

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Институт  
теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской  
академии наук

член-корреспондент РАН



 Д.М. Маркович

«19» октября 2018 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Денисова Владимира Викторовича  
**«Генерация низкотемпературной плазмы в сильноточном несамостоятельном  
тлеющем разряде с полым катодом»**, представленную на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности 05.27.02 - вакуумная и плазменная  
электроника

Плазма дуговых и тлеющих разрядов низкого давления перспективна для использования в процессах обработки поверхности материалов и изделий с целью придания ей улучшенных физико-механических и эксплуатационных свойств. Скорость процесса ионно-плазменного азотирования сталей и титана в такой плазме значительно превышает скорость обработки в плазме аномального тлеющего разряда. При этом достигается также улучшенное качество азотированной поверхности. Это определяет актуальность решения задачи генерации плазмы при низком давлении в больших вакуумных объемах при использовании разрядов низкого давления разных типов.

Решение вопросов, связанных с созданием систем, в которых генерируется плазма при низком давлении в объеме камеры до нескольких кубических метров, возможно в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления с полым катодом. Повышение объема вакуумной камеры и массо-габаритных параметров обрабатываемых изделий создает необходимость увеличения мощности разряда для получения необходимой средней плотности ионного тока на изделия в ходе его ионно-плазменной обработки, а, соответственно, и тока разряда. В силу этого важным становится определение условий стабильного зажигания и горения сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом, а также влияние различных факторов на степень однородности генерируемой плазмы.

Представляют научный интерес возможные способы применения такой сильноточной разновидности тлеющего разряда. Поэтому тематика диссертационной работы Денисова В.В., целью которой являлось исследование постоянного и импульсного режимов горения несамостоятельного сильноточного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом большого объема при токах инжекции электронов до нескольких десятков ампер и генерируемой в этих режимах низкотемпературной плазмы, а также использования такой плазмы для азотирования поверхности материалов и изделий, является актуальной и своевременной.

В ходе выполнения диссертационной работы для достижения поставленной цели был решен ряд важных задач:

исследование условий устойчивого зажигания и горения тлеющего разряда с полым катодом в области низких давлений при токах разряда до нескольких сотен ампер;

определение влияния рабочих параметров и условий инжекции электронов с токами величиной до нескольких десятков ампер на однородность распределения концентрации плазмы, генерируемой в несамостоятельном тлеющем разряде;

определение преимуществ использования плазмы импульсного несамостоятельного тлеющего разряда для азотирования металлических материалов.

Для каждого из рассмотренных вопросов получены новые и научно-значимые результаты.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений с общим объемом 166 страниц, содержит 74 иллюстрации и 11 таблиц.

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, задачи работы, положения, выносимые на защиту, научная новизна полученных результатов, их практическая значимость и достоверность, а также сведения о количестве основных публикаций автора по тематике диссертации.

**Первая глава** носит обзорный характер и посвящена критическому анализу современного состояния исследований в области генерации плазмы в тлеющих разрядах с полым катодом. Показаны основные преимущества использования для процессов азотирования плазмы разрядов низкого ( $\approx 1$  Па) давления. Оценивается возможность масштабирования электродной системы для данного типа разряда. Проведенный анализ систем инжекции высоких (до 100 А) значений электронного тока показал перспективность использования для этих целей дугового разряда низкого давления. Основные закономерности процессов азотирования металлов, приведенные в последней части обзора, позволили оценить необходимые значения токов в несамостоятельном тлеющем разряде для создания генератора плазмы на его основе.

Во **второй главе** приводятся результаты исследований стабильности зажигания и горения несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом при токах до нескольких сотен ампер. Представлены описание экспериментальной установки, оборудования и методик, которые использовались при исследовании несамостоятельного тлеющего разряда. Установлено, что при повышенных значениях тока разряда и, соответственно, концентрации плазмы тлеющего разряда при соответствующем размере ячейки сетки может происходить нарушение условия слоевой стабилизации границы эмиссионной плазмы вспомогательного дугового разряда, что приводит к замыканию тока вспомогательного дугового разряда на анод основного тлеющего разряда и, как следствие, снижение эффективности генерации объемной плазмы в рабочем объеме установки.

