



ГОСКОРПОРАЦИЯ «РОСАТОМ»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

«НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»

(АО «НИИЭФА»)

196641, Санкт-Петербург, поселок Металлострой, дорога на Металлострой, дом 3

Телефон: (812) 464-44-70, факс: (812) 464-46-23, <http://www.niiefa.spb.su>

ОКПО 008626377, ОГРН 1137847503067, ИНН / КПП 7817331468 / 781701001

17.12.2015 № 04-26/823

На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

Акционерного Общества «НИИЭФА

им. Д. В. Ефремова», д.ф.-м.н.

О. Г. Филатов

_____ 2015 г.



Отзыв ведущей организации

Акционерного Общества «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова»

на диссертацию Забелло Константина Константиновича

«Исследование влияния магнитных полей различной ориентации на характеристики катодного пятна вакуумной дуги и генерируемой пятном плазменной струи», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.04 – Физическая электроника

Актуальность темы диссертации

Вакуумная дуга широко используется в современной технике: нанесение функциональных покрытий, вакуумная плавка металлов, высоковольтные и высокоточные вакуумные размыкатели, мощные источники электронов, ионов, нейтронов, рентгеновского излучения и др., а её фундаментальные исследования ведутся уже на протяжении более 100 лет. Несмотря на это, многие парадоксальные

явления, происходящие в вакуумной дуге, не нашли общепризнанного объяснения до настоящего времени. Положительные ионы с катода движутся против электрического поля, катод испускает струю плазмы с такой скоростью, как будто он нагрет до миллиона градусов (реальная температура катодного пятна равна нескольким тысячам градусов), плазменный столб дугового разряда в магнитном поле движется в сторону обратную, чем предсказывает правило Ампера и т.д. Академик Г.А. Месяц в докладе «Взрывная электронная эмиссия: Порционная концепция электрической дуги» на Президиуме РАН 15.10.2013 г. назвал вакуумную дугу «одним из нераскрытых научных символов XX-го века». С учётом этого тема диссертационной работы К.К. Забелло, посвящённая фундаментальным исследованиям характеристик катодного пятна вакуумной дуги и генерируемой им плазменной струи в магнитных полях различной ориентации несомненно актуальна как с научной, так и практической точки зрения.

Основные результаты диссертации и их новизна

1. Определена средняя величина тока на катодное пятно (КП) для катодов из актуальных для практического применения материалов (Cu, CuCr30, Mo и W) в широком диапазоне величин и ориентации магнитных полей. Показано, что зависимость тока на КП от магнитного поля значительна при превышении критического значения угла наклона поля к нормали к поверхности катода, который определяется материалом катода. Впервые обнаружена зависимость тока на КП от длины вакуумной дуги.

2. В вакуумных дугах различной длины с катодами из Cu и CuCr30 установлена зависимость напряжения горения слаботочной дуги от индукции аксиального магнитного поля при различных величинах тангенциального магнитного поля. Показано, что она имеет V-образную форму.

3. Определено направление распространения плазменной струи катодного пятна во внешнем магнитном поле. Установлено, что уже в относительно небольших полях ($B \geq 0,1$ Тл) плазменная струя катодного пятна разворачивается вдоль направления внешнего магнитного поля на небольшом (~ 1 мм) расстоянии от поверхности катода.

4. Экспериментально показано, что плазменная струя катодного пятна (распространяющаяся в свободно горящей дуге в конус с углом ~ 100 градусов) под воздействием аксиального магнитного поля на расстояния от катода $z = (1-2)$ мм приобретает форму цилиндра радиусом ~ 1 мм при величине индукции $\sim 0,05$ Тл.

