

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИСЭ СО РАН)
Отдел образовательной деятельности

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах
научно-квалификационной работы на тему:

**«Генерация газо-металлических
пучково-плазменных образований в разрядах низкого давления»**

Направление подготовки:
11.06.01 – Электроника, радиотехника и системы связи

Профиль подготовки (специальность):
2.2.1 – Вакуумная и плазменная электроника

Аспирант



Савчук Михаил Викторович

Научный руководитель:
Денисов Владимир Викторович,
к.т.н., зав. лабораторией
ИСЭ СО РАН

Томск – 2024

Обоснование актуальности темы научного исследования

В связи с активным развитием научной и промышленной отраслей России возникает все большая необходимость в создании новых материалов для увеличения эффективности и долговечности изделий.

В текущее время перед производителями стоит задача обеспечить изделиям необходимый срок службы за счёт повышения поверхностной твердости и износостойкости материала изделий. Химико-термическая обработка поверхности наравне с ионно-плазменной широко используется для улучшения поверхностных свойств деталей и изделий. Несмотря на высокую перспективность, существует ряд проблем, препятствующих внедрению в производственные циклы цифрового интеллектуального автоматизированного оборудования на этой основе. Особенно это касается систем, в которых требуется создавать объёмно-однородную плазму в больших ($> 0,1 \text{ м}^3$) вакуумных объемах. Имеется ряд сложностей с обеспечением требуемой степени неоднородности плазмы. Формирование плазмы с низкой степенью неоднородности и возможность независимой регулировкой всех рабочих параметров может обеспечить несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом (с внешней инжекцией электронов в плазму тлеющего разряда и формирования пучково-плазменных образований).

Синтезируемая в полем катоде тлеющего разряда с внешней инжекцией электронов плазма по методу её генерации может быть отнесена к пучково-плазменным образованиям [1]. Пучково-плазменное образование (ППО) представляет собой плазменную среду, основные свойства (состав, однородность) и параметры (концентрация, температура электронов, потенциал) которой определяются пучком частиц (электронов, ионов, фотонов, быстрых нейтральных частиц и т.д.), инжектируемых в электро-разрядную систему, обеспечивающую зажигание и горение разряда в определенном диапазоне рабочих параметров по давлению, току, напряжению горения. Особенностью пучково-плазменных образований, генерируемых в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом, является возможность

генерации плазмы в широком диапазоне значений концентрации ($10^{16} - 10^{18} \text{ м}^{-3}$) и независимая регулировка всех рабочих параметров разрядов, таких как напряжение горения и рабочее давление. Это позволяет применять ППО для решения научных и технических задач.

Цель научного исследования

Определение влияния условий генерации газо-металлических пучково-плазменных образований (ППО) с использованием несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом с инжекцией электронов на однородность плазмы в объёме вакуумной камеры.

Основные задачи научного исследования

1. Определение закономерностей влияния условий генерации пучково-плазменного образования на основе несамостоятельного тлеющего разряда на его состав.
2. Исследование распределений концентрации заряженных частиц в объеме разрядной камеры в газовых и газо-металлических плазменных образованиях, формируемых при низком давлении в несамостоятельном тлеющем разряде.
3. Определение особенностей формирования твердых нитридных покрытий, напыляемых вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом в газо-металлических ППО.

Глава 1. Литературный обзор

Разряды низкого давления самостоятельной и несамостоятельной формы широко используются для генерации низкотемпературной плазмы в больших вакуумных объемах. В зависимости от конфигурации электродных систем, давления рабочего газа и параметров электропитания разрядного устройства, самостоятельный разряд может принимать форму искрового, тлеющего, дугового. Несамостоятельные формы разрядов характеризуются значительно более широкими диапазонами напряжений горения и токов разряда.

В последнее годы повышенный интерес к исследованиям в области создания низкотемпературной, объемно-однородной плазмы в больших вакуумных объемах. Это связано с расширением спектра технологических применений объёмных плазменных образований и необходимостью повышения производительности вакуумных электронно-ионно-плазменных установок [2].

Генераторы плазмы, основанные на зажигании дугового и тлеющего разряда, нашли свое применение в ионно-плазменном нанесении упрочняющих покрытий, защитных и декоративных покрытий, очистке и активации поверхности напыляемых изделий в вакууме. В дополнение к этому, генераторы плазмы используются для формирования нанокристаллических и аморфных соединений на поверхности твёрдых тел [3, 4], азотирования сталей, титана и его сплавов [5 – 8].

Высокая эффективность и надежность генераторов плазмы с накалимым и полым катодом обеспечила их довольно частое применение в вакуумно-дуговых процессах напыления покрытий [9, 10].

На рисунке 1 представлена принципиальная схема и общий вид плазмогенератора «ПИНК» с накалимым катодом, разработанного в Институте сильноточной электроники.

Принцип работы генератора плазмы основан на использовании разрядной системы, состоящей из полого катода и нитей накала, выполняющих функцию накалимого катода. Эта система окружена соленоидом 3, создающим магнитное поле $B \approx 0,02$ Тл.

Магнитное поле, создаваемое соленоидом в генераторе плазмы, заметно влияет на движение электронов, которые эмитируются накаливаемым катодом. Это приводит к повышению эффективности ионизации рабочего газа, который подается внутрь полого катода, и формированию внутри полого катода плотной газоразрядной плазмы. По итогу вторичной ионно-электронной эмиссии незамагниченные ионы, ускоренные в прикатодном слое, могут выбивать вторичные электроны из стенок катода, что способствует

усилению ионизации внутри катодной полости. Это позволяет стабильно зажигать и поддерживать газовый разряд между полым катодом и анодом. Характерные значения величины концентрации газовой плазмы, формируемой генератором плазмы, лежат в диапазоне $(10^{16}-10^{17})\text{ м}^{-3}$.

