

На правах рукописи

Лопатин Илья Викторович

**ГЕНЕРАЦИЯ ОБЪЕМНОЙ ПЛАЗМЫ В РАЗРЯДАХ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ
С ПОЛЫМ КАТОДОМ ДЛЯ АЗОТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ
МЕТАЛЛОВ**

05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Коваль Николай Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Окс Ефим Михайлович
(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», заведующий кафедрой, г. Томск);

доктор технических наук, профессор,
Ремнев Геннадий Ефимович
(Институт физики высоких технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», заведующий лабораторией, г. Томск).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уфимский государственный авиационный технический университет", г. Уфа.

Защита состоится «20» декабря 2013 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 003.031.01 в Институте сильноточной электроники СО РАН по адресу: 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института сильноточной электроники СО РАН

Автореферат разослан « » 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

В.В. Рыжов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время в промышленности все большее применение находят вакуумно-плазменные технологии модификации поверхности материалов и изделий. Такие технологии включают в себя напыление функциональных покрытий, азотирование поверхности, имплантацию ионов и другие процессы, позволяющие существенно улучшить свойства поверхности и, как следствие, повысить ресурс изделий в целом. При реализации данных технологий возникает необходимость получения плотной низкотемпературной плазмы, для генерации которой обычно используются тлеющий разряд, ВЧ- и СВЧ- разряды, вакуумный дуговой разряд, а также разряд низкого давления с накаливаемым катодом.

Наиболее распространенный, на данный момент, в промышленности ионно-плазменный метод азотирования - это азотирование поверхности в плазме тлеющего разряда. Этот метод относится к химико-термическим и позволяет производить однородную обработку крупногабаритных, массивных деталей, повышая их износостойкость и коррозионную стойкость. Однако, в силу того, что обработка производится при давлениях $\sim (100 - 500)$ Па в столкновительном режиме, применение данного метода исключает эффективную ионную очистку обрабатываемой поверхности, что существенно замедляет химико-термический процесс обработки. Кроме того, азотирование в плазме тлеющего разряда требует введения в рабочую газовую смесь водорода, либо водородсодержащих газов, для химического связывания остаточного кислорода, образующего оксиды на обрабатываемой поверхности, что усложняет эксплуатацию таких устройств и повышает требования к безопасности и экологичности производства.

Применение ВЧ- и СВЧ- разрядов для модификации поверхности материалов и изделий в последнее время становится все более распространенным, однако до сего момента окончательно не решены проблемы связанные с высокой стоимостью оборудования такого типа, сложностью его эксплуатации, а главное, с масштабированием данных методов обработки для модификации поверхности крупногабаритных изделий.

Дуговые разряды непрерывного действия позволяют получать газоразрядную плазму с высокой концентрацией ($10^{15} - 10^{18}$) м^{-3} в объемах до нескольких м^3 . В сочетании с широким диапазоном рабочих давлений и низким напряжением горения, такой разряд дает возможность организовать различные типы ионно-плазменной модификации поверхности материалов. Однако наличие в плазменном потоке микрокапельной фракции ограничивает использование данных устройств в технологических процессах и требует разработки сложных систем сепарации плазменного потока от микрокапель. Кроме того, в таких системах однородность обработки достигается путем вращения и перемещения обрабатываемых деталей, а энергия бомбардирующей модифицируемую поверхность ионов задается отдельным источником электрического смещения, что усложняет конструкцию таких систем и ограничивает сферу их применения.

Использование разряда низкого давления с накаливаемым катодом обеспечивает генерацию плазменного потока без микрокапель. Кроме того, такие системы позволяют работать при уровнях разрядного тока от долей ампера до сотен ампер, что обеспечивает широкий диапазон регулирования плотности плазмы. Диапазон рабочих давлений таких систем находится в пределах от 0.01 Па до 5 Па и позволяет

эффективно осуществлять ионную очистку и ионно-плазменное азотирование. Все это определяет перспективы широкого использования разряда с накалившимся катодом в системах эффективной генерации плотной низкотемпературной плазмы. Основным недостатком таких систем является малое время непрерывной работы накалившегося катода, которое при токах разряда в сотни ампер составляет 8 – 10 часов. В этой связи, решение проблем, связанных с увеличением срока службы накалившегося катода и обеспечением надежного зажигания и устойчивого горения разряда в широком диапазоне рабочих давлений, определяет актуальность исследований и увеличивает возможность включения работы этих источников в автоматические циклы обработки как отдельно, так и совместно с другими типами источников плазмы.

Помимо указанных выше, актуальной является задача исключения механизмов вращения крупногабаритных изделий, в процессе их обработки, при обеспечении эффективной ионной очистки их поверхности. Эти задачи могут быть решены при использовании газоразрядных систем на основе несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом большой площади. Напряжение горения разряда такого типа, на уровне сотен вольт, позволяет достигать сравнимых энергий бомбардирующих поверхность ионов и, таким образом, избавиться от дополнительного источника электрического смещения, а осуществление внешней инжекции электронов обеспечивает возможность регулировки тока разряда и напряжения его горения независимо от рода используемого газа и его давления.

Из выше перечисленного следует, что разработка нового эффективного оборудования для ионно-плазменной обработки поверхности материалов и изделий в плазме разрядов низкого давления с накалившимся катодом и с полым катодом большой площади актуальна и имеет большое значение для создания новых технологий модификации поверхностей.

Цель исследований. Исследование генерации низкотемпературной объемной плазмы в разрядах низкого давления с комбинированным накалившимся и полым катодом, а также с холодным полым катодом большой площади, разработке оборудования и проведению экспериментов по азотированию поверхности металлов и сплавов в такой плазме.

Основные задачи исследований:

1. Разработка и создание конструкции плазменного источника с комбинированным накалившимся и полым катодом, обеспечивающего стабильное зажигание и устойчивое горение несамостоятельного дугового разряда в широком диапазоне разрядного тока и рабочего давления.

2. Поиск и реализация методов увеличения срока службы накалившегося катода в такой системе.

3. Исследование в данной разрядной системе условий генерации однородной газоразрядной плазмы в больших вакуумных объемах.

4. Реализация разрядной системы с полым катодом большой площади и внешней инжекцией электронов, в которой для генерации инжектируемых электронов используется плазма дугового разряда низкого давления.

5. Реализация процессов азотирования в разработанных газоразрядных системах с целью оптимизации параметров упрочнения поверхности материалов.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Выявлены закономерности влияния собственного магнитного поля тока накала катода на мгновенное значение тока несамостоятельного разряда низкого давления и напряжение его горения в электродной системе созданного плазмогенератора, что позволило оптимизировать конструкцию накаливаемого катода, увеличив его ресурс в ≈ 2 раза до $\approx (20 - 25)$ часов непрерывной работы.

2. Предложена конструкция электродной системы и установлены зависимости изменений параметров плазмы (концентрации и потенциала плазмы, а также температуры электронов) от изменений тока и напряжения горения несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом при генерации низкотемпературной объемной плазмы, что позволяет выбирать оптимальные условия горения разряда с прогнозируемой плотностью ионного тока на обрабатываемую поверхность.

3. Проведены исследования тлеющего разряда с полым катодом большой площади, а также параметров генерируемой им плазмы в самостоятельном и несамостоятельном режимах горения и показано, что поддержание такого разряда в несамостоятельном режиме позволяет снизить напряжение его горения до ≈ 3 -х раз ($c \approx 630$ В до ≈ 190 В), обеспечивая сравнимые значения плотности генерируемой плазмы.

4. Показано, что в несамостоятельном режиме горения тлеющего разряда с полым катодом большой площади возможно удержание неизменными напряжения его горения, его тока и концентрации плазмы при изменении соотношения площадей анода и катода основного разряда путем изменения тока вспомогательного разряда, определяющего ток инжектированных в катодную полость электронов.