Публикации и апробация

Материалы диссертации опубликованы в 18 печатных работах, из них 8 – статьи в рецензируемых журналах, 10 – доклады в трудах международных и российских конференций.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, всероссийских и международных конференциях, в том числе:

- ФНТП-2004 (Петрозаводск);
- ФНТП-2007 (Петрозаводск);
- Международный симпозиум по разрядам и электрической изоляции в вакууме:
XXI, Ukraine, 2004;
XXII, Japan, 2006;
XXIII, Romania, 2008;
XXIV, Germany, 2010;
XXV, Россия, 2012;
XXVI, India, 2014.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается технически грамотной конструкцией экспериментальной установки (в частности, использованием искусственной длинной линии для формирования прямоугольного импульса тока с регулируемой длительностью), набором современных диагностических средств и применением экспериментальных методик с проверкой их достоверности на измерении известных полученных ранее данных.

Практическая значимость

Результаты работы могут быть использованы для моделирования движения катодного пятна, а также при выборе оптимальной конфигурации магнитного поля

для управления его динамикой в различных устройствах на основе вакуумно-дуговых разрядов (вакуумной коммутационной аппаратуре, источниках металлической плазмы, вакуумных нейтронных трубках и др.).

Содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 128 страниц, включая 55 рисунков и 6 таблиц. Список цитируемой литературы включает 124 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, выбран объект исследования, обозначены цели и задачи исследования. Сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приводятся положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен краткий обзор литературы, в котором выполнен анализ современных представлений о процессах инициации и протекания вакуумного дугового разряда и о воздействии магнитных полей на эти процессы. Описываются виды КП в зависимости от состояния поверхности катода (так называемые пятна первого и второго рода), даётся их классификация. Как объект исследования определяются катодные пятна второго рода. Подробно анализируются перемещение катодного пятна в свободногорящих (без магнитного поля) дугах и закономерности «обратного» движения КП под действием наложенного на дугу тангенциального поля. Рассмотрены известные результаты измерения напряжения горения вакуумной дуги в зависимости от тока и от наложенных на дугу магнитных полей. Обсуждаются результаты исследований среднего тока, пропускаемого КП, на разных материалах. Описываются и анализируются эрозионные процессы, происходящие в катодном пятне: испускание плазменной струи и эмиссия капель. Приводятся известные результаты по исследованию воздействия магнитного поля на плазменную струю катодного пятна. Выявляются недостаточность изученности воздействия магнитных полей на слаботочную вакуумную дугу и её привязку к катоду – КП и пробелы в существующих знаниях.

Во второй главе дано описание конструкции двух экспериментальных установок, использовавшихся для проведения работы, а также описана и обоснована методика определения направления распространения плазменной струи КП в

наклонном к поверхности катода магнитном поле. Описана установка для определения динамических характеристик КП и напряжения горения вакуумной дуги с одиночным КП в магнитных полях различной ориентации, на которой проводились электрические измерения и высокоскоростное фотографирование катодной привязки дуги. В качестве катода использовались цилиндрические электроды диаметром 30 мм с накладками на торцевой поверхности из исследуемого материала (бескислородная медь, композиция CuCr, молибден или вольфрам). Межэлектродный промежуток мог изменяться в диапазоне $h = 0 - 12$ мм. Аксиальное и тангенциальные магнитные поля создавалось парами катушек Гельмгольца, находящихся вне и внутри камеры. Величину обоих компонент магнитных полей можно было регулировать независимо в пределах $0 - 0,4$ Тл. Разряд поджигался с некоторой задержкой после подачи питания в катушки. Источник тока, использовавшийся для питания вакуумной дуги, позволял генерировать прямоугольный импульс тока, величиной до $I = 300$ А и длительностью до $t = 10$ мс. Обсуждается методика определения направления распространения плазменной струи в наклонном магнитном поле. Для реализации предложенного оригинального метода одновременного определения положения катодной и анодной привязок описана модернизация второй экспериментальной установки, на которой одновременно фотографировалась поверхность анода и действительное изображение поверхности катода, созданное сферическим зеркалом, расположенным вне вакуумной камеры. Также описана аппаратура и методика эксперимента для спектроскопических измерений, с помощью которых проводились исследования плазменной струи КП, находящейся под действием аксиального магнитного поля.

