

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Авдулова Антона Андреевича

« Электромагнитный модификатор слитка в роторной литейной машине »,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальностям 05.09.03. – Электротехнические комплексы и системы

Хорошо известно, что с уменьшением размера зёрна доля границ возрастает и модифицирует структурные и механические свойства материалов. В частности, для поликристаллических металлов и сплавов с размером зерна большим 1мкм предел текучести изменяется, следуя классическому закону Холла – Петча. Однако, если размер зёрен уменьшить до наноразмеров ( $> 100$  нм), это может приводить к необычным механическим свойствам, включающим высокую прочность, ударную вязкость и износоустойчивость.

В случае направленного затвердевания (кристаллизации), которое имеет место при непрерывном литье алюминия в роторной литейной машине контрольным параметром, определяющим размер зерна, является температурный градиент на фронте кристаллизации. Однако, при современном производстве температурный градиент не значительный при котором зёрна имеют размер несколько миллиметров. Поэтому различные возможности активного воздействия на расплав в предкристаллизационный период, такие как магнитогидродинамическое и ультразвуковое воздействия, используются для формирования однородной мелкозернистой структуры слитка. Изучение магнитогидродинамического воздействия на микроструктуру (включая размер зерна) слитков алюминия и его сплавов при кристаллизации из расплава требует решения многих технологических задач. Это обуславливает актуальность и практическую значимость диссертационной работы Авдулова Антона Андреевича.

Диссертация изложена на 162 страницах и состоит из введения, 4 глав с выводами, заключения и списка литературы, включающего 125 наименований.

Во введении обсуждается актуальность, цель и методы исследования, дана структура диссертационной работы, приведены полученные результаты и их апробация, новизна, практическая значимость, личный вклад автора, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор и анализ технологий производства проволоки алюминиевых сплавов, подробно описаны способы и технологии модификации структуры слитков и методы их исследования. Большое внимание уделено обзору магнитогидродинамических технологий, используемых для улучшения качества слитков и методам и используемым программам математического моделирования тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов. В конце главы приведены задачи, необходимые для разработки электромагнитного модификатора, улучшающего структуру слитка в роторной машине. Обосновывается использования физического моделирования для глубокого понимания процессов кристаллизации слитка в роторной литейной машине при электромагнитном воздействии. На основании вышеизложенного приведены задачи исследования. **К сожалению, в постановке задач даны некоторые пункты, которые имеют общий характер (например, 1 и 3).**

Во второй главе автором представлены расчеты математического моделирования физических процессов при электромагнитном модифицировании слитка в роторной машине. На первом этапе проведён расчёт процесса кристаллизации для нахождения геометрии жидкой фазы в роторной литейной машине. Используя пакеты программ и физические характеристики, необходимые для расчёта, и делая разумные допущения, была построена математическая модель, определяющая геометрические размеры жидкой

фазы слитка в зависимости от технологических параметров ( скорость литья температура кристаллизатора и расплав). В результате моделирования были построены распределение температурного поля и доли жидкой фракции от времени расчета, температуры слитка, начальной температуры кристаллизатора и расплава.

Вторая часть математического моделирования посвящена расчету электромагнитных процессов, протекающих в слитке, кристаллизаторе и в индукторе электромагнитного модификатора. Рассмотренная модель содержала жидкую фракцию, помещённую в твёрдую фазу и учитывала конструкционные особенности кристаллизатора и индуктора и литейной машины. При некоторых допущениях получены картины распределения электромагнитных полей и выделяемой тепловой мощности в медном бандаже, твёрдой и жидких фазах и конструктивных частях индуктора. Представлены зависимости тангенциальных компонент электромагнитных сил, реактивной мощности, средней индукции от ширины пакета магнитопровода, от частоты и величины тока, питающего индуктор твёрдой фазы, от толщины в ленте, в медном бандаже литейной машины, в зубцах магнитопровода и т.д.

В третьей части второй главы рассматривается математическое моделирование гидродинамических процессов в жидкой фазе слитка. Расчёт основан на предположении, что жидкая фракция является несжимаемой и находится в изолированном объёме без взаимодействия с окружающей средой. Большое число Рейнольдса привело к учёту турбулентного характера течения расплава. При таких условиях математическая модель позволяет определить размеры и геометрию жидкой сердцевины слитка, и распределение электромагнитных сил.