**Третья глава** посвящена рассмотрению влияния условий горения и параметров импульсного тлеющего разряда с полым катодом на однородность радиальных и азимутальных распределений плотности ионного тока из плазмы. Приведены результаты исследования влияния рабочего давления, напряжения горения, тока тлеющего разряда и соотношения площадей анода и катода тлеющего разряда на однородность распределений концентрации плазмы в разрядной камере. Установлено,

что повышение тока тлеющего разряда за счет увеличения тока инжектированных электронов приводит к повышению степени однородности генерируемой плазмы. В результате исследования влияния формы сеточного эмиссионного электрода, через который электроны инжектируются в плазму тлеющего разряда, на степень однородности концентрации плазмы в полой катоде, показано, что плоский сеточный эмиссионный электрод не позволяет добиваться удовлетворительной степени однородности плазмы в разрядном объеме в радиальном направлении, а для перспективной клинообразной формы эмиссионного электрода его минимальная высота должна быть равна ширине прикатодного падения потенциала.

**Четвертая глава** посвящена сравнению результатов азотирования технически чистого титана VT1-0 в плазме, генерируемой в постоянном и импульсном режимах горения тлеющего разряда. Показано, что импульсный режим горения тлеющего разряда позволяет получать в азотированном слое титана VT1-0 большее содержание азота, чем в модифицированном слое при обработке в постоянном режиме горения разряда при одинаковых температурах азотирования, средней плотности ионного тока на поверхность и энергии ионов. Это приводит к тому, что износостойкость титана после азотирования в плазме импульсного тлеющего разряда примерно в 5 раз больше, чем титана в исходном состоянии и на 60% больше, чем после азотирования в плазме постоянного тлеющего разряда.

В **Заключении** приведены основные результаты работы. Список цитируемой литературы (126 наименований) содержит обширную и достаточную библиографию по всем вопросам, рассмотренным в диссертации.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием современных методов диагностики и методик обработки данных, воспроизводимостью результатов экспериментов, сопоставлением экспериментально полученных результатов и численных оценок, а также практической реализацией полученных выводов при создании генератора объемной плазмы.

**Новизна исследования, научная значимость полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

1. Определены условия устойчивого горения самостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом объемом  $0,2 \text{ м}^3$  с токами до 450 А при токах инжекции электронов до 60 А.

2. Проведены детальные исследования влияния различных условий на однородность распределения концентрации плазмы величиной около  $10^{18} \text{ м}^{-3}$ , генерируемой в импульсном режиме горения самостоятельного тлеющего разряда с полым катодом.

3. Показано, что при токах инжекции электронов до 60 А в плазму самостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом с увеличением тока инжектированных электронов и вызванным этим ростом тока тлеющего разряда с 60 А до 240 А неоднородность распределения концентрации плазмы снижается.

4. Показано, что импульсный режим горения тлеющего разряда позволяет получать в азотированном слое титана VT1-0 большее содержание азота, чем в модифицированном слое при обработке в постоянном режиме горения разряда при одинаковых температурах азотирования, средней плотности ионного тока на поверхность и энергии ионов.

Научная значимость полученных в диссертации результатов заключается в том, что они демонстрируют возможность генерации относительно плотной плазмы при низком давлении в больших вакуумных объемах ( $> 0,1 \text{ м}^3$ ) при высокой равномерности распределения плазмы. Повышенная степень ионизации плазмы обеспечивает изменение по сравнению со слабоионизованной плазмой ряда свойств, в том числе проводимости, и, как показано в диссертационной работе, приводит к улучшению однородности. Это создает перспективы использования такой плазмы для генерации плотных электронных, ионных пучков и потоков плазмы как в научных исследованиях, так и технологических применениях в процессах электронно-ионно-плазменной обработки поверхности материалов и изделий. Полученная плазма по своим свойствам близка к азотно-кислородной плазме, формируемой в верхних слоях мало изученной мезосферы ( $\approx 80 \text{ км}$  над уровнем моря) и может использоваться в качестве модельной и для испытания объектов летательных аппаратов, преодолевающих этот слой в процессе эксплуатации. Как показано в диссертационной работе, полученная плазма уже применялась для азотирования титана и используемых в различных отраслях промышленности стальных изделий со скоростями, значительно превышающими скорость азотирования в наиболее широко распространенном в промышленности аномальном тлеющем разряде.

