

ОТЗЫВ

официального оппонента Кривилева Михаила Дмитриевича
на диссертацию Никулина Иллариона Леонидовича «Математическое моделирование поведения металлических расплавов в электромагнитных полях и очистки их поверхности от неметаллических включений», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Металлургическое производство является наукоемкой областью промышленности, поскольку требует разработки новых технологий выплавки металлов, снижения затрат на электроэнергию, повышения степени переработки рудных материалов. В связи с этим важной научной проблемой является создание комплексных математических моделей для описания протекающих физико-химических процессов, поскольку это делает возможным расчет и оптимизацию режимов плавки в металлургических печах. Развивающиеся в последние десятилетия многоуровневые и мультифизические математические модели позволяют с использованием численных методов существенно уточнить описание технологических процессов за счет явного учета важнейших механизмов переноса и деформирования.

Диссертационная работа И.Л. Никулина посвящена развитию комплексной математической модели для управления гидродинамическими процессами в тигле посредством переменного магнитного поля. Предложенный подход обладает универсальностью и применим для описания различных технологических процессов, как показано в диссертации. Развитый в работе новый подход позволил качественно и количественно изучить формирование и разрыв оксидной плёнки на поверхности расплава в плавильном агрегате, которая существенно снижает качество выплавляемого металла в случае ее попадания в слиток. Для технологии получения титановой губки предложена инновационная технология восстановления титана, когда обеспечивается улучшение гидродинамического перемешивания компонентов, улучшается теплообмен в верхней части реторты, снижаются энергетические затраты за счет включения в тепловой баланс теплоты реакции восстановления.

Учитывая широкое использование легких сплавов, склонных к активному окислению, в авиационной и космической промышленности, практическое использование результатов диссертационного исследования способно дать большой экономический эффект. По этой причине диссертационная работа И.Л. Никулина является актуальной как с точки зрения полученных фундаментальных результатов, так и с точки зрения ее прикладной значимости.

Диссертация состоит из списка сокращений и обозначений, введения, 4 глав, заключения и списка литературы, который содержит 237 наименований. Объем работы – 299 страниц.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи, приведена научная новизна, указана практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации представляет собой обзор литературы, посвященный анализу доступных данных по системе «металл–неметалл» и действию на них магнитного поля. Исследование направлено на описание процессов переноса магнитного поля в проводящей среде, которая включает взаимосвязанные вопросы проникновения (диффузии) магнитного поля в расплав, генерации вихревого индуцированного переменного магнитного поля и возникновения силы Лоренца. Особое внимание уделено анализу предложенных в литературе моделей и их экспериментальной верификации.

В процессе подготовки литературного обзора диссертант точно и аккуратно анализирует физическую постановку задачи, чтобы включить в модель все наиболее значимые механизмы переноса. Отдельный раздел посвящен обзору моделей, описывающий радиационный теплообмен. Эта часть работы очень ценна в научно-техническом плане, поскольку в большинстве современных моделей применяются упрощенные схемы учета радиационного переноса, которые огрубляют протекающие процессы и вносят погрешность до 20–40%, что является недопустимым при проектировании технических систем.

Рассмотрена проблема описания оксидных пленок на поверхности расплава, критически рассмотрены подходы к ее математическому описанию

методами молекулярной динамики, термодинамики и с использованием континуального подхода.

Во второй главе рассматриваются процессы переноса в вакуумных плавильно-заливочных установках для точного литья жаропрочных никелевых и других сплавов. Сложное легирование Ni суперсплавов включает легирование элементами с высокой склонностью к окислению, например, Ti и Nd. Перед формулировкой математической модели диссертантом выполнена большая работа по концептуальной постановке задачи, которая включала проведение оценок характеристик плёнок, генерируемого переменным магнитным полем течения, взаимодействию течения расплава с оксидной пленкой. Такая подготовка позволила разбить комплексную задачу устранения оксидных пленок с поверхности расплава на три подзадачи тепломассопереноса, электродинамики переменного магнитного поля и деформации поверхностной пленки.

Выбор и формулировка уравнений баланса и уравнений краевой задачи выполнены грамотно. Для этого использованы обоснованные математические соотношения. И.Л. Никулин тщательно рассмотрел процедуру согласования различных моделей на уровне входных и выходных данных.

В разделе 2.6 произведен переход к обобщенному представлению модели с использованием характеристических чисел системы. Диссертант использует подход переопределения величины вязкости и температуропроводности, который позволяет рассчитывать эффективную вязкость для турбулентного потока в магнитном поле. В целом данный подход позволяет эффективно решать разнообразные инженерные задачи в ламинарном приближении. Для изучаемой в работе системы этот подход смотрится обоснованным и результативным.

В третьей главе проведено математическое моделирование магнитогидродинамических процессов в тигле в связке с решением задачи взаимодействия расплава и оксидной пленки. В качестве управляющих параметров системы выбраны безразмерная частота магнитного поля, определяемая частотой тока в катушках индуктора, и модифицированное число Гартмана, зависящее от напряженности внешнего магнитного поля.

