

ОТЗЫВ

официального оппонента Яковича Андриса Таливалдовича на диссертацию соискателя Швыдкого Евгения Леонидовича на тему «Исследование гидродинамических процессов в жидкометаллическом вторичном элементе индукционных МГД машин», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Актуальность темы диссертации

Металлургия является основой для многих ключевых отраслей современной промышленности. От качества металлов и сплавов на их основе зависят характеристики продукции машиностроения, транспорта, строительства и других отраслей. Все стадии технологического процесса приготовления и литья сплавов влияют на свойства конечной продукции. Все большее применение в плавильно – литейном производстве находят различные магнитогидродинамические (МГД) машины в том числе с бегущим магнитным полем. На ряду с бесконтактным воздействием для повышения эффективности и энергоэффективности плавки тугоплавных металлов и получения сплавов для эксплуатации в экстремальных условиях, электромагнитным воздействием можно достичь сокращения длительности и количества необходимых технологических циклов для получения конкретного продукта с заданной структурой и составом. Особенно высокие требования в этой области выдвигаются автомобильной и аэрокосмической индустрией, а также в области высокопроизводительных энергетических установок. Воздействие бегущего магнитного поля приводит жидкий металл в движение, в результате чего выравнивается химический состав и температура во всем объеме расплава, сокращается время приготовления сплава и полностью автоматизируется процесс перемешивания без привлечения механических устройств.

Бегущее магнитное поле создается линейным индуктором с двух или трехфазной обмоткой. Система индуктор – расплав таким образом представляет собой индукционную машину (ИМ) с жидкометаллическим рабочим телом. В плавильно-литейном производстве алюминиевых сплавов, кроме перемешивания расплава в миксерах ИМ применяются также в процессах плавления, транспортировки, рафинирования и кристаллизации.

Глубокое понимание, взаимно связанных электромагнитных, гидродинамических, тепловых процессов и массопереноса твердых включений и газов в жидком металле необходимо как для проектирования МГД машин, так и для создания эффективных технологий получения металлических сплавов с заданными свойствами. Рецензируемая диссертационная работа посвящена этой важной тематике – тепло-и массообмену в жидкометаллическом рабочем теле при воздействии на него бегущего магнитного поля с различными пространственными и временными характеристиками. В связи с этим работа неоспоримо является актуальной для плавильно-литейного производства.

Вх. №05-19/1-268
от 09.10.20г.

Диссертация изложена на 178 страницах из них 162 страницы текста (включая множество рисунков и 179 наименований источников) состоит из введения, обзора литературы, 3 глав, заключения, библиографии и трех приложений.

Новизна и достоверность основных выводов и результатов работы

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. В коммерческих системах моделирования физических процессов ANSYS и COMSOL на основе методов конечных элементов и объемов имплементированы численные модели для трехмерного моделирования электромагнитных и гидродинамических явлений в безындукционном приближении с расширениями для анализа переноса твердых примесей и процесса кристаллизации при перемешивании жидких металлов посредством бегущего магнитного поля в т.ч. в пульсирующем режиме.

2. Достоверность предложенных автором математических моделей подтверждена путем сравнения результатов численного моделирования с экстремальными измерениями электромагнитных, гидродинамических характеристик и границ раздела твердой и жидкой фаз, с использованием Тесламетра, Допплеровского измерителя скорости, а также метода нейтронной радиографии. Для установок лабораторного масштаба при этом была получено хорошее качественное и количественное соответствие результатов, а имеющиеся различия автором были достаточно обоснованы

3. Получены конкретные зависимости процессов массообмена в жидком металле под действием бегущих магнитных полей (БМП) с различными временными и пространственными параметрами. Особый интерес представляют результаты изучения пульсирующих и реверсных режимов работы линейной индукционной машины и полученные при этом представления о возможностях оптимального выбора временно-амплитудных характеристик работы установки.

4. Впервые применительно к установкам перемешивания бегущим магнитным полем использован подход Лагранжа для прослеживания переноса твердых примесей, а также в первые опробован LES подход для моделирования в такого вида установках.

