

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Гашкова Михаила Алексеевича

«Динамика расплавленного металла в катодном пятне вакуумного дугового разряда»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки» в диссертационном совете Д004.024.01 при Институте электрофизики УрО РАН по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106.

Актуальность. Исследованию процессов, происходящих в прикатодной области вакуумного дугового разряда, посвящено множество экспериментальных и теоретических работ. Такой интерес обусловлен необходимостью понимания механизмов самоподдержания вакуумного дугового разряда и механизмов эрозии катода. Теоретические и экспериментальные исследования в данной области позволили определить, что ключевую роль в самоподдержании вакуумной дуги играет взрывная электронная эмиссия обусловленная электрическим взрывом, образующихся в катодном пятне струй жидкого металла. На конечную форму и размер катодного пятна влияет множество факторов: сила тока, чистота поверхности, величина внешнего магнитного поля, термодинамические параметры самого вещества, поэтому установление механизмов эрозии катода и самоподдержания вакуумного дугового разряда с помощью только экспериментальных исследований весьма затруднительно. Таким образом, **актуальность** теоретических исследований гидродинамических процессов в ячейках катодного пятна не вызывает сомнения.

Автором исследованы гидродинамические процессы в жидкой фазе единичной ячейки катодного пятна вакуумной дуги. Был теоретически получен критерий формирования жидкометаллических струй и, следовательно, самоподдержания вакуумного дугового разряда. Представлена аналитическая модель гидродинамических процессов в катодном пятне. Оценены основные

временные и пространственные характеристики процесса, найдены минимальные значения давления плазмы и протекающего через кратер электрического тока, необходимые для расплескивания жидкого металла.

Автору удалось продемонстрировать, что процесс образования струй носит пороговый характер и установить, что за образование и развитие микронеоднородностей, появляющихся при истечении жидкого металла из микрократеров на поверхности катода вакуумной дуги, в широком диапазоне токов ответственна неустойчивость Релея-Плато.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 128 страницах, включая 50 рисунков, 6 таблиц. Список литературы содержит 122 наименования.

Во **введении** сформулированы основные цели и задачи диссертационной работы, обоснована актуальность исследований. Отмечена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Приведено краткое содержание диссертационной работы.

В **первой главе** приведен обзор состояния исследований процессов, происходящих на поверхности катода при горении вакуумного дугового разряда, а также процессов, сопровождающих столкновения капель с поверхностью. Изложены основы эктонной модели функционирования вакуумной дуги.

Во **второй главе** описывается принцип гидродинамического подобия и проводится обоснование применимости данного подхода к задачам диссертационной работы. Анализ динамики жидкого металла, проведенный во второй главе, для различных материалов катода (Cu, W, Au, Mo), а также с учетом цикличности дуговых процессов показал, что реализующиеся в катодном пятне при близких к минимальным токам условия соответствуют пороговым условиям расплескивания образования струй и капель. Также во второй главе был предложен критерий формирования жидкометаллических струй в катодном пятне вакуумной дуги, основанный на сравнении скорости истечения расплава из формирующихся кратеров и групповой скорости волн на поверхности жидкости.

В **третьей главе** представлена аналитическая модель расплескивания жидкого металла при формировании микрократера на поверхности катода при горении вакуумной дуги. Предложенная модель включает в себя две стадии расплескивания жидкого металла. На первой стадии движение жидкости обладает осевой симметрией, происходит формирование жидкометаллического вала, окружающего кратер. На второй стадии осевая симметрия нарушается в результате развития неустойчивости Релея-Плато верхней части вала. При этом, процесс распада вала носит пороговый характер.

В данной главе автором были найдены минимальные значения давления плазмы и протекающего через кратер электрического тока, необходимые для реализации режима расплескивания жидкого металла. Полученное условие расплескивания жидкого металла основано на сравнении потенциальной и кинетической энергий, образовавшегося по контуру кратера жидкометаллического вала. В рамках модели определены основные пространственные и временные характеристики процесса формирования струй. Полученные оценки основаны на предположении, что скорость жидкости при ее инерциальном движении постоянна.

В **четвертой главе** теоретически исследовалась динамика расплава при образовании кратеров в катодном пятне вакуумного дугового разряда. Процесс разбивался на два этапа: вытеснение жидкого металла из образующегося на поверхности катода микрократера с формированием вала по его контуру и распад вала на струи в результате развития азимутальных неустойчивостей его поверхности. На втором этапе рассматривалось развитие трехмерных неустойчивостей осесимметричного вала, параметры которого брались из данных численного моделирования первого этапа. Динамика развития неустойчивостей анализировалась с помощью дисперсионных соотношений для поверхностных волн, соответствующих различным типам неустойчивостей (неустойчивости Релея-Тейлора, и Релея-Плато).