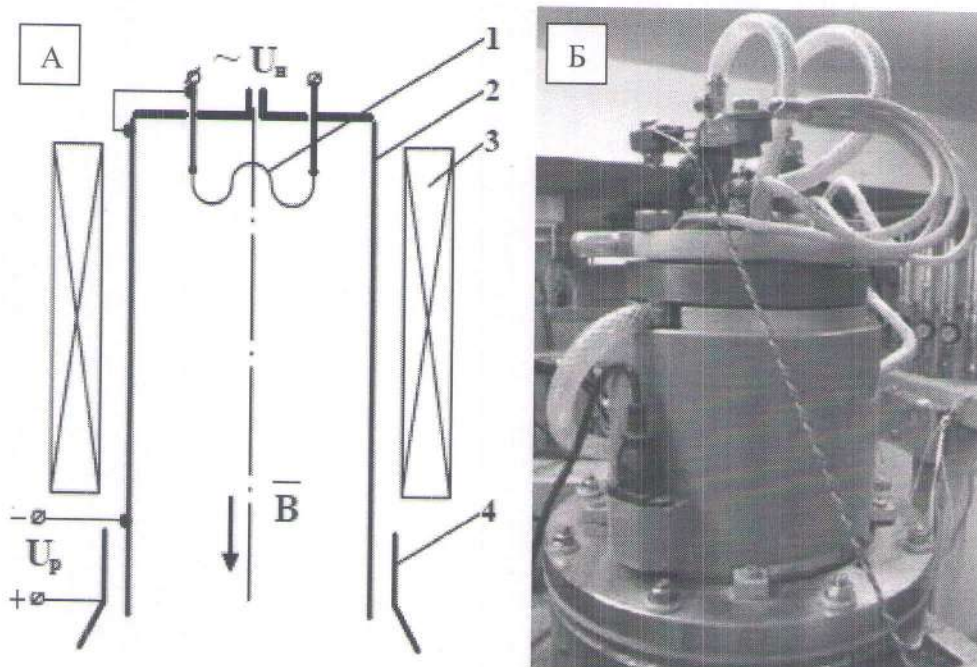


Рисунок 1 – Принципиальная схема и общий вид генератора газовой плазмы с накали́нным и полым катодом

Тлеющий разряд низкого давления (до 1 – 2 Па) в значительных масштабах используется в российской и зарубежной промышленности с целью ионно-плазменной обработки металлов и сплавов. Если сравнить между собой плазму разрядов низкого давления и плазму, формируемую в аномальном тлеющем разряде при давлениях ≈ 100 Па, то можно отметить, что в первом случае, скорость азотирования сравнима или даже выше. Это связано с тем, что при низком давлении существует больше возможностей для достижения максимальной точности регулирования параметров рабочего процесса, в том числе возможность контролировать энергию ионов [11], что позволяет обеспечивать на границе раздела «плазма-поверхность» большее содержание атомарного азота и одновременно повышенные коэффициенты диффузии за счет стравливания хрупких нитридных фаз на поверхности

материала, характеризующихся относительно низким коэффициентом диффузии азота.

В исследовании [12] был изучен самостоятельный тлеющий разряд с полым катодом объемом $0,2 \text{ м}^3$. В результате снижения давления газа в объёме вакуумной камеры, напряжение горения разряда уменьшилось до 190 В. Опыт исследования показал, что ток на катоде при отсутствии внешней инжекции электронов определяется исходя из величины приложенного напряжения. Коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии γ увеличивается, в связи с тем, что повышение напряжения между катодом и анодом становится причиной возникновения большего количества ионизаций, которые осуществляются ускоренными электронами в прикатодной области.

Вольт-амперная характеристика такого самостоятельного тлеющего разряда с полым катодом при рабочем давлении 0,64 Па и объеме $\approx 0,2 \text{ м}^3$ представлена на рисунке 2 [13].

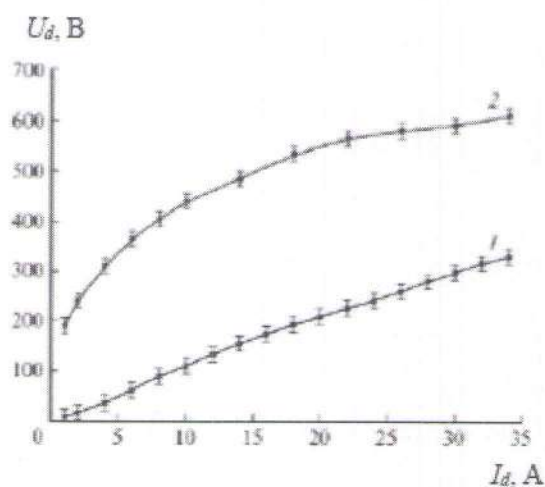


Рисунок – 2. Вольт-амперные характеристики тлеющих разрядов: 1 – несамостоятельного, 2 – самостоятельного. Давление азота $p = 0,64 \text{ Па}$, ток вспомогательного разряда $I = 30 \text{ А}$.

Снижение напряжения горения разряда до нескольких десятков вольт достигается посредством инжекции электронов в плазму [14, 15]. Помимо снижения напряжения горения, реализуется возможность его независимой

регулировки, что одновременно позволяет регулировать ток разряда и энергию ионов, ускоряющихся на катод.

Представляется, что ионно-плазменная обработка поверхности деталей и изделий на сегодняшний день вызывает значительный интерес, имеет ценность и научное видение дальнейшего развития направления применения несамостоятельного тлеющего разряда с внешней инжекцией электронов

Основная цель данной работы - определить влияние условий генерации газо-металлических пучково-плазменных образований (ППО) на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом с инжекцией электронов на однородность формируемого плазменного образования в рабочем объеме вакуумной камеры.

Повышение износостойкости поверхности материалов и изделий

Для цели данной работы требуется провести исследования, направленные на решение следующих задач:

1. Определить закономерности влияния условий генерации пучково-плазменного образования на основе несамостоятельного тлеющего разряда на его состав.

2. Исследовать распределения концентрации заряженных частиц в объеме разрядной камеры в газовых и газо-металлических плазменных образованиях, формируемых при низком давлении в системе генерации ППО на основе несамостоятельного тлеющего разряда.

3. Определить закономерности синтеза твердых нитридных покрытий, напыляемых вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом в газо-металлических ППО.

Глава 2. Особенности генерации пучково-плазменного образования на основе несамостоятельного тлеющего разряда

Настоящая глава содержит в себе краткое описание экспериментальной установки и оборудования, а также методик, которые использовались для

исследования влияния условий генерации газо-металлических пучково-плазменных образований на состав и однородность формируемой в нем газовой и газо-металлической плазмы.

2.1 Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка, используемая для исследования влияния условий генерации газо-металлических пучково-плазменных образований (ППО) на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом с инжекцией электронов на однородность плазмы формируемой в рабочем объеме вакуумной камеры, собрана на основе промышленной установки ННВ-6.6-И1. Функцию полого катода тлеющего разряда выполняют внутренние стенки вышеуказанной камеры с размерами $650 \times 650 \times 650$ мм. Турбомолекулярный насос ТМН-500 задействуется для откачки рабочего объема вакуумной камеры ($0,21 \text{ м}^3$) вплоть до $5 \cdot 10^{-3}$ Па. Данный уровень вакуума является достаточным для проведения дальнейших исследований. Установка также оснащена системой напуска двух газов — аргона (Ar) и азота (N_2). При напуске рабочего газа давление в камере устанавливается на уровне от 0,4 до 1 Па, что позволяет обеспечить оптимальные условия для генерации плазмы.