### **Практическая значимость полученных автором результатов.**

1. На основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления ( $0,4 - 1,2 \text{ Па}$ ), поддерживаемого инъекцией электронов из плазмы дугового разряда с катодным пятном, создан генератор плазмы, позволяющий в непрерывном и импульсном режимах горения разряда со средней мощностью до  $30 \text{ кВт}$  создавать плотную (до  $2 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ ) азотную плазму с неоднородностью не более  $\pm 30\%$  в объеме  $0,2 \text{ м}^3$  и обеспечивать среднюю плотность ионного тока на поверхность площадью  $2 \text{ м}^2$  свыше  $10 \text{ мА/см}^2$ .

2. Предложен и исследован способ азотирования титана ВТ1-0 в плазме сильноточного импульсного тлеющего разряда, обеспечивающий большее содержание внедренного азота и повышенную твердость азотированного слоя по сравнению с азотированием в плазме тлеющего разряда постоянного тока.

Полученные В.В. Денисовым в процессе диссертационных исследований результаты и выводы можно рекомендовать для использования в таких организациях, как ФГБОУ «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН), ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет». ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и других вузах и институтах РАН, а также на передовых промышленных предприятиях Российской Федерации.

### **Оценка содержания диссертации, ее завершенности**

Диссертация является завершенным научным исследованием и содержит решение всех поставленных задач. Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 05.27.02 - вакуумная и плазменная электроника. Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 22 печатных работах, из них 8 статей опубликовано в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК РФ. Подана заявка на патент РФ «Способ ионно-плазменного азотирования изделий из титана и титаносодержащих сплавов». О необходимом уровне освещения полученных научных

результатов в печати свидетельствует список публикаций. Опубликованные работы соответствуют тематике, основным положениям и выводам диссертационной работы.

Качество оформления диссертации высокое. По каждой главе сформулированы содержательные выводы, что облегчает понимание и анализ материала. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

1. На странице 81 работы указано, что вспомогательный дуговой разряд с холодным полым катодом стабильно зажигается и горит при нижнем пороговом рабочем давлении (0,2 Па). Известно, что катодное пятно может существовать и при более низких давлениях. Автор не объясняет, почему применяемая схема дугового разряда нестабильно функционирует при более низких давлениях?

2. В главе 4 приведены данные об азотировании титана и показано, что процесс проходит с большей скоростью в плазме импульсного тлеющего разряда, нежели в плазме постоянного тлеющего разряда при прочих равных условиях. Однако в работе ничего не упоминается о сравнении этих режимов азотирования на других материалах (например, сталях).

3. В обзорном материале на странице 51 говорится об интенсификации реакций образования атомарных ионов и нейтралов, ответственных за процесс азотирования, при добавлении в азотосодержащую смесь Ag или He. В то же время при сравнении режимов азотирования титана в плазме импульсного и стационарного тлеющего разряда азотирование титана проводилось лишь в азоте особой чистоты. Не было бы более эффективно использовать в исследованиях азотосодержащую смесь с Ag, He или другими газами? Как это скажется на выводах, сформулированных для случая напуска азота?

4. К замечаниям можно отнести слишком большой объем литературного обзора диссертации, который составляет 55 страниц вместе с Введением. Также текст диссертации содержит незначительные стилистические погрешности.

Сделанные замечания не снижают общей научной и практической ценности диссертационной работы.

#### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**


На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что диссертация В.В. Денисова является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задач, имеющих существенное значение для дальнейшего развития соответствующих разделов вакуумной и плазменной электроники, а также техники генерации низкотемпературной плазмы в больших вакуумных объемах для модификации поверхностей материалов и изделий.

На основании изложенного считаем, что диссертация В.В. Денисова соответствует всем требованиям ВАК и требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями, внесенными Постановлением Правительства РФ от 21 апреля 2016 г. № 335), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Владимир Викторович Денисов



заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.02 - вакуумная и плазменная электроника.

Отзыв на диссертацию Денисова В.В. обсужден и одобрен на расширенном научном семинаре лаборатории экологических проблем теплоэнергетики Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН в качестве отзыва ведущей организации (протокол № 7.1/2018-4 от 16 октября 2018 г.).

Доктор технических наук, профессор  Аньшаков А.С.

Аньшаков Анатолий Степанович,

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории экологических проблем теплоэнергетики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

Почтовый адрес: г. Новосибирск, 630090, проспект Академика Лаврентьева, д. 1.

Телефон: 8 (383) 330-80-92, адрес электронной почты: anshakov@itp.nsc.ru.

Подпись А.С. Аньшакова заверяю:

Ученый секретарь ИТ СО РАН

к.ф.-м.н.



М.С. Макаров

« 18 » октября 2018 г.