Практическая ценность работы заключается в том, что:

1. Создана конструкция плазмогенератора с комбинированным накаливаемым и полым катодом, отличающегося возможностью инициирования разряда с заданными параметрами и стабильностью работы в широких диапазонах рабочего давления (от 0.04 Па до 1.2 Па) и тока разряда (от 0.5 А до 200 А), что обеспечивает генерацию однородной газоразрядной плазмы в объеме 0.25 м^3 с концентрацией $(10^{15} - 10^{17}) \text{ м}^{-3}$, которая используется для эффективной комплексной ионно-плазменной обработки поверхности материалов и изделий.

2. Предложена и создана разрядная система на основе тлеющего разряда с холодным полым катодом большой площади, обеспечивающая эффективное проведение процессов азотирования металлов и сплавов без использования дополнительного источника электрического смещения и механизма вращения обрабатываемых образцов и деталей при обеспечении их непрерывной ионной очистки в процессе азотирования, которая перспективна для обработки изделий для авиационной, автомобильной и машиностроительной промышленности.

3. Разработаны процессы азотирования сталей в плазме тлеющего разряда с холодным полым катодом большой площади, которые позволяют увеличивать микротвердость обрабатываемой поверхности в $(4 - 8)$ раз при глубине обработки до 300 мкм за время $(2 - 4)$ часа, что в $(2 - 3)$ раза быстрее, чем при традиционном азотировании в плазме тлеющего разряда, горящего в диссоциированном аммиаке.

4. Проведены процессы азотирования технически чистого титана ВТ1-0 и титанового сплава ВТ-6 в плазме тлеющего разряда с полым катодом большой площади в несамостоятельном режиме горения при плотности тока $\approx 15 \text{ мА/см}^2$ и напря-

жении горения разряда ≈ 130 В, в результате которых твердость поверхности образцов увеличилась в (5.5 – 7.5) раза.

5. Разработаны и поставлены Заказчику автоматизированные ионно-плазменные установки «ДУЭТ» (Itac.ltd, г. Ниигата, Япония) и «КВАДРО» (PVD Hitech coating. ltd, г. Торонто, Канада) для комплексной обработки поверхности материалов и изделий, включающей азотирование и напыление твердых покрытий.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. В плазменном источнике на основе дугового разряда с накаливаемым катодом при замене одиночного вольфрамового катода на несколько параллельно включенных нитей меньшего диаметра ослабляется влияние собственного магнитного поля тока накала на параметры разряда, что приводит к снижению мощности накала и повышению ресурса устройства.

2. Введение в электродную систему плазменного источника на основе несамостоятельного дугового разряда дополнительного поджигающего электрода, расположенного вблизи накаливаемого катода и соединенного с анодом через балластное сопротивление (10 – 50) Ом, обеспечивает стабильное инициирование разряда и устойчивую генерацию плазмы при пониженном давлении и напряжении зажигания разряда, сравнимом с его напряжением горения, что расширяет динамический диапазон основных параметров плазменного источника.

3. В разрядной системе двухступенчатого генератора плазмы на основе несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом большой площади и внешней инжекцией электронов стабилизация напряжения горения разряда и концентрации плазмы при различных соотношениях площадей катода и анода обеспечивается соответствующим изменением тока инжектируемых электронов.

4. В результате проведенных исследований систем генерации плазмы на основе несамостоятельных разрядов низкого давления созданы и внедрены технологические установки для комплексной модификации свойств поверхности материалов и изделий, позволяющие в едином вакуумном цикле производить очистку и активацию поверхности газовыми ионами, ионно-плазменное азотирование, а также плазменно-ассистированное нанесение металлических и композиционных покрытий. Созданные устройства обеспечивают равномерную обработку протяженных объектов, большую производительность и эффективность и позволяют проводить технологические процессы в автоматическом режиме.

Апробация работы. Основные результаты данной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: 5 - 11 Международных конференциях по модификации материалов пучками заряженных частиц и потоками плазмы (Томск, Россия, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012); 25 Международной конференции по явлениям в ионизированных газах (ICPIG) (Нагоя, Япония, 2001); 5 Российско-Корейском Международном симпозиуме по науке и технологии (Томск, Россия, 2001); Международном симпозиуме по исследованию и применению плазмы (Варшава, Польша, 2001); Всероссийской конференции «Физико-химия ультрадисперсных (нано-) систем» (Томск, Россия, 2002); 1 Всероссийской конференции молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем» (Томск, Россия, 2005); 3 - 5 Всероссийских конференциях молодых ученых «Фундаментальные проблемы новых технологий в 3-м тысячелетии» (Томск, Россия, 2006, 2009,

2012); 3 Международном Крейнделевском семинаре «Плазменная эмиссионная электроника» (Улан-Удэ, Россия, 2009).

Личный вклад автора. Автору принадлежит основная роль в получении результатов, описанных в диссертации. Научному руководителю доктору технических наук Н.Н. Ковалю и главному научному сотруднику, доктору физико-математических наук П.М. Щанину принадлежат определение цели и постановка задач исследований. Автор внес определяющий вклад в планирование и проведение экспериментов, а также в анализ полученных результатов и формулирование основных положений и выводов по диссертации. Соавторы, участвовавшие в исследованиях по отдельным направлениям, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации. Обсуждение и анализ полученных результатов проводились соискателем совместно с научным руководителем и главным научным сотрудником П.М. Щаниным. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 24 работах, включая **8 статей** в отечественных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, **1 статью** в зарубежном научном журнале, имеющем импакт-фактор более 2 и **15 полных текстов докладов** в трудах отечественных и зарубежных научных конференций.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений с общим объемом 161 страница, содержит 76 рисунков и 5 таблиц. Список цитируемой литературы включает 119 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность исследований, сформулированы цели и задачи работы, представлена научная новизна и практическая ценность результатов, приведены основные защищаемые научные положения и сведения о публикациях автора по теме диссертации.

В первой главе приведен обзор различных методов и устройств, обеспечивающих ионизацию и диссоциацию азотсодержащих газов в условиях разрядов низкого давления с целью эффективного проведения процессов азотирования поверхности металлов и сплавов.

Рассматриваются системы генерации плазмы на основе тлеющего разряда: классического, с одинарным и двойным активным экраном, с использованием эффекта сеточного противокатода, с полым катодом большой площади, системы с накаленным катодом, а также системы основанные на вакуумно – дуговом и электронно – пучковом разрядах. Особое внимание уделяется системам генерации плазмы на основе тлеющего разряда с полым катодом большой площади и системам с накаленным катодом т.к. такие системы позволяют интенсифицировать процесс образования плазмы в диапазонах давлений, при которых реализуется эффективная ионная очистка поверхности. При этом возможности использования систем с полым катодом большой площади для азотирования ограничены, в силу малой плотности тока на катоде при высоких напряжениях горения разряда. Однако такие системы способны обеспечивать хорошую однородность распределения плотности ионного тока по объему камеры (полого катода), что позволяет ожидать высокую однородность ионной обработки крупногабаритных деталей без использования механизмов

их вращения. Системы с накаливаемым катодом позволяют совмещать разные методы ионно-плазменной обработки в едином технологическом цикле, однако существенным недостатком таких систем является малое время работы накаливаемого катода. Проведенный анализ показал, что основными проблемами, которые необходимо решать с целью улучшения эксплуатационных характеристик плазменного электро-разрядного оборудования рассмотренных типов, является: низкая плотность ионного тока на подложку при высокой энергии бомбардирующих ее ионов в системах с полым катодом большой площади, а также малое время работы накаливаемого катода при больших разрядных токах и невозможность зажигания разряда во всем диапазоне его горения для систем с накаливаемым катодом. Это позволило сформулировать основные задачи исследований.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям предложенного и созданного плазмогенератора с накаливаемым катодом, оснащенного узлом поджига разряда и обеспечивающего надежное зажигание и горение разряда с током от 0.5 А до 200 А в диапазоне давления от 0.04 Па до 1.2 Па (рис. 1). При включении магнитной катушки, подаче напряжения на электроды разрядной системы происходит зажигание разряда. Электроны, эмитируемые накаливаемым катодом, замыкаются на поджигающий электрод, ионизируют рабочий газ и создают в полой камере газоразрядную плазму. Вследствие зажигания разряда в промежутке накаливаемый катод – поджигающий электрод, полый катод предварительно заполняется плазмой. Далее, вследствие градиента концентрации плазмы, она распространяется в основной анод (камеру) и из-за наличия токоограничивающего балластного сопротивления в цепи поджигающего электрода, разряд переключается на основной анод, а в цепи поджигающего электрода протекает небольшой ток (до одного ампера), что стабилизирует горение основного разряда и не дает ему погаснуть при колебаниях давления в камере, а также обеспечивает зажигание разряда при срабатывании системы гашения микродуг. Внешнее магнитное поле заворачивает электроны, вышедшие с накаливаемого катода, тем самым удлиняя их траекторию и увеличивая эффективность ионизации. Высота плазмогенератора составляет ~ 600 мм, наружный диаметр посадочного фланца – 330 мм.