В качестве источника газовой плазмы использовался плазменный источник с накалимым и полым катодом «ПИНК». Для генерации металлической плазмы использовались два электродуговых испарителя с титановым и алюминиевыми катодами. В качестве материалов катодов для вакуумно-дуговых испарителей использовались цилиндрические катоды диаметром 80 мм из титана марки ВТ 1-0 и алюминия марки А7.

2.2 Описание разрядных схем экспериментальной установки

Исследования проводили в двух разрядных схемах. Плазма, синтезируемая в полном катоде несамостоятельного тлеющего разряда с внешней инжекцией электронов, по методу её генерации может быть отнесена к пучково-плазменным образованиям [1]. Разрядная схема для генерации газо-металлического пучково-плазменного образования представлена на рисунке

3б. Для сравнения, в том же вакуумном объеме были проведены подобные исследования разряда с традиционной электродной схемой, предназначенной для плазменно-ассистированного вакуумно-дугового напыления покрытий (представлена на рисунке 3а).

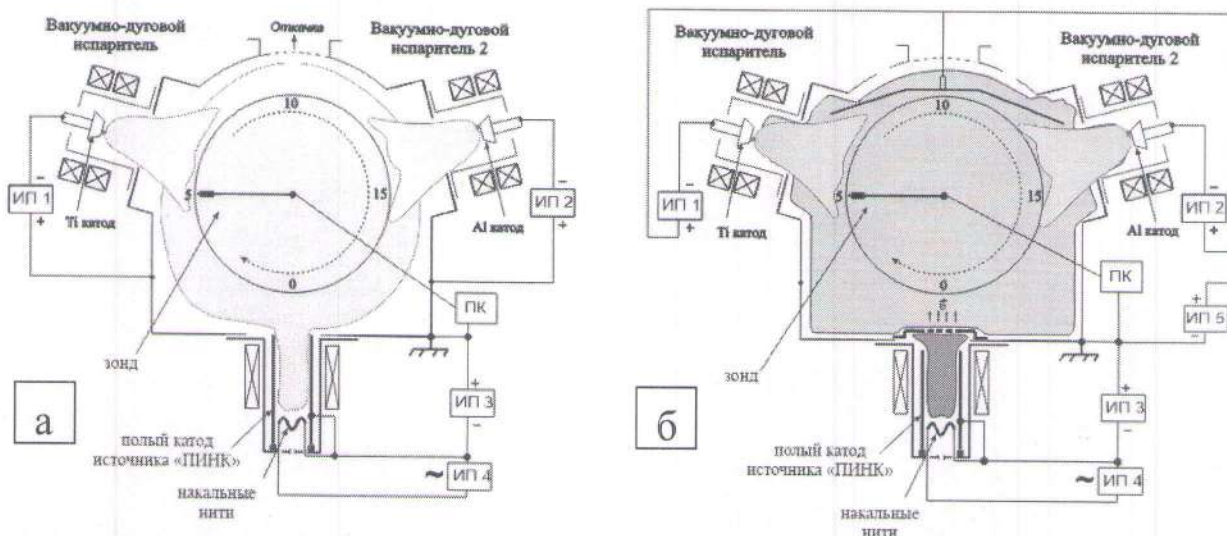


Рисунок 3 – Схемы экспериментальных установок для реализации процессов плазменно-ассистированного напыления: а – традиционная разрядная схема; б – разрядная схема для генерации пучково-плазменного образования в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом.

В традиционной разрядной схеме, представленной на рисунке 3а, стенки вакуумной камеры являются анодом для источника газовой плазмы «ПИНК» и для двух электродуговых испарителей с титановым и алюминиевыми катодами, предназначенными для генерации металлической плазмы.

В разрядной схеме, представленной на рисунке 3б, газо-металлическое пучково-плазменное образование формировалось в полем катодом несамостоятельного тлеющего разряда. Несамостоятельный тлеющий разряд зажигался между стенками вакуумной камеры, являющимися катодом, и кольцевыми анодами, представленными на рисунке 3. Кольцевые аноды также являются анодами для вакуумно-дуговых испарителей, являющихся генераторами металлической плазмы.

Для стабильного горения несамостоятельного тлеющего разряда при низких давлениях, использовалась дополнительная инжекция электронов из плазмы несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым и полым катодом, формируемого источником плазмы «ПИНК». Электрод, являющийся анодом несамостоятельного дугового разряда, перекрывался мелкоструктурной сеткой с размером ячейки 0,4 x 0,4 мм с геометрической прозрачностью около 45 % и имел потенциал полого катода тлеющего разряда.



Рисунок 4 – Внешний вид кольцевых анодов тлеющего и дуговых разрядов в экспериментальной установке

2.3 Исследование влияния условий генерации газо-металлического пучково-плазменного образования на состав формируемой плазмы

Оптическая эмиссионная спектрометрия является важным инструментом для мониторинга ионно-плазменных процессов, таких как травление и осаждение материалов [16, 17]. В процессе синтеза покрытий образуется плазма, состоящая из частиц, находящихся в ионизированном и возбужденном состоянии. Переход частиц из возбужденного состояния в

основное, сопровождается излучением, которое содержит информацию о плотности возбуждённых состояний атомов и молекул распылённого вещества и других компонентов газовой среды [18].

В ходе проведения исследований проводилось определение закономерностей влияния условий генерации пучково-плазменного образования на основе несамостоятельного тлеющего разряда на состав формируемой в нём газовой и металлической плазмы с помощью метода эмиссионной спектроскопии.

2.3.1 Методика измерения эмиссионных спектров

Исследование зависимости условий формирования пучково-плазменного образования на основе несамостоятельного тлеющего разряда включало в себя анализ состава газовой и металлической плазмы с применением метода эмиссионной спектроскопии. Для измерений использовался спектрометр HR4000 от компании Ocean Optics с диапазоном измерения длин волн от 250 до 350 нм и спектральным разрешением 0,5 нм. Эксперименты проводились через фланец со смотровым окном, установленным на верхней стенке камеры, с одинаковым временем экспозиции и усреднением результатов по 4 измерениям. Это позволило обеспечить достаточную точность для анализа интенсивности эмиссии материалов катодов (титана и алюминия)

Измерение эмиссионных спектров проводилось на экспериментальном стенде, предназначенном для процессов генерации газо-металлических пучково-плазменных образований в больших ($\geq 0,1 \text{ м}^3$) вакуумных объемах технологической газовой плазмы, используемой в процессах химико-термической обработки сталей и сплавов.