Ценность для науки и практики

Ценность проведенной диссертационной работы для науки и практики состоит в развитии и успешной реализации численных моделей гидродинамических течений жидкого металла под воздействием БМП, позволяющих получать зависимости электромагнитных и гидродинамических характеристик от временных и пространственных параметров БМП, оценить процессы тепло- и массообмена в жидком металле в условиях кристаллизации. Ценность состоит также в сформированных конкретных рекомендациях для проектирования индукционных МГД машин металлургического назначения.

Общая оценка диссертационной работы

Данная диссертационная работа выполнена на актуальную тему, направлена на развитие адекватных математических моделей для сложных МГД процессов в жидком металле под воздействием бегущего несинусоидального периодического магнитного поля. Достоинством работы являются также успешная имплементация этих моделей в среду численного моделирования (ANSYS и COMSOL) и верификация на основе лабораторных измерений магнитного поля и скоростей металла.

В качестве замечаний по работе можно отметить следующие:

1. В расчетах консеквентно используются безындукционное приближение ($\mathcal{R}_m \ll 1$), что вполне обоснованно для установок лабораторного масштаба, а также во многих случаях экспериментального производства. Однако в крупномасштабных литейных установках и миксерах обратное воздействие течения на ЭМ поле может оказаться существенным. Для этого понадобится дальнейшее развитие и верификация моделей учитывающее сопряжение ЭМ и ГД процессов.

2. При моделировании динамики твердых частиц методом Лагранжа недостаточно подобно обоснован отбор сил, действующих на частицы. В отличие от остальной части работы здесь этот выбор не обоснован также какими-либо экспериментальными исследованиями или литературными источниками.

3. В гидродинамических расчетах в основном используется та или другая двухпараметрическая модель турбулентности ($k - \omega SST, k - \epsilon, \dots$) но недостаточно обоснован выбор именно конкретной модели из большого спектра в использованных коммерческих программах. Хотя и достигается хорошее соответствие численных результатов потока с экспериментом, однако остаётся «тень» сомнения, что, может быть, использование других моделей дало бы еще лучшее количественное соответствие.

4. В целом работа написана и оформлена качественно, изложение материала достаточно детализировано и понятно читателю. Однако имеются некоторые недостатки оформления, на пример

- На рис. 1.26 не указана которая из зависимостей получена экспериментально, а которая расчетным путем;
- На рис. 2.6-2.9 отсутствует масштаб для векторов силы и скоростей;
- Рис. 2.15, 2.17 приведены в черно-белом исполнении, хоть в подписочной подписи дана ссылка на «цветовую легенду».

5. Понятие «drag force» является вполне определенным термином «сила лобового сопротивления» или просто «лобовое сопротивление» применяемом в гидроаэродинамике. Использованные обозначения «подъёмная сила» для *lifting force* (2.14) может способствовать неправильной физической интерпретацией этой силы.

6. При исследовании влияния положения и формы фронта кристаллизации на динамику жидкой фазы (подраздел 1.6.3) не достаёт какое-либо обоснование выбранных для анализа наклонных, выпуклых, вогнутых или синусоидальных форм границ фазового раздела.

Отмеченные недостатки не влияют на общую высокую оценку качества выполненной работы.

Заключение

Развитые математические модели и их численные применения для МГД процессов в металлическом расплаве под воздействием бегущего магнитного поля, а

также сформулированные на основе результатов численного моделирования рекомендации по проектированию индукционных МГД-машин металлургического назначения представляют собой решение инженерно-научных задач с большим практическим значением.

Представленная диссертация «Исследование гидродинамических процессов в жидкометаллическом вторичном элементе индукционных МГД машины» полностью соответствует требованиям пункта п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а её содержание соответствует паспорту специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты. Швыдкий Евгений Леонидович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Официальный оппонент,

Кандидат физико-математических наук (Dr. Phys.),
Заведующий кафедры электродинамики
и механики сплошных сред
Латвийского университета

Якович Андрис Таливалдович

Andris Jakovičs

6. октября 2020г.

LV-1004, Riga, Jelgavas str.3,
Тел.: +37129155711, E-mail: andris.jakovics@lu.lv

Подпись Яковича А. Т.
Закреплено