Проведенные исследования

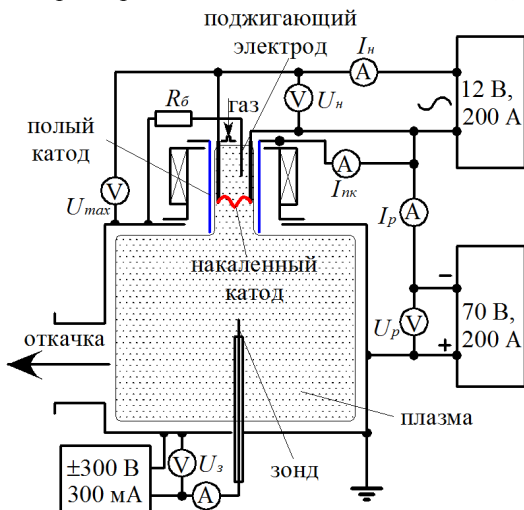


Рисунок 1. Схема эксперимента по исследованию параметров разряда и характеристик плазмы:

I_n – ток накала; $I_{нк}$ – ток в цепи полого катода; I_p – общий ток разряда; U_p – напряжение горения разряда; U_n – напряжение накала; U_{max} – напряжение между анодом и свободным концом накаливаемого катода; U_z – потенциал зонда относительно анода.

влияния направления внешнего продольного магнитного поля плазмогенератора на ток и напряжение горения разряда при использовании накаливаемого катода, выполненного из 2-мм вольфрамовой проволоки (катод «1»), показали, что направление внешнего магнитного поля влияет на форму осциллограмм тока разряда, напряжение его горения и импеданс разрядного промежутка. Показано, что импеданс разрядного промежутка имеет пики вблизи максимума тока накала. Это объясняется влиянием собственного магнитного поля тока накала на движение ускоренных в катодном слое электронов. Электроны, ускоренные в катодном слое разряда, под воздействием собственного магнитного поля тока накала, движутся вдоль катода по трохойде, уходя от его поверхности в плазму лишь в случае неупругого столкновения с молекулами газа. Проведенные оценки показывают, что собственное магнитное поле тока накала искажает не только временное распределение эмиссии электронов в плазму, но и пространственное. В случае, когда длина свободного пробега электронов меньше характерных размеров катода это приводит к неоднородному распределению плазмы, неоднородному ионному травлению катода и, соответственно, неравномерному его износу. В местах наибольшего износа катода происходит его перегорание. Для подтверждения этого был проведен соответствующий эксперимент по определению равномерности износа накаливаемого катода, который показал, что между областями 2.1 и 2.2, а также в середине области 2.4 (см. рис. 2) наблюдается повышенный износ катода. Установлено также, что разрушение катодов преимущественно происходит в характерных областях (указанных на рис. 2), расположение которых хорошо коррелирует с оценками и результатами измерения износа. Таким образом, сделан вывод о том, что неравномерный износ термокатода, обусловленный влиянием собственного магнитного поля на эмиссию термоэлектронов, приводит к уменьшению ресурса работы термокатода.

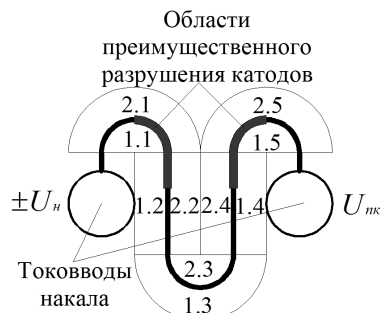


Рисунок 2. Области оценки износа и преимущественного разрушения накаливаемого катода

Для ослабления влияния собственного магнитного поля тока накала на горение разряда накаливаемый катод был выполнен из 4-х параллельно включенных вольфрамовых нитей $\varnothing 0.8$ мм (катод «2»), при этом влияния собственного магнитного поля на форму осциллограмм, при тех же условиях горения разряда, выявлено не было, а время непрерывной работы накаливаемого катода до его разрушения увеличилось в 2 – 3 раза и составило $\sim (20 - 25)$ часов, что удовлетворяет большинству практических применений плазмогенератора.

Снижение давления в разрядной системе увеличивает влияние собственного магнитного поля тока накала на форму тока разряда из-за увеличения длины свободного пробега эмитированных с катода электронов. Это приводит к прерыванию тока разряда при использовании катода «1» (рис. 3), однако введение системы поджига позволяет разряду зажигаться после прерывания тока, обеспечивая импульсно-периодический режим работы плазмогенератора. Использование катода «2» позволяет снизить минимальное давление горения разряда, на которое также влияет величина внешнего магнитного поля (табл. 1), а также позволяет снизить ток накала на $\sim 25\%$ и энергозатраты на нагрев катода на $\sim 8\%$.

Вольт – амперная характеристика разряда имеет растущий характер (рис. 4 а). Это объясняется тем, что для увеличения тока разряда необходимо увеличение тока эмиссии с накаливаемого катода, что достигается при росте напряжения горения разряда. При этом увеличивается энергия электронов, ускоряемых в катодном слое разряда, сечение ионизации растет, что приводит к увеличению концентрации плазмы вблизи накаливаемого катода и, соответственно, к увеличению плотности ионного тока на накаливаемый катод. Рост ионного тока на накаливаемый катод увеличивает степень компенсации пространственного заряда электронов вблизи накаливаемого катода, что приводит к росту тока эмиссии. Это, в свою очередь, приводит к дальнейшему росту концентрации плазмы и плотности ионного тока на полый катод.

При исследовании параметров плазмы в центре камеры цилиндрическим лэнгмювским зондом фиксируются две группы электронов (рис 4 б). Для одной группы температура электронов составляет ~ 1 эВ, а концентрация имеет порядок 10^{17} м^{-3} и растет с увеличением тока разряда. Для второй группы электронов характерно направленное вдоль оси плазмодизатора движение, энергия данных электронов составляет ~ 5 эВ, а концентрация 10^{16} м^{-3} и также растет с увеличением тока разряда. Потенциал плазмы всегда остается положительным относительно анода и, плавно нарастая с увеличением тока разряда, составляет для азота $\sim (2 - 2.5)$ В.

Использование системы поджига разряда позволяет зажигать разряд во всем приведенном диапазоне напряжения горения разряда (в азоте от 33 В до 60 В), по-

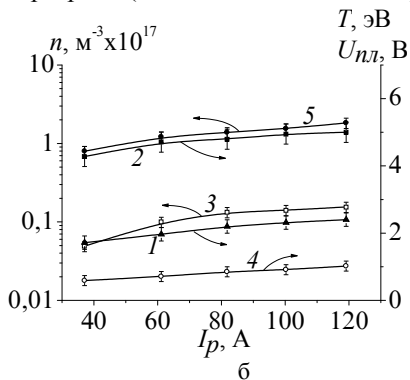
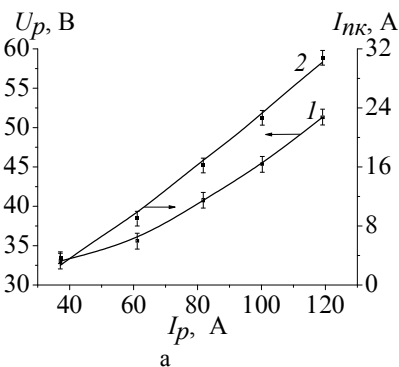


Рисунок 4. Зависимость от тока разряда: (а) - напряжения горения разряда (1) и тока в цепи полого катода (2); (б) - параметров плазмы (1- потенциал плазмы $U_{пл}$, 2 и 4 энергия быстрых T_{ef} и температура плазменных электронов T_e , соответственно; 3 и 5 концентрация быстрых n_{ef} и плазменных n электронов, соответственно): $p_{N_2} = 1$ Па, $I_H = 165$ А, $B = 2.1$ мТл.