В третьей главе подробно описаны экспериментальные исследования процесса электромагнитного воздействия на жидкую фазу в процессе кристаллизации слитка. Для этой цели Авдуловым А. А. была создана лабораторная установка, в которой экспериментальные условия были максимально приближены к процессу литья в роторной литейной машине. Было показана важная роль прогрева изложницы до 450°C. При таких условиях в сплаве начинала формироваться мелкозернистая микроструктура. Однородность с меньшим размером зерна возникала при одновременном электромагнитном воздействии с обдувом верхней поверхности слитка. Из этого следует необходимость использования охлаждения верхней части слитка под модификатором на промышленной установке. Это позволяет уменьшить толщину затвердевшей части слитка, что позволяет электромагнитному полю эффективно воздействовать на жидкий расплав. Результаты микроструктурного анализа показывают, что частота 30Гц и 20А тока являются оптимальными величинами. Сравнение результатов экспериментального и математического моделирования были проведены на слитках, полученных при частоте 30Гц и от 5 до 30А величинах тока. Для сравнения результатов было определено оптимальное удельное значение электромагнитной силы на единицу длины индуктора 7 ньютон на метр, при котором формируется минимальный размер зерна. Разброс результатов математического моделирования и измерений энергетических характеристик магнитного поля не превышал 10%.

В четвёртой главе результаты научно-исследовательской работы Авдулова А.А. были использованы при разработке технических условий и при проектировании опытно-промышленной установки магнитного гидродинамического модификатора для кристаллизатора литейно-прокатного агрегата №3 филиала ОАО «СУАЛ». В данной главе подробно описаны основные элементы установки и выбор оптимальных условий для расположения индуктора на кристаллизаторе. Измерения энергетических показателей комплекса показали очень хорошее совпадение с результатами математического моделирования. Это дало возможность дать общие рекомендации по проектированию и промышленным испытаниям комплексов магнитного гидродинамического модификатора для роторных машин. Важным требованием является создание усилия до 7 ньютон на метр в жидкой фазе слитка.

По представленной диссертации имеются следующие замечания:

1. На стр. 5 в разделе « Степень разработанности темы » утверждается, что « Современный математический аппарат не позволяет с высокой достоверностью осуществлять моделирование процесса кристаллизации ..... ». С чем трудно не согласится. Однако, ни в разделе «Результаты моделирования и их анализ » и в «Выводах к 2 главе» не сказано, насколько удачно проделанное математическое моделирование описывает процесс кристаллизации и гидродинамические процессы в выбранной модели. К тому же в разделе « Верификация результатов математического моделирования » рис.3.20 и 4.6 с высокой точностью описывают результаты математической модели.
2. На Рис. 2.7(а и б) приведены зависимости доли жидкой фазы в слитке (а) и средней температуры слитка (б) от начальной температуры расплава в температурном диапазоне 675С -725С, который выше температуры плавления алюминия. Почему весь слиток не находится в жидкой фазе?
3. Не понятно использования английского слова « Верификация », когда в русском языке есть достойные замены.
4. Не оправдано использование во многих местах диссертации словосочетания «кристаллическая структура », которое должно заменено на « макроструктура », как это описано в третьей главе.
5. Не все ссылки в литературе оформлены по требованиям, предъявляемым к диссертациям.

Однако отмеченные недостатки диссертационной работы не умаляют ее несомненных научных достоинств и высокой практической значимости. Представленная диссертация является законченным научным исследованием.

Основные результаты, полученные в диссертации, достаточно полно опубликованы в рецензируемых журналах и представлены на Российских конференциях. Автореферат диссертации отражает основное содержание и выводы работы. Представленные материалы достаточно полно опубликованы в реферируемых журналах по списку ВАК. Достоверность полученных материалов подтверждается использованием современных методов математического и физического моделирования.

По актуальности, новизне, объему выполненных исследований, научной ценности полученных результатов, их использования в практике, количеству публикаций работа Авдулова Антона Андреевича отвечает всем требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности по специальностям 05.09.03. – Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент  
Старший научный сотрудник  
лаборатории физики магнитных пленок,  
доктор физико-математических наук,  
Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН,  
660036 Красноярск, Академгородок 38

 В.Г. Мягков

Tel: +7 391 2494681, 8-983-151-83-17  
E-mail: miagkov@iph.krasn.ru

27 ноября 2015г

Подпись Мягкова Виктора Григорьевича заверяю:  
Учёный секретарь Института физики СО РАН



Попков С.И.