В третьей главе приводятся результаты исследований и их обсуждение. Приведены результаты определения среднего тока, пропускаемого КП в зависимости от комбинации приложенных магнитных полей. Зависимость от магнитного поля существенна лишь при превышении некоторого критического значения угла наклона поля к нормали к поверхности катода α^* , который определяется материалом катода и составляет $\alpha^* \approx 45^\circ$ (для электродов из CuCr30) и $\alpha^* \approx 30^\circ$ (для электродов из меди). Средние значения тока, пропускаемого КП для тугоплавких металлов Mo и W при воздействии различных по величине и наклону к поверхности катода магнитных полей качественно выглядят так же, как и распределения для меди и медь-хромовой композиции. В экспериментах с катодами из Mo и W было обнаружено, что средний

ток, пропускаемый КП, зависит не только от величины магнитного поля и его наклона, но и от длины межэлектродного промежутка. Представлены результаты исследования зависимости напряжения горения дуги от приложенного магнитного поля. Показано, что эти зависимости при отличных от нуля значениях тангенциальной компоненты магнитного поля имеют характерную V-образную форму. Приведены результаты определения динамических характеристик КП. Было обнаружено, что соотношение между углом φ наклона силовых линий магнитного поля к катоду и углом Робсона θ (углом отклонения КП от «противоамперова» движения) существенно зависит от длины межэлектродного промежутка. Приведены результаты определения направления распространения плазменной струи КП в зависимости от магнитного поля. Экспериментально определено расстояние от поверхности катода, на котором плазменная струя поворачивает по направлению внешнего магнитного поля ($Z_B < 1$ мм). Представлены результаты спектроскопических исследований плазменной струи КП. Полученные результаты показывают, что в свободно горящей вакуумной дуге несущая ток плазменная струя, истекающая из КП, распространяется в конусе с углом при вершине $\sim 100^\circ$. При воздействии аксиальным магнитным полем с индукцией $B \geq 0,02$ Тл форма плазменной струи меняется и, начиная с расстояния от катода $z = (1 - 2)$ мм, струя приобретает форму цилиндра, которую сохраняет на всей длине вплоть до анода.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. На катодах из меди и CuCr30 при фиксированном токе во всём исследованном диапазоне изменения результирующего магнитного поля количество КП распределено по нормальному закону. Обнаружена существенная зависимость параметров распределений от материала катода.

2. Зависимость параметров распределений от магнитного поля наблюдается только при превышении некоторого значения угла наклона поля к нормали к поверхности катода. Из полученных данных были определены средние токи, пропускаемые КП в магнитных полях различной ориентации.

3. В экспериментах с катодами из Mo и W было обнаружено, что средний ток, пропускаемый КП, зависит не только от величины магнитного поля и его наклона, а также от длины межэлектродного промежутка.

4. Зависимость среднего напряжения на дуге от величины нормального магнитного поля при фиксированном значении тангенциального поля имеет характерную V-образную форму.

5. Скорость ретроградного движения КП на катодах из Cu, CuCr, W и Mo в некотором диапазоне значений тангенциального магнитного поля $0 < B_t < B_0$ линейно зависит от индукции поля. Коэффициент пропорциональности зависит от тока дуги, длины дуги и степени эрозии поверхности. В магнитных полях, индукция которых превышает B_0 , зависимость скорости КП от поля насыщается. Значение B_0 определяется материалом катода.

6. Соотношение между углами φ (угол наклона магнитного поля к поверхности катода) и θ (угол Робсона) существенно зависит от длины межэлектродного промежутка, зависимость от материала катода несильная.

7. Плазменная струя КП поворачивает по направлению внешнего магнитного поля на сравнительно небольшом расстоянии от поверхности катода даже при умеренных значениях индукции магнитного поля. Для $B_n = 0,1$ Тл, $B_t = 0,05$ Тл расстояние, которое струя пройдет по нормали к катоду, < 1 мм.