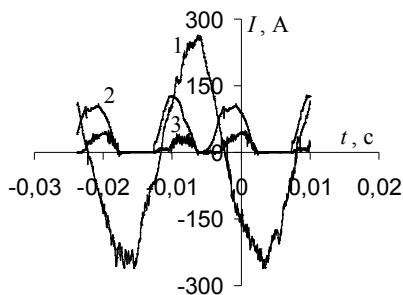


Рисунок 3. Оциллограммы тока накала I_n (1), тока разряда I_p (2) и тока на полый катод $I_{нк}$ (3): $p_{N_2} = 0.4$ Па, катод «1», $B = 0.3$ мТл, $I_p \text{ действ.} = 50$ А.

Таблица 1. Зависимость давления погасания разряда от величины внешнего магнитного поля, рабочий газ – азот.

$B_{\text{внешн.}}$ мТл	Катод «1»	Катод «2»
0.3	0.35 Па	0.09 Па
2.1	0.23 Па	0.07 Па
3	0.18 Па	0.04 Па

тери тока на поджигающем электроде при этом не превышают 1.5% от тока разряда при его минимальной величине.

При увеличении давления p ток разряда I_p растет, а напряжение его горения U_p падает (рис. 5 а). Ток в цепи полого катода $I_{нк}$ при этом также растет. Такое поведение зависимостей объясняется тем, что при увеличении давления сокращается длина свободного пробега электронов, ускоренных в катодном слое разряда. Это приводит к росту концентрации плазмы вблизи накаливаемого катода и, соответственно, увеличению плотности ионного тока, приходящего на накаливаемый катод. Пространственный заряд электронов вблизи накаливаемого катода частично компенсируется, что приводит к росту тока эмиссии с накаливаемого катода и, соответственно, дальнейшему росту концентрации плазмы и ионного тока, что объясняет рост тока в цепи полого катода. При этом энергия электронов быстрой группы падает с ~ 12 эВ до ~ 5 эВ (рис. 5 б), что свидетельствует об улучшении эффективности утилизации энергии первичных электронов на ионизацию газа. Температура электронов медленной группы остается практически неизменной, а концентрации обеих групп электронов возрастают в ~ 2 раза. Изменения потенциала плазмы и плавающего потенциала хорошо коррелируют с изменением энергии электронов быстрой группы. Использование системы поджига разряда позволяет разряду зажигаться и стабильно гореть при минимальных давлениях азота от $p \approx 0.07$ Па. Потери тока разряда на поджигающем электроде увеличиваются с уменьшением давления, но не превышают $\sim 4\%$ при давлении 0.07 Па.

При использовании накаливаемого катода из 4-х вольфрамовых нитей $\varnothing 0.8$ мм изменение величины внешнего магнитного поля, при давлении в камере $p \sim 1$ Па, не оказывает существенного влияния ни на величину тока разряда и напряжение его горения, ни на основные параметры плазмы. Потери тока разряда на поджигающем электроде в этих условиях существенно не меняются и не превышают 0.4%. При величине внешнего магнитного поля $B < 1.5$ мТл снижается стабильность работы плазмогенератора, разряд чаще переходит в дуговой режим с образованием катодного пятна на поверхности полого катода.

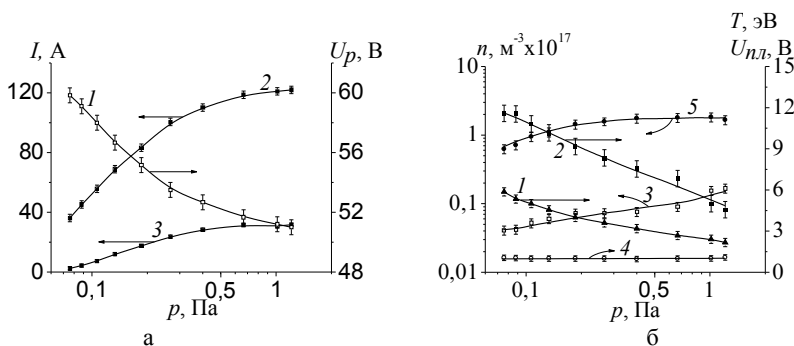


Рисунок 5. Зависимость от давления: (а) – напряжения горения разряда (1), тока разряда (2) и тока в цепи полого катода (3); (б) - параметров плазмы (1 – потенциал плазмы $U_{nл}$; 2 и 4 энергия быстрых T_{ef} и температура плазменных электронов T_e , соответственно; 3 и 5 концентрация быстрых n_{ef} и плазменных электронов n , соответственно). Рабочий газ – N_2 , ток накала $I_n=165$ А, магнитное поле $B = 2.1$ мТл.

Увеличение тока накала приводит к росту тока разряда и снижению напряжения его горения (рис. 6). Потери тока разряда в цепи поджигающего электрода при уменьшении тока накала растут, и при токе разряда $I_p \sim 0.5$ А могут достигать $\sim 25\%$, однако без системы поджига разряд не зажигается и не может стабильно гореть при токах разряда $I_p < (3 - 5)$ А.

Третья глава посвящена исследованию генерации низкотемпературной плазмы в тлеющем разряде с полым катодом большой площади в самостоятельном и несамостоятельном режимах горения.

С целью определения зависимости характеристик тлеющего разряда с полым катодом большой площади (основной разряд) и параметров его плазмы от внешней инжекции электронов из плазмы дугового разряда с холодным полым катодом (вспомогательный разряд) проводились исследования основного разряда в режиме, когда первичные электроны рождались только за счет γ -процессов на поверхности катода (самостоятельный режим горения) и в режиме, когда в камеру инжектировались электроны (несамостоятельный режим горения). Схема экспериментальной установки с реализацией двухступенчатой генерации плазмы на основе несамостоятельного тлеющего разряда приведена на рис. 7. Основной разряд зажигался между полым катодом (камерой) 3 с площадью поверхности 2×10^4 см² и водоохлаждаемым U-образным анодом 1, площадь которого могла изменяться от 125 см² до 500 см². Напуск рабочего газа (аргона или азота) в рабочую камеру производился через источник электронов, который помещался на боковой стенке камеры. Эмиссия электронов в полый катод – камеру производилась через эмиссионное окно диаметром 160 мм. Для разделения плазмы основного и вспомогательного разрядов эмиссионное окно перекрывалось сеткой 5, которая являлась анодом для вспомогательного разряда и одновременно находилась под потенциалом катода основного разряда. Для обеспечения напряжения горения основного разряда в несамостоятельном режиме до ~ 400 В в электродную систему вводилась дополнительная сетка 4, эта сетка помещалась на расстоянии ≈ 1 см от сетки 5 под потенциалом катода основного разряда, и позволила снизить эффективность извлечения электронов из плазмы вспомогательного разряда за счет снижения ее плотности в эквипотенциальном зазоре между сетками 5 и 4.

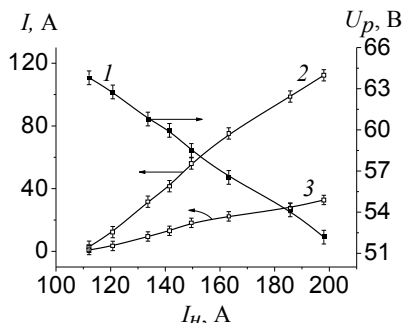


Рисунок 6. Зависимость тока разряда I_p (2), напряжения его горения U_p (1) и тока в цепи полого катода $I_{нк}$ (3) от тока накала I_n . Давление N_2 $p = 1$ Па, магнитное поле $B = 2.1$ мТл.