По результатам ранее проведенных исследований были определены оптимальные режимы измерения, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Оптимальный режим измерения

Газ	Рабочее давление	Ток и напряжение горения несамостоятельный тлеющий разряда	Ток и напряжение горения газового разряда в «ПИНКе»	Токи вакуумно-дуговых испарителей (Ti катод)	Токи вакуумно-дуговых испарителей (Al катод)
	p , Па	I_p , А (U_p , В)	I_p , А (U_p , В)	I_d , А	I_d , А
Ar / N_2	0,6/0,5	17 (66)	20 (50)	80	60

В таблице 2 представлены длины волн и соответствующие им переходы для частиц титана и алюминия.

Таблица 2 – Длины волн и энергетические переходы

Частица	Длина волны	Переход
Ti^+	307,5 нм	$3d^2(^3F)4p \rightarrow 3d^2(^3F)4s$
Ti^+	308,8 нм	$3d^2(^3F)4p \rightarrow 3d^2(^3F)4s$
Ti^+	323,45 нм	$3d^2(^3F)4p \rightarrow 3d^2(^3F)4s$
Ti^+	323,65 нм	$3d^2(^3F)4p \rightarrow 3d^2(^3F)4s$
Ti^+	334,8 нм	$3d^2(^3F)4p \rightarrow 3d^3$
Ti^+	336,1 нм	$3d^2(^3F)4p \rightarrow 3d^2(^3F)4s$
Ti^+	337,3 нм	$3d^2(^3F)4p \rightarrow 3d^2(^3F)4s$
Ti^+	338,37 нм	$3d^2(^3F)4p \rightarrow 3d^2(^3F)4s$
Al^+	266,9 нм	$3s3p \rightarrow 2p^63s^2$

Для определения закономерностей влияния условий генерации пучково-плазменного образования на основе несамостоятельного тлеющего разряда на состав формируемой в нём газовой и металлической плазмы проводился комплекс исследований. Режимы генерации, для которых производилась съемка эмиссионных спектров представлены в таблице 3. Основная задача состояла в исследовании влияния величины тока дуговых разрядов источников металлической плазмы на эмиссионные спектры газо-металлического пучково-плазменного образования, формируемого в несамостоятельном тлеющем разряде, при напуске аргона особой чистоты при давлении 0,6 Па, и в азотной атмосфере при давлении 0,5 Па. Ток дугового

разряда на Al катодe изменялся в диапазоне 60 – 90 А с шагом 10 А, величина тока разряда на Ti катодe изменялась в диапазоне 80 – 110 А с шагом 10А.

Таблица 3 – Режимы, при которых производились съемка эмиссионных спектров

№ опыта	Газ	Рабочее давление	Ток и напряжение горения газового разряда в «ПИНКе» / несам. тлеющ. разряда	Ток на Al катодe	Ток на Ti катодe
		p , Па	I_d , А (U_d , В)	$I(d_1)$, А	$I(d_2)$, А
1	Ar	0,6	20 (50) /17 (66)	60	80
2	Ar	0,6	20 (50) /17 (66)	60	90
3	Ar	0,6	20 (50) /17 (66)	60	100
4	Ar	0,6	20 (50) /17 (66)	60	110
5	Ar	0,6	20 (50) /17 (66)	60	80
6	Ar	0,6	20 (50) /17 (66)	70	80
7	Ar	0,6	20 (50) /17 (66)	80	80
8	Ar	0,6	20 (50) /17 (66)	90	80
9	N ₂	0,5	20 (50) /17 (66)	60	80
10	N ₂	0,5	20 (50) /17 (66)	60	90
11	N ₂	0,5	20 (50) /17 (66)	60	100
12	N ₂	0,5	20 (50) /17 (66)	60	110
13	N ₂	0,5	20 (50) /17 (66)	60	80
14	N ₂	0,5	20 (50) /17 (66)	70	80
15	N ₂	0,5	20 (50) /17(66)	80	80
16	N ₂	0,5	20 (50) /17 (66)	90	80

2.3.2 Полученные результаты

Полученные в диапазоне длин волн (250 – 350) нм спектры имеют линии относительно высокой интенсивности, по которым можно определить влияние величины тока дугового испарителя на эмиссионные спектры газо-металлического пучково-плазменного образования, формируемого в несамостоятельном тлеющем разряде.

На рисунке 5 изображены эмиссионные спектры, соответствующие ионам титана в аргоновой плазме.

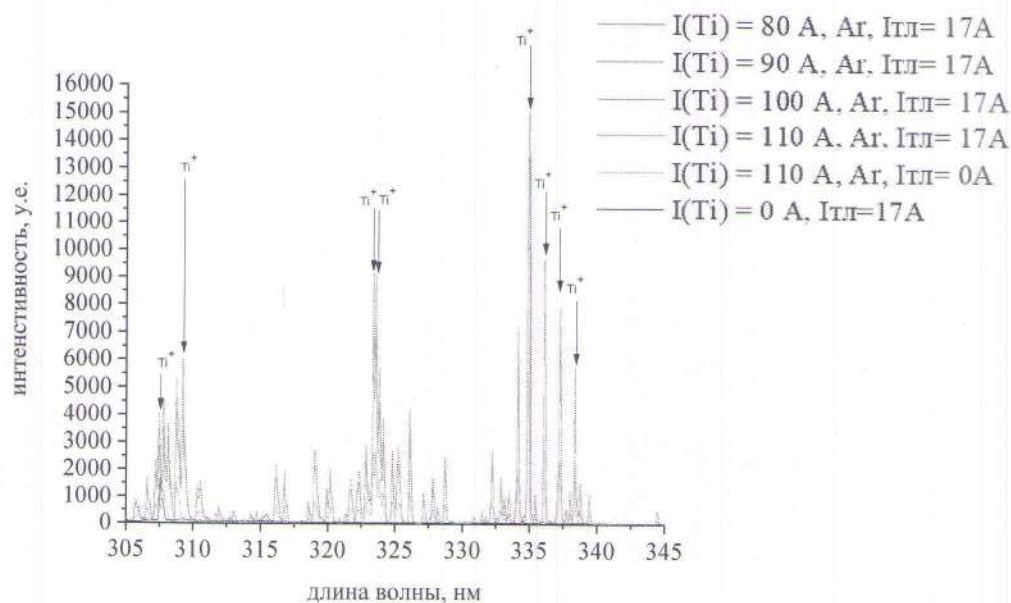


Рисунок 5 – Эмиссионные спектры интенсивности при изменении тока на Ti катод в аргоне

По результатам проведенных измерений были построены графики зависимости интенсивности эмиссионных спектров от тока разряда дугового испарителя, представленные на рисунке 6. Графики строились для тока дугового разряда Al катода в азотной атмосфере при давлении 0,5 Па и в аргоновой атмосфере 0,6 Па. Графики определения интенсивности эмиссионного спектра Al^+ была выбрана линия, соответствующая длине волны 266,9 нм. Данная линия была выбрана из-за высокой интенсивности эмиссионного спектра. Графики для тока дугового разряда Ti катода так же строились для азотной атмосферы при давлении 0,5 Па и для аргоновой атмосферы при давлении 0,6 Па. Для ионов титана были выбраны линии

эмиссионных спектров, представленные в таблице 1. Так как линии эмиссионных спектров Ti^+ имеют схожую зависимость от тока разряда дугового испарителя, график был построен для двух линий 308,8 нм и 323,64 нм.