8. Плазменная струя, истекающая из КП в свободно горящей дуге, распространяется в конус с углом ~ 100 градусов. Под воздействием аксиального магнитного поля на расстоянии от катода $z = (1-2)$ мм струя приобретает форму цилиндра радиусом ~ 1 мм уже при воздействии поля с индукцией $B_n \sim 0,05$ Тл.

9. Плазма в плазменной струе КП практически полностью ионизована, концентрация атомов низкая. Вблизи катода плазменная струя окружена «шубой» слабоионизованной плазмы. Анод является источником атомной струи, истекающей с его поверхности в межэлектродный промежуток. Эмиссия атомов с анода происходит вследствие бомбардировки поверхности анода быстрыми ионами плазменной струи КП. При попадании в плазму эти атомы быстро ионизируются.

Замечания

Положительно характеризуя работу К. К. Забелло, можно высказать, однако, и некоторые замечания:

1. В диссертационной работе не рассматривается и не анализируется вопрос соответствия характеристик импульсной и стационарной вакуумной дуги. Полученные результаты, относящиеся к импульсной (до 10 мс) вакуумной дуге, сопоставляются с известными из литературы характеристиками стационарной (десятки и сотни минут) вакуумной дуги, которые могут значительно отличаться и иметь разную природу.
2. Зависимость среднего тока, пропускаемого катодным пятном, также как соотношения между углом наклона магнитного поля к поверхности катода и углом Робсона от длины межэлектродного промежутка исследованы в диапазоне длин промежутка от 2 мм до 6 мм и только по двум крайним точкам, что недостаточно как с точки зрения используемых в практических приложениях длин межэлектродного промежутка (до десятков сантиметров), так и с точки зрения необходимой для исследования зависимости статистики.
3. Требуется более аргументированного и детального обоснования вывода об эмиссии атомов с анода вследствие бомбардировки его поверхности быстрыми ионами плазменной струи в стабилизированной вакуумной дуге и последующей ионизации этих атомов в плазменной струе. Чем вызвана эмиссия атомов: распылением материала ионами (энергия ионов в плазменной струе < 50 эВ) или испарением материала вследствие нагрева плазменной струей? Каким образом происходит ионизация эмитированных атомов в плазменной струе, учитывая, что энергия электронов в ней достигает лишь 2-3 эВ (первый потенциал ионизации атома меди $\sim 7,7$ эВ), а радиус плазменной струи вблизи анода в стабилизированной вакуумной дуге ~ 1 мм (приведённая в работе расчётная длина ионизации эмитированных атомов ~ 1 мм)?

Заключение

Диссертационная работа Забелло К.К. «Исследование влияния магнитных полей различной ориентации на характеристики катодного пятна вакуумной дуги и генерируемой пятном плазменной струи» представляет собой законченное научное

исследование, выполненное по актуальной тематике на высоком экспериментальном и теоретическом уровне. Достоверность результатов обеспечена набором современных диагностических средств и применением экспериментальных методик с проверкой их достоверности на измерении известных полученных ранее данных. Приведённые выше замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Проведённые автором исследования представляют как научный, так и практический интерес. Автореферат и публикации в полной мере отражают содержание диссертации, выводы и заключения обоснованы. Работа отвечает всем требованиям ВАК, включая п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации № 842 в редакции от 24.09.2013 года, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор – Забелло Константин Константинович достоин присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании научно-технического совета НТЦ «Синтез» АО «НИИЭФА», протокол № 10 от 10 декабря 2015 г.

Присутствовало на заседании 20 чел. Результаты голосования: «за» - 20 чел., «против» - нет., «воздержались» - нет.

Председатель секции НТС
отделения НТЦ «Синтез» АО «НИИЭФА»,
директор отделения НТЦ «Синтез»,
доктор физико-математических наук, профессор

Беляков В.А.

Ученый секретарь секции НТС
отделения НТЦ «Синтез» АО «НИИЭФА»,
ведущий научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук

Люблин Б.В.

Начальник научно-исследовательской
лаборатории вакуумных и плазменных технологий,
кандидат технических наук

Карпов Д.А.