Таким образом, был определен механизм образования микроструй, которые, согласно эктонной теории вакуумной дуги, играют ключевую роль в

воспроизводстве условий для взрывной электронной эмиссии и, следовательно, самоподдержания вакуумного дугового разряда.

В **заключении** диссертационной работы сформулированы основные полученные результаты и выводы.

В качестве результатов, обладающих **научной новизной**, следует отметить полученный критерий формирования жидкометаллических струй и, следовательно, самоподдержания вакуумного дугового разряда. Также следует отметить представленную аналитическую модель гидродинамических процессов в катодном пятне. Автору также удалось продемонстрировать, что процесс образования струй носит пороговый характер. Установить, что за образование и развитие микронеоднородностей, появляющихся при истечении жидкого металла из микрократеров на поверхности катода вакуумной дуги, в широком диапазоне токов ответственна неустойчивость Релея-Плато.

Теоретическая и практическая значимость работы. С моей точки зрения, полученные результаты важны для понимания механизмов ответственных за самоподдержание вакуумной дуги, а также механизмов эрозии катодов. Важным с практической точки зрения являются полученные автором формулировки пороговых условий горения дуги. Данные результаты могут быть применены при конструировании электрофизических установок.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением известных и современных исследовательских методов. В работе был использован известный принцип гидродинамического подобия, позволяющий сопоставлять процессы с различными характерными пространственно-временными масштабами: протекающими в катодном пятне и при столкновении капель жидкости с твердой поверхностью. Обоснование возможности применения данного метода к задачам диссертационной работы не вызывает сомнения. Также полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными других авторов в широком диапазоне параметров для различных материалов.

Диссертация хорошо структурирована, легко читается, изложена грамотным научным языком, демонстрирующим высокую квалификацию автора.

Диссертационная работа оформлена в соответствии с необходимыми требованиями.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

По материалу диссертационной работы имеются следующие **замечания**.

1. На странице 17, рисунок 1.5 и в тексте диссертационной работы отсутствует определение и размерность величины V .
2. На странице 43 обсуждается неустойчивость Рихтмайера-Мешкова как один из возможных механизмов образования короны при разбрызгивании капли. Классическая неустойчивость Рихтмайера-Мешкова - неустойчивость границы раздела двух сред различной плотности при прохождении через нее ударной волны. Из текста не понятно откуда берется ударная волна при формировании короны.
3. В третьей главе для определения характерных величин используется значение радиуса кратера, которое определяется экспериментально. Очевидно, что радиус кратера определенный экспериментально, то есть на момент кристаллизации расплава и радиус кратера в жидкой фазе отличаются по значению. Из текста диссертации не понятно, насколько такое расхождение существенно для исследуемых процессов.
4. В третьей главе были проведены оценки характерного времени расплескивания и числа Вебера основываясь на предположении, что скорость жидкости при ее инерциальном движении постоянна. Далее в третьей главе и четвертой главе делается вывод, что скорость развития неустойчивости Релея-Тейлора существенно меньше, чем Релея-Плато. В связи с этим представляется, что полученная оценка скорости развития неустойчивости Релея-Тейлора занижена.
5. Текст диссертационной работы содержит небольшое количество неточностей и опечаток. К примеру, страница 106 диссертационной работы.

Апробация. Работа широко обсуждалась на большом количестве российских и международных научных конференциях, семинаров.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 20 печатных научных работах, в том числе 6 статей в рецензируемых научных журналах. Все положения, выносимые на защиту, опубликованы в рецензируемых изданиях.

Общее заключение. Отмеченные недостатки работы, не снижают научную и практическую ценность работы. В целом, результаты, полученные автором, являются новыми научными знаниями. На основании изложенного можно заключить, что диссертационная работа «Динамика расплавленного металла в катодном пятне вакуумного дугового разряда» является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. Данная работа удовлетворяет требованиям к кандидатским диссертациям, установленным в п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор, Гашков Михаил Алексеевич, несомненно, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки.

Я, Лейви Артем Ячеславович, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертационной работы Гашкова Михаила Алексеевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент
кандидат физико-математических наук, специальность 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки», доцент кафедры «Физическая электроника» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»;

Подпись Лейви А.Я. удостоверяю

Лейви Артем Ячеславович
г. Челябинск, проспект Ленина, 76
e-mail: leiviai@susu.ru, тел. +7 (351) 272-30-51

26.11.2018

Лейви А.Я.
кандидат физико-математических наук, специальность 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки», доцент кафедры «Физическая электроника» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»;

Верно
Ведущий документовед
О.В. Гришина