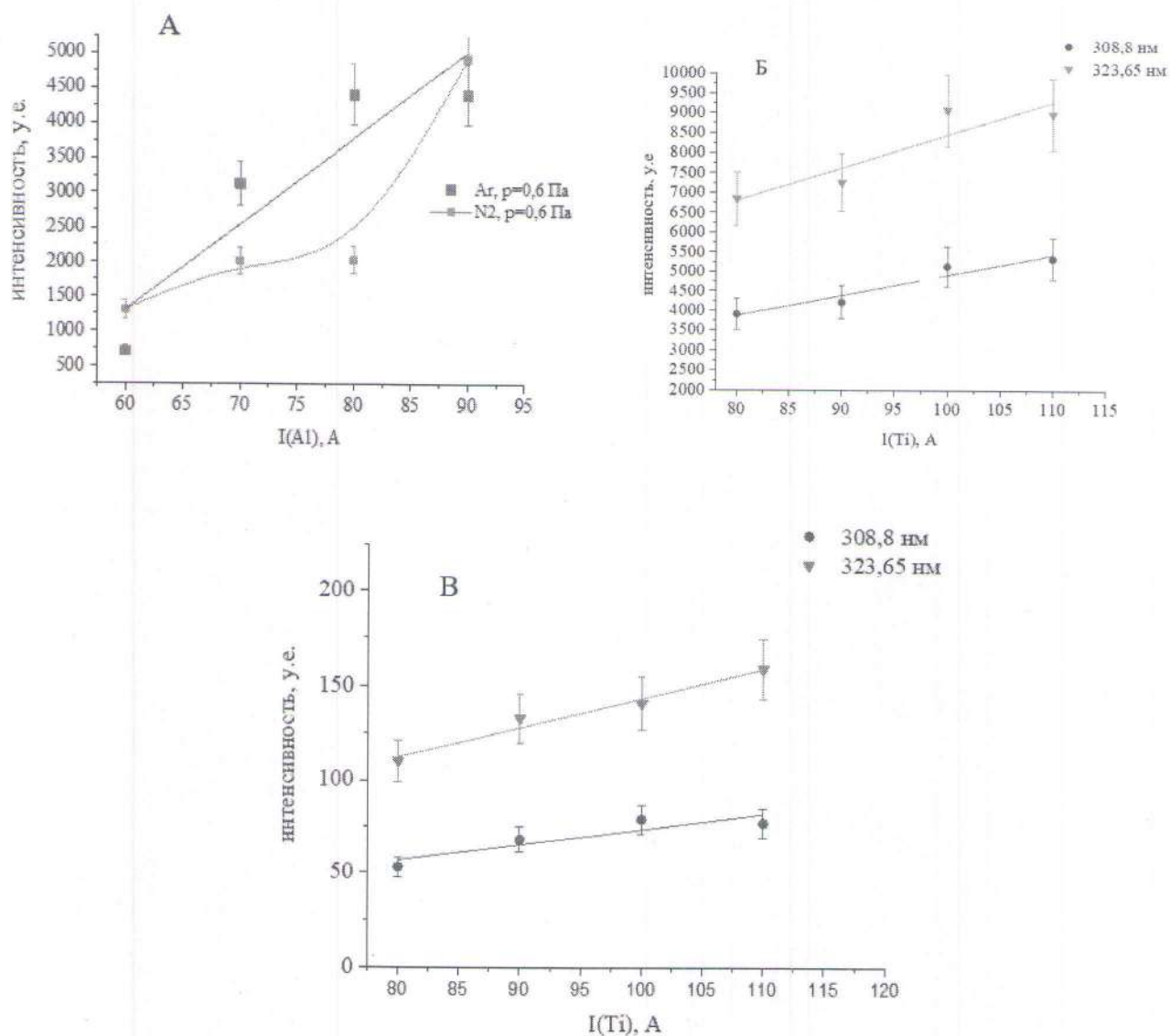


Рисунок 6 – Графики зависимостей интенсивности эмиссионных спектров в зависимости от тока разряда дугового испарителя для А – алюминия в аргоне при давлении 0,6 Па и азоте при давлении 0,5 Па, Б - для титана в аргоне при давлении 0,6 Па, В - для титана в азоте при давлении 0,5 Па

Анализируя полученные результаты, стоит отметить, что интенсивность исследуемых эмиссионных спектров имеет близкую к линейной зависимость

от тока разряда дугового испарителя, что говорит об отсутствии резкого изменения в составе плазмы, эмитируемой с катодного пятна.

2.4 Особенности азимутальных распределений концентрации плазмы в газо-металлических пучково-плазменных образованиях

2.4.1 Методика измерения азимутальных распределений концентрации плазмы

Для исследования распределения концентрации заряженных частиц в рабочем объеме вакуумной камеры в процессе горения разряда использовался одиночный цилиндрический зонд Ленгмюра. Диаметр зонда составлял 0,5 мм, а длина — 5 мм. Измерения проводились с использованием автоматизированной системы зондовых измерений, разработанной в ИСЭ СО РАН [19].

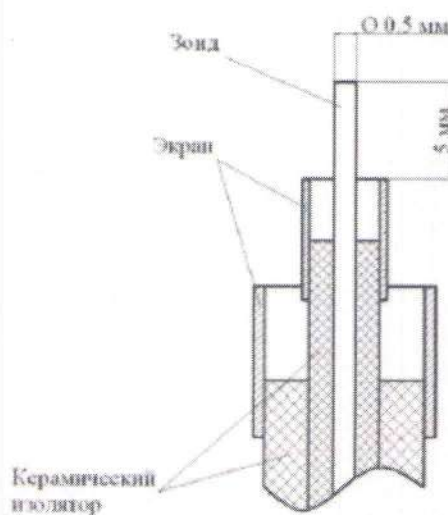


Рисунок 7 – Схема зонда Ленгмюра

Азимутальные распределения концентрации плазмы были получены путем вращения цилиндрического зонда относительно центра экспериментальной установки со следующими параметрами расположения

зонда в камере: расстояние от центра вакуумной камеры – 250 мм, высота – 285 мм. Данная высота соответствует высоте осей генераторов газовой и металлической плазмы. По результатам исследований была построена картина азимутального распределения концентрации газовой и газо-металлической плазмы в объеме вакуумной камеры. Расположение зонда в вакуумной камере представлено на рисунке 8.