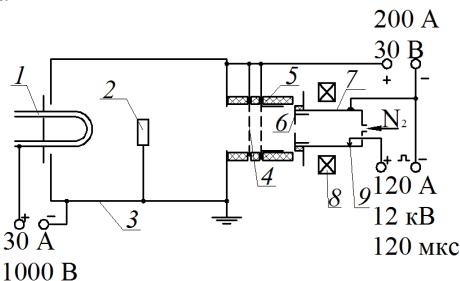


Рисунок 7. Схема экспериментальной установки: 1 – анод тлеющего разряда; 2 – образцы; 3 – камера (полый катод) тлеющего разряда; 4 – сетка; 5 – анод дугового разряда; 6 – диафрагма; 7 – полый катод дугового разряда; 8 – магнитная катушка; 9 – поджигающий электрод.

Исследования характеристик основного разряда в самостоятельном режиме горения были проведены в той же электродной системе. В этом случае источник электронов не включался.

Исследования зависимости напряжения горения основного разряда от его тока показали, что в самостоятельном режиме, зажигание разряда при давлении в камере $p_{\text{г}} = 0.65$ Па, происходит при напряжении на разрядном промежутке $U_{\text{мл}} \approx 400$ В. Гаснет разряд в самостоятельном режиме при $U_{\text{мл}} \approx 200$ В, что удовлетворительно совпадает с оценками минимального напряжения горения данного разряда, проведенными в представленной работе. Высокое напряжение горения основного разряда в самостоятельном режиме (~ 600 В) при токах ≈ 30 А является существенным недостатком такой системы, так как такой режим приводит к интенсивному ионному травлению обрабатываемой поверхности.

Исследования зависимости характеристик основного разряда в самостоятельном режиме горения от давления в камере, показали, сильную зависимость напряжения горения разряда от рабочего давления в диапазоне $p < 1$ Па, что ограничивает возможность азотирования деталей в плазме такого разряда при различных давлениях и сохранении плотности тока на обрабатываемых поверхностях.

С целью определения зависимости параметров основного разряда от соотношения площадей катода и анода были проведены исследования зависимости напряжения горения разряда от площади анода. Ток разряда, при этом, удерживался постоянным (30 А), что обеспечивало неизменную плотность тока на катоде. Эксперименты показали, что при увеличении площади анода от 125 см^2 до 500 см^2 и давлении в камере $p_{\text{г}} = 0.65$ Па напряжение горения основного разряда в самостоятельном режиме горения увеличивается с 540 В до 670 В. Сильная зависимость напряжения горения основного разряда в самостоятельном режиме от площади анода свидетельствует о том, что при азотировании различных деталей с разной площадью поверхности в одной и той же разрядной системе невозможно устанавливать одинаковую плотность тока на их поверхности и напряжение горения разряда без соответствующего изменения площади анода.

Для определения характера распределения плотности тока были проведены соответствующие эксперименты, в процессе которых фиксировался ток на плоский зонд с охранным кольцом, находившийся под потенциалом катода. Зонд перемещался либо в радиальном направлении (радиальное распределение) либо вращался вокруг центра камеры на расстоянии 23 см от оси (азимутальное распределение).

Исследования радиального распределения плотности тока показали, что в самостоятельном режиме горения основного разряда однородность распределения в области полого катода диаметром ≤ 45 см составляет не хуже $\pm 3\%$ от среднего значения. Ближе к стенкам камеры плотность тока на зонд спадает, кроме того, наблюдается некоторое его снижение к центру камеры.

Азимутальное распределение плотности тока на зонд, для самостоятельного режима горения основного разряда достаточно равномерно и его однородность составляет $\pm 10\%$ от среднего значения. Такая однородность распределения плотности тока является удовлетворительной и позволяет проводить процессы азотирования без использования механизмов вращения деталей.

Для исследуемого разряда в самостоятельном режиме были проведены эксперименты по определению коэффициента эффективной вторичной электронной эмиссии и плотности ионного тока. Измеренная плотность ионного тока на катод в самостоятельном режиме горения разряда составила $j_i \approx 1.2 \text{ mA/cm}^2$. Такой порядок величины плотности ионного тока характерен для классического метода азотирования в плазме тлеющего разряда. Экспериментально полученная величина эффективного коэффициента вторичной электронной эмиссии составила $\gamma \approx 0.16$, что хорошо согласуется с проведенными оценками и объясняет характерные значения тока разряда в полном катоде.

Для определения основных параметров плазмы был проведен комплекс зондовых измерений, включающий определение радиального распределения основных параметров плазмы (концентрация и потенциал плазмы, а также температура электронов) и их изменение при изменении площади анода. Характер радиального распределения концентрации плазмы совпадает с распределением плотности тока проходящего на зонд, находящийся под потенциалом катода. Максимальное значение концентрации азотной плазмы при токе разряда 30 А и площади анода 315 cm^2 составляет $n \sim 3 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$. Потенциал плазмы относительно анода слабо меняется в радиальном направлении и при площади анода $S_a \geq 125 \text{ cm}^2$ остается положительным. Температура электронов остается неизменной во всем пространстве занятом положительным столбом плазмы и составляет $T_e \approx 0.7 \text{ эВ}$, как в самостоятельном, так и в несамостоятельном режиме горения разряда. Такое радиальное распределение параметров плазмы подтверждает возможность однородного азотирования деталей в плазме исследуемого разряда.

Установлено, что с увеличением площади анода с 220 cm^2 до 500 cm^2 концентрация плазмы основного разряда в самостоятельном режиме горения в центре камеры падает на $\sim 30\%$, потенциал плазмы повышается на $\sim 1 \text{ В}$, а температура электронов не изменяется. При изменении соотношения площадей анода и катода, в самостоятельном режиме горения разряда изменяется не только напряжение его горения, но и концентрация плазмы в центре полого катода (рабочей камеры), соответственно плотность ионного тока на обрабатываемых деталях также изменяется.

Функционирование основного разряда в несамостоятельном режиме горения отличается тем, что разряд поддерживается не только первичными электронами, полученными на поверхности катода за счет γ -процессов, но и электронами, инжектированными из плазмы вспомогательного разряда. Исследования зависимости напряжения горения основного разряда от его тока показали, что несамостоятельный режим горения такого разряда позволяет получать тот же разрядный ток при меньших, чем в самостоятельном режиме, напряжениях горения разряда (рис. 8). Ток в цепи анода, при этом, появляется при подаче напряжения на промежуток катод - анод практически сразу, а при увеличении тока вспомогательного разряда наблюдается рост тока несамостоятельного тлеющего разряда и снижение напряжения его горения (рис. 9). Это свидетельст-

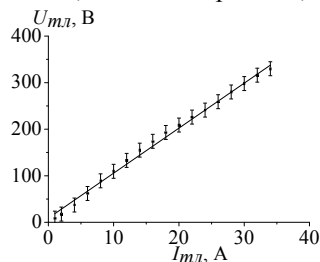


Рисунок 8. ВАХ тлеющего разряда с полым катодом большой площади в несамостоятельном режиме горения: $P_N = 0.65 \text{ Па}$, $S_a = 315 \text{ cm}^2$, ток дугового разряда $I_0 = 30 \text{ А}$

вует о том, что в технологических целях возможна независимая регулировка тока разряда и напряжения его горения при постоянном давлении. В самостоятельном режиме горения разряда это не реализуемо.

Исследования зависимости характеристик основного разряда от давления в камере, показали, что в несамостоятельном режиме горения, при изменении давления азота от 0.3 Па до 3 Па напряжение горения и ток основного разряда меняются слабо ($\pm 5\%$ от среднего значения), что позволяет выбирать оптимальное давление, при котором происходит эффективное азотирование деталей.