Проведено интересное исследование поведения системы в зависимости от варьируемых параметров, которое позволило рассчитать максимальные скорости течения, а также отношения Φ подъемных сил, вызванных неоднородностью температурного поля и силой Лоренца. Получены новые оригинальные результаты, которые показывают различные режимы течения и области перехода между этими режимами.

Отдельно стоит отметить новые и замечательные по своей значимости для практической деятельности карты устойчивости течений. Диссертантом построены разнообразные представления таких карт (диаграмм), которые позволяют определить режимы эксплуатации установки, обеспечивающие разрушение оксидной плёнки в зависимости от управляющих параметров. Данный результат, обобщенный на рисунке 3.24 в виде частотно-геометрической карты режимов поверхностных течений считаю новым и значимым.

В четвертой главе решена задача разработки реактора для производства губчатого титана с новой схемой нагрева и перемешивания компонентов. Традиционная схема включает использование печи шахтного типа, что приводит к перегреву реактора и реторты, которые сложно контролировать в применяемом на производстве технологическом процессе.

Соискателем предложена новая схема реактора для восстановления титана, которая включает использование бегущего магнитного поля в качестве механизма нагрева расплава и его перемешивания. Предложенный новый подход подтверждается результатами математического моделирования, которые показывают выравнивание температурного поля и уменьшение перегрева расплава в зоне экзотермической реакции. Показано, что интенсификация течения вблизи поверхности способствует подводу чистого магния из реторты и повышает выход реакции. При этом обеспечивается необходимая интенсивность перемешивания компонентов в реторте.

Научная ценность полученных в работе данных и сделанных на их основе выводов состоит в их важности для разработки энергосберегающих металлургических технологий плавки металлов и их получения методом химико-термического восстановления. Предложенные в диссертации приемы по построению комплексных моделей тиглей и реакторов могут быть успешно

применены при разработке оснастки металлургического производства. Практическая ценность заключается в том, что разработанные модели и результаты моделирования успешно внедрены на промышленных предприятиях реального сектора экономики.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается удовлетворительным согласием расчетных и экспериментальных данных. Обоснованность положений и выводов, сделанных на основе проведенных исследований, обеспечивается их непротиворечивостью имеющимся литературным данным и современным научным представлениям. Основные результаты диссертации опубликованы в 16 печатных работах в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования. Результаты докладывались и обсуждались на научных мероприятиях всероссийского и международного уровня. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и 1 патент на полезную модель.

При прочтении диссертации возникли следующие замечания:

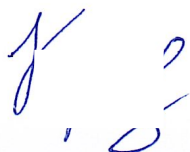
1. В разделе 2.8.1 приводится выражение (2.91) для временного шага интегрирования по неявной схеме, где присутствует множитель k . В работе отсутствует описание способа выбора данного множителя. Как данный множитель связан с критерием устойчивости численной схемы, полученным аналитически?
2. В главе 4 для расчета перемешивания компонентов в реакторе восстановления титана применяется метод функции тока. С учетом аксиальной симметрии технической системы такой подход смотрится обоснованным. Автор диссертации для расчета турбулентного течения в ламинарном приближении использует эффективные значения вязкости и температуропроводности, при этом не приводит в диссертации методику их определения. Поскольку турбулентная вязкость является крайне важным гидродинамическим фактором, отсутствие такого анализа снижает ценность работы.
3. При формулировке модели соискателем выводится выражение для эффективной (усредненной по времени) мощности теплового источника и силы Лоренца, которые далее используются в гидродинамической задаче.

Из текста диссертации неясно, как проводилась калибровка или верификация выражений для указанных слагаемых, использовалось ли при этом сравнение с литературными данными или проводилась проверка в лабораторном эксперименте.

Отмеченные недочеты не снижают научной значимости представленной диссертационной работы и высокого квалификационного уровня диссертанта. В целом, диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной соискателем самостоятельно. В диссертации приведены результаты, позволяющие квалифицировать их как решение актуальной научной задачи, имеющей существенное значение для развития подходов и методов математического моделирования физических процессов, в частности – в области конструирования и развития оборудования для металлургии. Текст автореферата и диссертации, а также выполненные публикации полностью отражают суть работы. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Диссертационная работа соответствует требованиям п.9–14 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакциях от 21.04.2016 № 335 и от 12.10.18 № 1168), а ее автор Никулин Илларион Леонидович достоин присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, доцент, заведующий учебно-научной лабораторией «Физика конденсированных сред», ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1, тел. раб. 8 (3412) 916-230, эл. почта mk@udsu.ru



Кривилев Михаил Дмитриевич

Я, Кривилев Михаил Дмитриевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Никулина Иллариона Леонидовича, и их дальнейшую обработку.



М.Д. Кривилев

Подпись официального оппонента заверяю.

05.05.2023

дата _____ по _____

Ученый секретарь ФГБОУ И



Л.А. Пушина