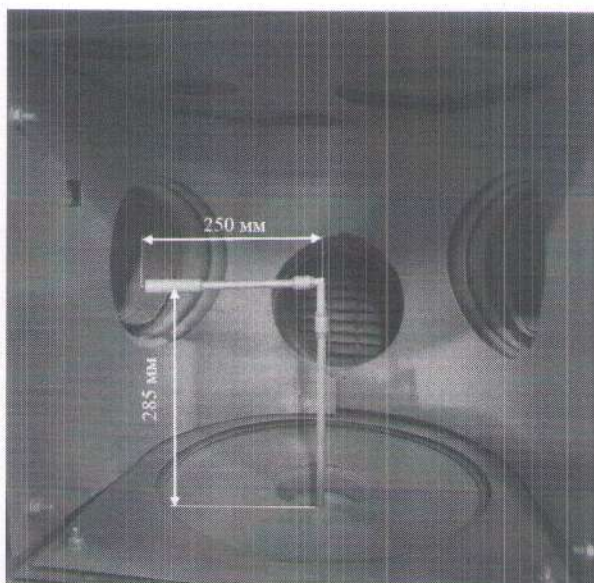


Рисунок 8 – Расположение зонда в вакуумной камере

Исследование газовой плазмы проводилось в аргон-азотной среде с соотношением газов 1:9. Напуск газов осуществлялся через источник газовой плазмы «ПИНК». Рабочее давление в процессе проведения эксперимента было равным 0,5 Па. В таблице 1 представлен режим напыления в разрядной схеме, предназначенной для генерации пучково-плазменного образования в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом, который был принят за базовых по итогам предыдущих исследований [20].

Режим напыления для традиционной разрядной схемы, представленной на рисунке 3а, был подобран таким образом, чтобы количество поступающей в разрядный промежуток мощности в обоих случаях было одинаковым и составляло 2700 Вт до включения вакуумно-дуговых испарителей и 6900 Вт при работающих источниках металлической плазмы.

Съемка зондовых характеристик проводилась по 20 точкам, расположенным вдоль траектории поворота зонда. Потенциал плазмы был рассчитан полуграфическим методом, с использованием полученной вольт-амперной характеристики (ВАХ). С помощью электронной ветви зондовой ВАХ была рассчитана концентрация плазмы и температура электронов [21].

По результатам исследований оценивался коэффициент неоднородности распределения концентрации плазмы. Величина коэффициента неоднородности, характеризующая неоднородность азимутального распределения концентрации заряженных частиц, принималась равной отношению максимального отклонения величины концентрации заряженных частиц от среднего значения к среднему значению.

Измерения проводились по 20 точкам, за счет вращения зонда относительно центральной оси вакуумной камеры. Позиции зонда при измерении в 5й (90°), 10й (180°), 15й (270°) и 20й (0°) точках показаны на схемах экспериментальных установок (рис. 3).

2.4.2 Полученные результаты

Из полученных данных, представленных на рисунке 9, видно, что увеличение концентрации плазмы наблюдается в точках 0 (0°), 1 (18°), 19 (342°) для всех четырех экспериментов, что соответствует выходной апертуре источника газовой плазмы «ПИНК».

В процессе измерения зондовых характеристик в точке 0 зонд располагался в непосредственной близости от эмиссионной сетки. В результате поток электронов замыкался на зонд. Это приводило к получению завышенных характеристик концентрации плазмы, что не соответствует действительности.

В экспериментах № 3 и № 4 происходило включение генераторов металлической плазмы. В связи с этим в диапазоне углов, соответствующим выходным апертурам вакуумно-дуговых испарителей ($90^\circ - 144^\circ$ и $216^\circ - 270^\circ$), также наблюдаются повышенные значения концентрации плазмы. На основании чего можно сделать вывод, что в этих областях происходит формирование газо-металлической плазмы, формируемой катодным пятном

вакуумно-дугового испарителя и потоком заряженных частиц с поверхности катода, имеющего направленный характер. Из-за хаотичного движения катодного пятна по поверхности катода зонд оказывается в области потока дуговой плазмы, в результате чего наблюдается завышенный результат измерений.

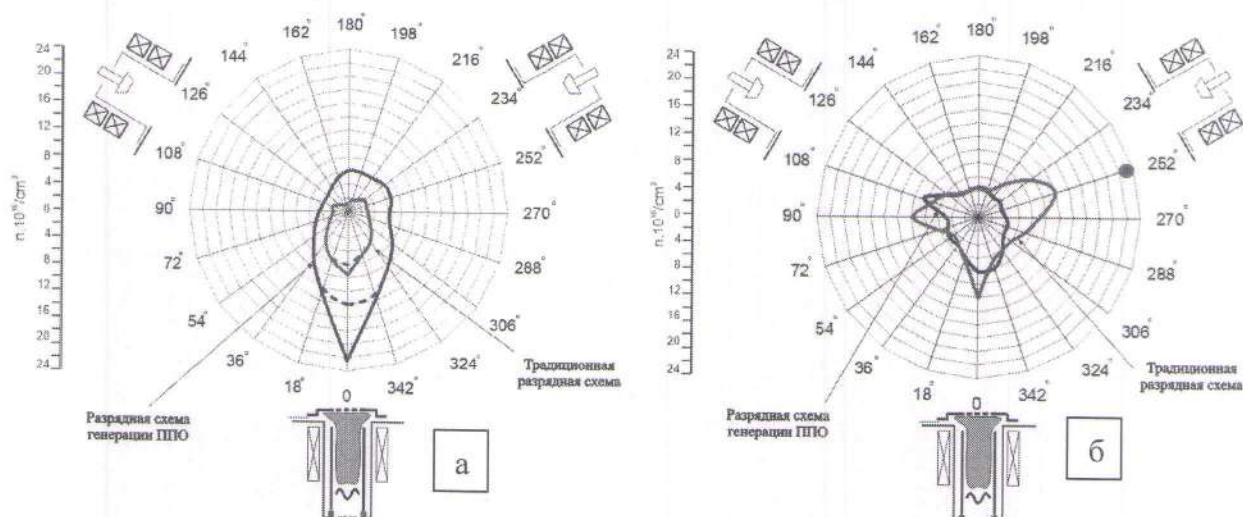


Рисунок 9 – График распределения величины концентрации газовой плазмы (а) и газо-металлической плазмы в вакуумной камере (б)