Исследования зависимости напряжения горения основного разряда в несамостоятельном режиме горения от площади анода (рис. 10) показали, что при давлении азота в камере $p_{N_2} > 0.65$ Па и изменении площади анода от 125 см² до 500 см² изменение напряжения горения разряда составляют $\pm 2.5\%$ от среднего значения. При снижении рабочего давления зависимость напряжения горения основного разряда от площади анода становится более существенной. Необходимо отметить, что зависимость напряжения горения основного разряда в несамостоятельном режиме горения от площади анода при фиксированном токе разряда гораздо слабее, чем в случае самостоятельного режима горения разряда. Это связано с меньшим напряжением горения разряда, при котором электроны в катодном слое набирают меньшую энергию и раньше тратят ее на ионизацию газа. Таким образом, при рабочем давлении $p > 0.65$ Па и напряжении горения разряда $U_{мл} < 300$ В зависимость напряжения горения разряда от соотношения площадей катода и анода незначительна, в остальных случаях, стабилизировать напряжение горения основного разряда в несамостоятельном режиме горения возможно путем изменения тока вспомогательного разряда.

Эксперименты по исследованию пространственной однородности распределения плотности тока зондом, находящемся под потенциалом катода, в несамостоятельном режиме горения основного разряда показали, что радиальное распределение плотности тока, аналогично таковому для самостоятельного режима горения разряда.

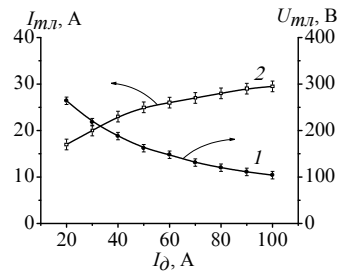


Рисунок 9. Зависимость напряжения горения основного разряда $U_{мл}$ (1) и его тока $I_{мл}$ (2) от тока дугового разряда I_0 при $p_{N_2} = 0.65$ Па и $S_a = 315$ см².

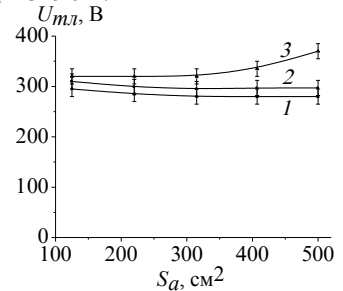


Рисунок 10. Зависимость напряжения горения разряда $U_{мл}$ при фиксированном токе разряда $I_{мл} = 30$ А от площади анода S_a при токе дугового разряда $I_0 = 30$ А и давлении p_{N_2} : 1 – 1 Па; 2 – 0.65 Па; 3 – 0.3 Па.

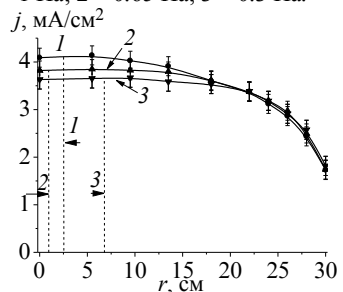


Рисунок 11. Радиальное распределение плотности тока приходящего на зонд j при $I_{мл} = 30$ А, $p_{N_2} = 0.65$ Па, $S_a = 315$ см²: 1 – $U_{мл} = 190$ В; 2 – $U_{мл} = 250$ В; 3 – $U_{мл} = 370$ В.

Плотность тока в центре камеры несколько выше (рис. 11). Однородность распределения в несамостоятельном режиме горения разряда за счет этого снижается, составляя от $\pm 7\%$ до $\pm 15\%$ от среднего значения, и зависит от напряжения горения основного разряда, которое регулировалось посредством изменения тока вспомогательного разряда. В случае как самостоятельного, так и несамостоятельного режима горения основного разряда, на расстоянии от стенок катода приблизительно равном длине ионизационного пробега электронов, оцененной для соответствующих условий горения разряда, (на рис.11 отмечено пунктирной линией, стрелками отмечено направление прилета γ -электронов в данную точку), наблюдается незначительное увеличение плотности тока, и оно тем менее выражено, чем больше ток вспомогательного разряда и, соответственно, меньше напряжение горения основного разряда. Это подтверждает предположение о влиянии длины ионизационного пробега на пространственное распределение плотности тока.

Исследование азимутального распределения плотности тока в несамостоятельном режиме горения основного разряда показало (рис. 12), что такое распределение менее равномерно, чем для самостоятельного режима горения разряда. Это объясняется внешней инжекцией электронов. Чем больше электронов инжектируется в катодную полость, тем меньше напряжение горения основного разряда и хуже однородность азимутального распределения, величина которой составляет для приведенных условий от $\pm 15\%$ до $\pm 30\%$ от среднего значения. Характерной особенностью полученного азимутального распределения плотности тока является увеличение плотности тока вблизи оси источника электронов, в остальном распределение достаточно однородно. Таким образом, при азотировании деталей в плазме такого разряда необходимо учитывать указанную особенность и размещать детали в камере таким образом, чтобы они располагались в области, где распределение плотности тока достаточно однородно. Такая область увеличивается при увеличении напряжения горения основного разряда, что дает возможность выбора оптимальной величины напряжения горения разряда при проведении процессов азотирования.

Исследования плотности ионного тока и эффективного коэффициента второй электронной эмиссии (γ) в несамостоятельном режиме горения разряда показали, что плотность ионного тока на катод составляет $j_i \approx (0.8 - 1.1) \text{ mA/cm}^2$, а измеренная величина $\gamma \approx (0.08 - 0.13)$ в зависимости от напряжения горения основного разряда. Меньшая измеренная плотность ионного тока на катоде, по сравнению с самостоятельным режимом горения, объясняется тем, что часть тока разряда замыкается не на стенки камеры, а на эмиссионную сетку. Согласно измерениям, при общем токе разряда 30 А, на эмиссионную сетку замыкается от 2.5 А (при напряжении горения разряда 370 В) до 11 А (при напряжении горения разряда 190 В).

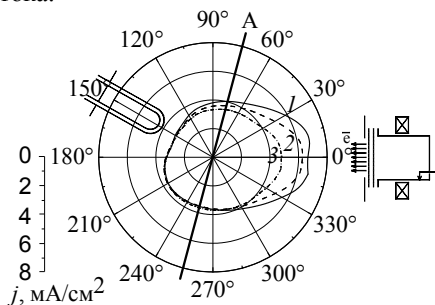


Рисунок 12. Азимутальное распределение плотности тока на зонд j при $I_{ml} = 30 \text{ A}$: $p_g = 0.65 \text{ Па}$, $S_a = 315 \text{ см}^2$: 1 – $U_{ml} = 190 \text{ В}$; 2 – $U_{ml} = 250 \text{ В}$, 3 – $U_{ml} = 370 \text{ В}$.

Меньшая величина коэффициента γ , объясняется меньшим напряжением горения разряда.

Таким образом, проведенные измерения плотности ионного тока и коэффициента γ показали, что горение разряда в несамостоятельном режиме поддерживается не только электронами, инжектированными из плазмы дугового разряда, но и электронами, инжектированными поверхностью полого катода за счет γ -процессов. Суммарный ток γ -электронов, при общем токе разряда 30 А, составляет от ≈ 1.4 А до ≈ 3.3 А.

Зондовые измерения параметров плазмы основного разряда показали, что их радиальное распределение для несамостоятельного режима горения разряда аналогичны распределению для самостоятельного режима, а увеличение напряжения горения основного разряда и уменьшение концентрации плазмы при увеличении площади анода с 220 см^2 до 500 см^2 можно компенсировать за счет увеличения тока дугового разряда от ~ 25 А до ~ 35 А. Изменение плотности тока на анод происходит в этом случае за счет увеличения потенциала плазмы (рис. 13), а ток основного разряда остается при этом неизменным и составляет $I_{мл} = 30$ А. Слабые изменения концентрации плазмы и напряжения горения основного разряда при изменении соотношения площадей катода и анода свидетельствует о том, что при использовании основного разряда в несамостоятельном режиме горения для азотирования деталей разной суммарной площади, возможно удержание плотности ионного тока на обрабатываемую поверхность и напряжения горения разряда на заданном уровне без изменения площади анода.

