных сил не менее 7 Н на метр длины индуктора, а также необходимости увеличения теплоотода от стальной ленты литейной машины для сохранения целостности жидкой сердцевины слитка.

6. Результаты работы использованы в ТУ № 3442-014-35131371-2014 «Комплекс магнитного гидродинамического модификатора типа МГДМ» и при разработке программы опытно-промышленных испытаний комплекса. В электромагнитном модификаторе предложено использовать дугообразный индуктор с 14 пазами и катушками со специальной схемой соединения обмотки (AAZZBBXXCCYYAA), обеспечивающей симметричную нагрузку фаз.

7. Разработан электромагнитный модификатор для роторной литейной машины агрегата ЛПА-АК. В установке реализованы решения для обеспечения ее стабильной работы в условиях литейных производств.

**Научная новизна** заключается в следующем:

1. Впервые предложен метод исследования электромагнитного модифицирования структуры слитка на основе математического и физического моделирования, позволяющий построить взаимосвязь структуры слитка и характеристик воздействующего на его жидкую фазу электромагнитного поля.

2. Созданы комплексные математические модели для анализа тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов в системе «индуктор – кристаллизатор – слиток», учитывающие фазовые состояния кристаллизующегося слитка и магнитогидродинамические процессы в нем.

3. Разработана физическая модель системы «индуктор – кристаллизатор – слиток», позволяющая получать зависимости структуры слитка от параметров и режимов работы индуктора электромагнитного модификатора.

4. Впервые получены характеристики кристаллизующегося слитка под воздействием электромагнитного поля, а именно:

- эмпирическая зависимость протяженности жидкой фазы слитка от условий охлаждения и скорости вращения литейного колеса;

– закономерности образования в кристаллизующемся слитке твердой фазы толщиной 3–4 мм, препятствующей замешиванию окислов в слиток;

– максимальное значение тангенциальных электромагнитных сил, приложенных к жидкой фазе (достигается при частоте тока в индукторе в диапазоне от 15 до 30 Гц в зависимости от толщины твердой фазы слитка под активной зоной индуктора);



– зависимость размера зерна структуры слитка от величины продольной электромагнитной силы, создаваемой индуктором (с увеличением ее от 0 до 7 Н/м происходит уменьшение размера зерна).

**Достоверность результатов** диссертационной работы обоснована корректным использованием математического аппарата и современных программных средств; сходимостью результатов математического моделирования и экспериментальных данных, полученных при проведении испытаний лабораторной модели и опытно-промышленного комплекса.

В публикациях автора достаточно полно отражены основные научные результаты данной диссертационной работы.

**Практическая ценность** результатов работы подтверждена успешными испытаниями физической модели и опытно-промышленного образца электромагнитного модификатора литейной роторной машины по производству алюминиевой катанки. Практическую ценность представляют: алгоритм расчета электромагнитных, тепловых и магнитогидродинамических процессов в системе «индуктор – кристаллизатор – слиток»; режимы работы электромагнитного модификатора, конструкция и схема соединения обмотки индуктора; рекомендации по проектированию электромагнитных модификаторов структур слитков в роторных литейных машинах и проведению их промышленных испытаний.

**Замечания** по диссертационной работе Авдулова А.А.:

1. Автору следовало бы более четко объяснить, почему при исследовании кристаллизации на с. 45 принимается: «В начале кристаллизации число Рейнольдса имеет значение около 50, в конце ... приблизительно 100. ... Поэтому в математической модели процесса кристаллизации нет необходимости использовать модель турбулентности». В то же время при гидродинамических расчетах на с. 92 принимается: «Число Рейнольдса ... при ожидаемой скорости потока 0,1 м/с и характерном размере 0,05 м ... имеет значение 3000. Данное значение числа Рейнольдса приводит к необходимости учета ... турбулентного характера течения расплава».

2. Автор приводит на рис. 3.16 зависимость структуры слитка (размер зерна) от тангенциальной компоненты электромагнитного усилия (на единицу длины индуктора), действующего на жидкую фазу слитка. Полученный результат можно считать одним из основных достижений автора. Вместе с тем ряд других исследователей считает, что на величину зерна влияет градиент температур в кристаллизующемся слитке. Электромагнитное поле подогревает металл (индукционные токи), двигает металл (электромагнитные силы) и за счет этих двух эффектов изменяет поле температур и градиент температуры в расплаве, а значит, изменяются условия кристаллизации и соответственно изменяется размер зерна. Хотелось бы узнать мнение автора о такой трактовке процесса кристаллизации.



3. Приведенные на рис. 2.27 расчетные значения магнитной индукции в зубцах и плотности тока в обмотке индуктора изменяются в широком диапазоне и достигают предельных значений 2.5 Тл и 12 А/мм<sup>2</sup> соответственно. Значит ли это, что в реальном индукторе должны быть применены обмотки с форсированным охлаждением проводов?

4. В тексте диссертации имеются некоторые (немногочисленные) неточности и опечатки, например, «взаимосвязь структуры ... от режимов» (с. 38), «геометрия и параметры расчетной модели» (с. 50), «коэффициент теплоотдачи» (с.57), «отношение длин зубцов к длинам пазов» (с.с. 83, рис. 2.28), «влиянием скольжения электромагнитного поля относительно кристаллизатора и расплава пренебрегаем» (с. 94, неясно).

**Заключение.** Диссертационная работа Авдулова А.А. выполнена на высоком научном уровне, ее результаты представляют значительный интерес в данной технической области. Сделанные замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы. Автореферат отражает основное содержание диссертации и полностью соответствует ей.

Диссертация «Электромагнитный модификатор слитка в роторной литейной машине» является законченной научно-квалификационной работой. В ней решена задача, имеющая важное значение для создания электромеханической системы комплексного воздействия на кристаллизующийся слиток в роторной литейной машине.

Диссертационная работа удовлетворяет требованиям ВАК п.9 «Положение о присуждении ученых степеней», предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям. Автор Авдулов Антон Андреевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент:

Профессор, доктор техн. наук (05.09.01 –

Электромеханика и электрические аппараты),

профессор кафедры «Электротехника и

электротехнологические системы» ФГАОУ ВПО

«Уральский федеральный университет имени первого

Президента России Б.Н. Ельцина».

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, к. Э-501

Тел.: +7 (343) 375-47-51

sarapulovfn@yandex.ru

Подпись Сарапулова Федора Никитича заверяю:

Ученый секретарь

Сарапулов Федор Никитич

27.11.2015 г.



Морозова Вера Анатольевна