Таблица 4 – Результаты расчета коэффициента неравномерности

№ эксперимента	Разрядная схема	Вакуумно-дуговые испарители	Среднее значение концентрации плазмы	Максимальное значение концентрации плазмы	Коэффициент неравномерности $(n_{\max} - n_{\text{ср}}) / n_{\text{ср}}, \%$
			$n_{\text{ср}}, 1/\text{м}^3$	$n_{\max}, 1/\text{м}^3$	
1	ППО (рис. 1.1б)	Выкл.	$7,43 \cdot 10^{16}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	102%
2	Традиционная (рис. 1.1а)	Выкл.	$3,62 \cdot 10^{16}$	$8 \cdot 10^{16}$	121%
3	ППО (рис. 1.1б)	Вкл.	$5,3 \cdot 10^{16}$	$9,5 \cdot 10^{16}$	81%
4	Традиционная (рис. 1.1а)	Вкл.	$6,76 \cdot 10^{16}$	$1,33 \cdot 10^{17}$	97%

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что в экспериментах № 1 и № 2 значения коэффициентов неравномерности выше по сравнению с экспериментами № 3 и № 4. Как правило вблизи выходной апертуры источников газовой и металлической плазмы находится область с максимальным значением концентрации плазмы. Использование в разрядной

схеме двух дополнительных генераторов металлической плазмы приводит к выравниванию коэффициентов неравномерности и увеличению среднего значения концентрации плазмы в разрядном промежутке. Для газометаллического пучково-плазменного образования, формируемого в полой катоде несамостоятельного тлеющего разряда, среднее значение концентрации плазмы ниже, чем в газовом ППО. Предположительно, полученные значения концентрации плазмы уменьшаются вследствие кратковременного возникновения отрицательного потенциала плазмы, возникающими из-за особенностей горения дуговых разрядов с катодным пятном. Отрицательный потенциал плазмы может приводить к снижению энергии извлекаемых электронов, а, следовательно, и к снижению концентрации заряженных частиц в плазменном образовании.

Ниже представлены зондовые характеристики, полученные для точки № 14 в традиционной разрядной схеме (рис. 10) и в схеме для генерации газометаллического пучково-плазменного образования (рис. 11), расположенной вблизи выходной апертуры вакуумно-дугового испарителя. При анализе полученных значений потенциала плазмы для схем генерации газометаллического пучково-плазменного образования и в традиционной разрядной схеме генерации газометаллической плазмы, показали, что потенциал плазмы в традиционной разрядной схеме имеет величину около 2-3 В (рис. 12), тогда как в газометаллическом ППО от 0 до (-) 15 В. Анализируя зондовую характеристику, можно отметить, что значение потенциала плазмы изменяется во времени с отрицательного значения до близкого к нулевому значению. На зондовой характеристике, представленной на рисунке 9, можно выделить две основные области сосредоточения полученных значений тока насыщения электронов. Электронный ток насыщения на зонд определяется формулой (1).

$$I_e = \frac{1}{4} e n_e \bar{v} S_z \quad (1),$$

где e – заряд электрона, n_e – концентрация электронов, \bar{v} – средняя скорость электронов, S_z – площадь зонда.

Область 1 соответствует более высоким значениям тока насыщения, что может быть связано с резким повышением концентрации высокоэнергетичных частиц, попадающих на зонд. Резкое повышение концентрации электронов, попадающих на зонд, может быть связано с попаданием высокоэнергетичных частиц, эмитируемых с поверхности катода в процессе работы вакуумно-дугового испарителя.

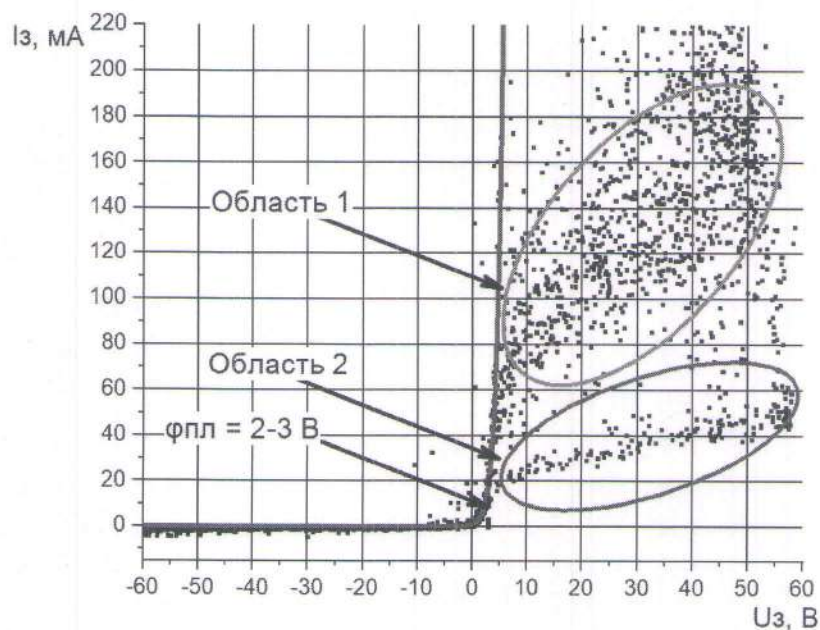


Рисунок 10 – Зондовая характеристика, полученная в традиционной разрядной схеме для генерации газометаллической плазмы

Характер распределения точек на плоскости $I_z (U_z)$ в системе генерации ППО имеет иной характер. Значительная часть точек расположена во второй четверти, что говорит о том, что потенциал газометаллической плазмы имеет отрицательное значение относительно потенциала анода.

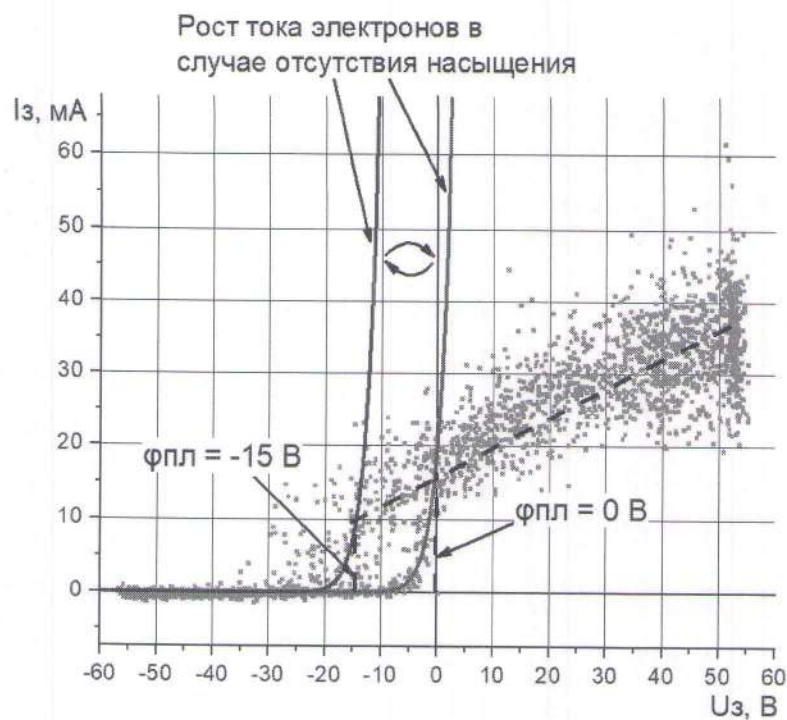


Рисунок 11 - Зондовая характеристика, полученная в разрядной схеме для генерации газо-металлических пучково-плазменных образований

На рисунке 11 изображены крайние положения экспонент, характеризующих величину потенциала плазмы. По всей видимости, положение экспоненты изменяется во времени между этими двумя крайними позициями.