В четвертой главе представлены краткие описания двух созданных в процессе диссертационной работы автоматизированных вакуумных установок для реализации комплексной ионно-плазменной модификации поверхностей материалов и изделий, включающей финишную очистку и активацию, азотирование и плазменно-ассистированное электродуговое напыление функциональных покрытий (рис. 14 и 15). Помимо этого приведены результаты азотирования поверхности материалов и изделий, проведенных на описанных в данной работе установках. В частности показано, что методы азотирования сталей в плазме несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом и в плазме тлеющего разряда с полым катодом большой площади близки по своей эффективности и при температуре обработки $\sim 520^\circ\text{C}$ позволяют получать модифицированные слои глубиной до нескольких сотен микрометров за 2 – 4 часа, что в несколько раз быстрее по сравнению с традиционным азотированием в плазме диссоциированного аммиака. Микротвердость поверхности, при этом, может варьироваться в зависимости от типа обрабатываемой стали от ~ 9 ГПа (для стали 40Х) до ~ 16 ГПа (для стали 12Х18Н10Т) (рис. 16). При использовании плазмы дугового разряда с накаливаемым катодом возможно проведение процессов комбинированной обработки поверхности сталей, включающих в себя

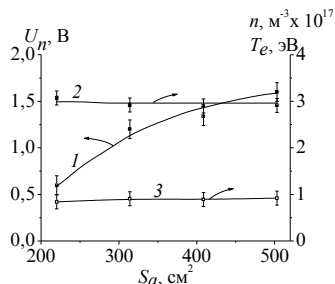


Рисунок 13. Зависимость параметров плазмы несамостоятельного тлеющего разряда от площади анода S_a при $I_{мл} = 30$ А, $p_{\text{г}} = 0.65$ Па, $U_{мл} = 370$ В: 1 – потенциал плазмы; 2 – концентрация плазмы; 3 – температура электронов.



Рисунок 14. Общий вид установки «ДУЭТ».

Основные технические характеристики установки «ДУЭТ»:

- Размеры установки – 2500× 2500 ×2000 мм;
- Количество источников плазмы – 2;
- Размеры рабочей вакуумной камеры – 750× 750×750 мм;
- Потребляемая мощность – до 50 кВт;
- Рабочее давление – 0.01 - 1 Па;
- Водяное охлаждение – 2 м³/час;
- Скорость нанесения ионно-плазменных покрытий – до 5 мкм/час;
- Однородность толщины покрытий ± 5% в рабочей зоне диаметром 500 мм и высотой 300 мм.



Рисунок 15. Общий вид установки «КВАДРО».

Основные технические характеристики установки «КВАДРО»:

- Размеры установки – 2500× 2500×2000 мм;
- Количество источников плазмы – 4;
- Размеры рабочей вакуумной камеры – 600×600×600 мм;
- Потребляемая мощность – до 50 кВт;
- Рабочее давление – 0.01 - 1 Па;
- Водяное охлаждение – 2 м³/час;
- Скорость нанесения ионно-плазменных покрытий – до 2 мкм/час;
- Однородность толщины покрытий ± 5% в рабочей зоне диаметром 500 мм и высотой 300 мм.

как азотирование, так и напыление твердых покрытий методом плазменно-ассистированного электродугового напыления (например, покрытия TiN твердостью до 25 ГПа) в едином вакуумном цикле.

Показано, что азотирование титана BT1-0 при одинаковых температуре азотирования и времени экспозиции ($T = 730^{\circ}\text{C}$, $t = 3$ часа) в плазме тлеющего разряда с полым катодом большой площади в условиях высокой плотности ионного тока ($j \approx 15 \text{ mA/cm}^2$) при низком напряжении смещения ($U_{см} = U_{мл} \approx 125 \text{ В}$) и давлении 8 Па в несамостоятельном режиме горения разряда более эффективно, чем в условиях низкой плотности ионного тока ($j \approx 1.3 \text{ mA/cm}^2$) при высоком напряжении смещения ($U_{см общ} = U_{мл} (600 \text{ В}) + U_{см} \approx 1600 \text{ В}$) и давлении 1 Па в самостоятельном режиме горения разряда. При этом азотирование в обоих случаях проходит как с лицевой стороны, подверженной непосредственному воздействию плазмы, так и с обратной – экранированной от плазмы. В процессе экспериментов проводилось исследование влияния добавки He в рабочую газовую смесь на эффективность азотирования, так как ранее было показано, что такая добавка может существенно увеличивать микротвердость поверхности за счет процесса диссоциативной перезарядки ионов He^+ на молекулах N_2 . Было установле-

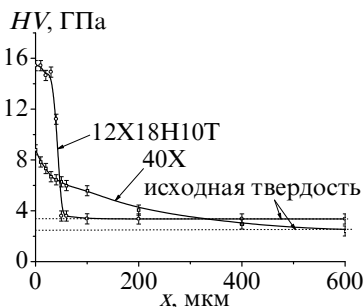


Рисунок 16. Распределение микротвердости по глубине для образцов из стали 40X и 12X18H10T после азотирования в плазме несамостоятельного тлеющего разряда при $U_{мл} = 370 \text{ В}$, $I_{мл} = 30 \text{ А}$ в течении 4 часов при температуре 520°C .

но, что добавление He в рабочую смесь увеличивает эффективность азотирования только во втором случае.

В заключении представлены основные результаты работы:

1. Использование в генераторах плазмы на основе несамостоятельного дугового разряда накаливаемого катода, состоящего из нескольких параллельно включенных нитей вместо одной, позволяет увеличить время непрерывной работы накаливаемого катода за счет увеличения площади его эмиссии и уменьшения собственного магнитного поля тока накала, влияющих на эффективность термоэмиссии и однородность ионного травления накаливаемого катода.

2. Использование поджигающего электрода, соединенного через балластное сопротивление с основным анодом, и расположенного вблизи накаливаемого катода, обеспечивает зажигание и горение несамостоятельного дугового разряда в широком диапазоне давлений (0.04 – 1.2) Па и большом диапазоне разрядных токов (0.5 – 200) А.

3. Зажигание и горение тлеющего разряда с полым катодом, образованным стенками вакуумной камеры, в самостоятельном режиме, при давлении азота в камере ~ 0.65 Па происходит при напряжении >200 В с током разряда до 30 А. При этом достигается высокая однородность плазмы с концентрацией до 10^{17} м⁻³, высокое значение которой обусловлено высоким значением эффективного коэффициента вторичной электронной эмиссии, измеренное значение которого составляет $\gamma \sim 0.15$ и удовлетворительно согласуется с расчетной величиной.

4. Изменение тока дугового разряда с холодным полым катодом, из плазмы которого осуществляется инжекция электронов в катодную полость основного тлеющего разряда с полым катодом большой площади, при изменении соотношения площадей катода и анода, позволяет стабилизировать напряжение горения основного разряда в диапазоне (190 – 370) В с током до $I_{ml}=30$ А, что (1.5 - 3) раза ниже напряжения горения основного разряда в самостоятельном режиме при том же токе. При этом, инжекция электронов в катодную полость несколько ухудшает распределение плотности плазмы в направлении их пролета, но дает возможность выбора оптимальной величины напряжения горения разряда при проведении процессов азотирования.

5. Созданы автоматизированные вакуумные установки «ДУЭТ» и «КВАДРО» для реализации комплексной ионно-плазменной модификации поверхностей материалов и изделий, включающей ионную очистку и нагрев поверхности материалов и изделий в плазме дугового разряда с накаливаемым катодом, ионно-плазменное азотирование и электродуговое плазменно-ассистированное напыление твердых и сверхтвердых покрытий.

6. Азотирование титана в условиях большой плотности тока на подложке (~ 15 мА/см²) и малого напряжения смещения (~ 120 В) при давлении 8 Па более эффективно, чем в условиях низкой плотности тока (~ 1.3 мА/см²) и высокого напряжения смещения (~ 1600 В) при давлении 1 Па.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Grigoriev, S.V. Stationary low pressure arc discharge with cold hollow cathode / S.V. Grigoriev, N.N. Koval, I.V. Lopatin, P.M. Schanin // Proc. of 25 Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. – Nagoya, Japan. – 2001. -Vol 3.- P. 287-288.
2. Винтизенко, Л.Г. Дуговые разряды низкого давления с полым катодом и их применение в генераторах плазмы и источниках заряженных частиц / Л.Г. Винтизенко, С.В. Григорьев, Н.Н. Коваль, В.С. Толкачев, И.В. Лопатин, П.М. Щанин // Изв. Вузов. Физика. - 2001. - Т. 44. - № 9. - С. 28-35.
3. Strumilova, N.V. Production of wear-resistive coatings by plasma-ion deposition assisted with the plasma of a hot-cathode arc / N.V. Strumilova, I.M. Goncharenko, N.N. Koval, I.V. Lopatin // Proc. of 5-th Korea - Russia Int. Symp. on Science and Technology. - Tomsk, Russia. – 2001. - Vol. 2. - P. 244 – 246.
4. Schanin, P.M. Vacuum ion-plasma installation “DUET” / P.M. Schanin, N.N. Koval, I.V. Lopatin, I.M. Goncharenko, S.V. Grigoriev, V.S. Tolkachev, L.G. Vintizenko, V.N. Kiselev, K. Uemura // Proc. of 6th Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. - Tomsk, Russia. - 2002. - P. 112-116.
5. Григорьев, С.В. Формирование ультрадисперсных систем при комплексной ионно-плазменной модификации поверхности конструкционной стали / С.В. Григорьев, И.М. Гончаренко, Н.Н. Коваль, И.В. Лопатин, П.М. Щанин, А.А. Тухфатуллин, Ю.Ф. Иванов, Н.В. Струмилова // Матер. конф. Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем. – Томск, Россия. - 2002. - С. 536-540.
6. Goncharenko, I.M. Surface modification of steels by complex diffusion saturation in low pressure arc discharge / I.M. Goncharenko, S.V. Grigoriev, I.V. Lopatin, N.N. Koval, P.M. Schanin, A.A. Tukhfatullin, Yu.F. Ivanov, N.V. Strumilova // Surface and Coatings Technology. - 2003. - Vol. 169-170C. - P. 419-423.
7. Koval, N.N. Application of low-pressure arc discharge for formation of hard diffusion surface layers / N.N. Koval, S.V. Grigoriev, Yu.F. Ivanov, I.V. Lopatin, N.V. Strumilova, A.V. Shirinkina // Proc. of 21 Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. -Yalta, Ukraine. - 2004. - P.583-586.
8. Goncharenko, I.M. The mechanisms of nanocrystal nitride films deposition by arc sputtering of composite cathodes. II. Structure, phase content and mechanical properties of coating / I.M. Goncharenko, Yu.F. Ivanov, N.N. Koval, S.V. Grigoriev, I.V. Lopatin, Yu.A. Kolubaeva, G.A. Pribitkov, E.N. Korostelyeva // Proc. of 7 Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, Russia. - 2004. - P. 167-170.
9. Вершинин, Д.С. Азотирование конструкционных сталей в плазме дугового и тлеющего разрядов / Д.С. Вершинин, И.В. Лопатин, А.В. Ширилкина // Матер. 1 Всерос. конф. мол. уч. Физика и химия высокоэнергетических систем. – Томск, Россия. - 2005. - С. 301-304.
10. Лопатин, И.В. Разработка и исследование узла поджига несамостоятельного дугового разряда низкого давления в электродной системе плазмогенератора «ПИНК» / И.В. Лопатин // Матер. 3 Всерос. конф. мол. уч. Фундаментальные проблемы новых технологий в 3-м тысячелетии. – Томск, Россия - 2006. - С. 18-22.
11. Lopatin, I.V. Vacuum ion - plasma setup “QUADRO” for complex treating of materials and tools / I.V. Lopatin, Yu.Kh. Akhmadeev, V.V. Denisov, N.N. Koval, A.V.

- Mikov, V.V. Yakovlev, A. Seredinin // Изв. Вузов. Физика. - 2006. - № 9. - Приложение. - С. 98-101.
12. Lopatin, I.V. Source of low temperature gas plasma with wide range of parameters / I.V. Lopatin // Изв. Вузов. Физика. - 2006. - № 8. - Приложение. - С. 154-157.
 13. Akhmadeev, Yu.H. Nitriding of commercially pure VT1-0 titanium and VT6 alloy in low pressure discharges / Yu.H. Akhmadeev, Yu.F. Ivanov, N.N. Koval, I.V. Lopatin, P.M. Schanin // Изв. Вузов. Физика. - 2006. - № 8. Приложение. - С. 288-291.
 14. Lopatin, I.V. Plasma Production in a Low-pressure Hollow-cathode Non-self-sustained Discharge / I.V. Lopatin, Yu.Kh. Akhmadeev, N.N. Koval, P.M. Schanin A.V. Shnaider // Proc. of 9 Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma flows. - Tomsk, Russia. 2008. - P. 312-315.
 15. Ахмадеев, Ю.Х. Азотирование титана VT1-0 в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления в различных газовых средах / Ю.Х. Ахмадеев, Ю.Ф. Иванов, Н.Н. Коваль, И.В. Лопатин, П.М. Щанин // Поверхность. - 2008. - № 2. - С. 108-112.
 16. Лопатин, И.В. Несамостоятельный сильноточный тлеющий разряд низкого давления с полым катодом большого размера / И.В. Лопатин, Ю.Х. Ахмадеев, Н.Н. Коваль, П.М. Щанин // Матер. 3 Междунар. Крейнделевского семинара Плазменная эмиссионная электроника. - Улан-Удэ, Россия. - 2009. - С 16-21.
 17. Lopatin, I.V. Generation of plasma in non-self-sustained glow discharge with hollow cathode / I.V. Lopatin, Yu.Kh. Akhmadeev, N.N. Koval, P.M. Schanin, V.V. Yakovlev // Proc. of 10th Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. - Tomsk, Russia. - 2010. - P. 35-38.
 18. Девятков, В.Н. Электроразрядное оборудование и технологии создания наноструктурных слоев и покрытий / В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, С.В. Григорьев, И.В. Лопатин, В.В. Яковлев, В.В. Денисов, В.В. Шугуров // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Естественные и технические науки. - 2010. - № 2 (107). - С.86-95.
 19. Лопатин, И.В. Генератор плазмы на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом большого объема / И.В. Лопатин, Ю.Х. Ахмадеев, Н.Н. Коваль, П.М. Щанин // Приборы и техника эксперимента. - 2011. - № 1. - С. 151-156.
 20. Лопатин, И.В. Азотирование образцов титановых сплавов в плазме тлеющего разряда с полым катодом / И.В. Лопатин, Ю.Х. Ахмадеев // Научные ведомости Белгородского государственного университета. - 2011. - Вып. 22. - № 5(100). - С. 180-186.
 21. Коваль, Н.Н. Влияние состава плазмообразующего газа на процесс азотирования в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом большого размера / Н.Н. Коваль, П.М. Щанин, Ю.Х. Ахмадеев, И.В. Лопатин, Ю.Р. Колобов, Д.С. Вершинин, М.Ю. Смолякова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2012. - № 2. - С. 62-67.
 22. Лопатин, И.В. Периодический характер работы плазмогенератора «ПИНК» / И.В. Лопатин, С.С. Ковальский // Матер. 5 Всерос. конф. мол. уч. Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии. [электронный ресурс]. - Томск, Россия. - 2012. - С. 1-16 – 1-19.

23. Лопатин, И.В. Самостоятельный тлеющий разряд низкого давления с полым катодом при токах в десятки ампер / И.В. Лопатин, П.М. Щанин, Ю.Х. Ахмаде-ев, С.С. Ковальский, Н.Н. Коваль // Физика плазмы. - 2012. - Т. 38, - № 7. - С. 639-643.
24. Lopatin, I.V. Study of plasma parameters of non-self sustained arc discharge of "PINK" plazmogenerator / I.V. Lopatin, N.N. Koval, S.S. Kovalsky, P.M. Schanin // Изв. Вузов. Физика. -2013. - Т. 55, - № 12/2. - С. 200 – 204.