Данному изменению положения экспоненты, характеризующей рост тока электронов в случае отсутствия насыщения, соответствуют изменения в картине распределения потенциала электрического поля в разрядном промежутке. На рисунке 12 представлена качественная картина, показывающая предполагаемый процесс изменения распределения электрического потенциала между двумя крайними положениями. Верхнее положение распределения потенциала соответствует состоянию разрядной системы, при котором токи дуговых разрядов замыкаются на кольцевые аноды малой площади, а нижнее распределение характеризует состояние разрядной системы, при котором токи дуговых разрядов либо становятся близки к нулю, вероятно, в результате кратковременного погасания до момента

автоматического срабатывания поджига, либо замыкаются на близлежащие стенки полого катода.

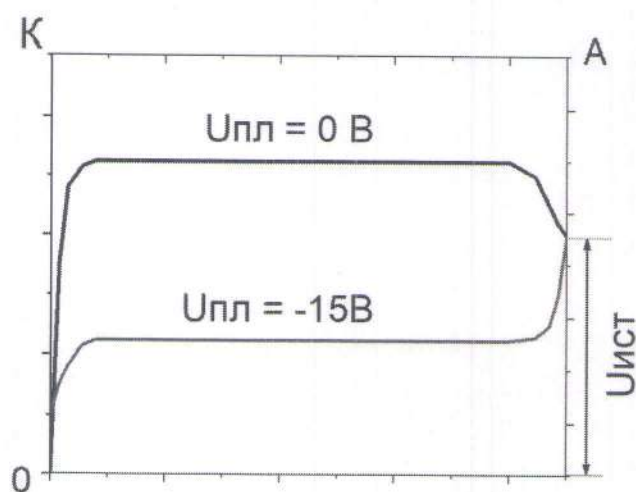


Рисунок 12 – Распределение потенциала в разрядном промежутке: К - катод, А-анод.

По полученным зондовым характеристикам была рассчитана температура электронов T_e для газовой и газо-металлической плазмы, формируемой в традиционной разрядной схеме и в схеме для генерации газо-металлических пучково-плазменных образований. Результаты расчетов представлены в таблице 5. В таблице приведено среднее значение температуры электронов, полученное по 20 точкам.

Таблица 5 – Результаты расчета температуры электронов

№ эксперимента	Разрядная схема	Вакуумно-дуговые испарители	Среднее значение температуры электронов
			$T_{e\text{ ср}}, \text{ эВ}$
1	ППО (рисунок 1.16)	Выкл	1,3
2	Традиционная (рисунок 1.1а)	Выкл	1,4
3	ППО (рисунок 1.16)	Вкл	2,3
4	Традиционная (рисунок 1.1а)	Вкл	1,5

Анализируя результаты расчетов, представленные в таблице 5, можно отметить, что средняя температура электронов в эксперименте № 1 и в эксперименте № 2 имеют близкие значения и составляют 1,3 эВ и 1,4 эВ соответственно. При работающих генераторах газовой плазмы среднее

значение температуры в эксперименте № 3 и в эксперименте № 4 составляет 2,3 эВ и 1,5 эВ соответственно. Таким образом, средняя температура электронов в разрядной схеме для генерации газо-металлических пучково-плазменных образований примерно на 60 % выше, чем в традиционной разрядной схеме. По-видимому, увеличение температуры электронов происходит из-за того, что ионы свободно достигают стенок вакуумной камеры, формирующих полый катод, замыкание электронов на анод же затруднено, из-за малой площади анода и большого количества электронов, эмитируемых с поверхности катода во время работы вакуумно-дугового испарителя.

Повышенная температура электронов в газо-металлическом ППО по сравнению с газовым ППО, а также по сравнению с традиционной разрядной схемой является отличительной чертой системы генерации газо-металлического ППО, что выражается в особых свойствах плазменного образования и необходимости их учета при синтезе покрытий.

Глава 3. Закономерности синтеза твердых нитридных покрытий в газо-металлических ППО

В современном мире технологии играют ключевую роль в развитии различных отраслей промышленности. Вакуумно-дуговое напыление упрочняющих покрытий, которое находит широкое применение в машиностроении, авиационной и космической технике, а также в других областях. Поэтому наряду с исследованиями свойств и закономерностей генерации плазмы в разрядной схеме генерации газо-металлических пучково-плазменных образований, проводились исследования закономерностей синтеза многокомпонентного покрытия $(\text{Zr}+\text{TiBSiNi})\text{N}$. Результаты работы представлены в [22].

3.1 Материалы и методы исследования

Покрытие напылялось в двух разрядных схемах, описанных в главе 2. Покрытия осаждались на цилиндрические образцы (диаметром 8 мм и высотой

6 мм) из твердого сплава ВК-8 ($WC + 8 \% Co$), которые крепились на столе с планетарной системой вращения. Благодаря этому, происходило перемещение образцов в объеме вакуумной камеры и дополнительное вращение образцов вокруг своей оси, что позволяет равномерно напылять покрытие. Скорость вращения поворотного стола составляла 3,5 об/мин. В сравнительных исследованиях для генерации металлической плазмы применялись два вакуумно-дуговых испарителя. В качестве материала катода использовались циркониевый сплав Э110 и Ti-B-Si-Ni, полученный методом СВС. Прессованные СВС-катоды изготавливались на основе экзотермического сочетания элементов Ti, B, Si в атомном соотношении $2Ti:2B:Si$ с введением Ni (10 ат.%) в качестве связки [23].

Исследование физико-механических и триботехнических свойств покрытий

Измерение толщины напыленных покрытий было произведено методом калотестирования. Стальной шар вращается по поверхности образца с покрытием. Между шаром и образцом добавляется алмазная суспензия и при вращении образуется характерная сферическая лунка (рис. 13). Используя полученные диаметры внутреннего и внешнего отпечатка, рассчитывается толщина полученного покрытия.

Исследование микротвердости покрытия с помощью прибора KBW-1 (KB Pruftechnik GmbH, Германия) с алмазной пирамидой Виккерса при нагрузке на индентор 0,1 Н. Значение твердости было рассчитано, как среднее значение по результатам 10 измерений. Так же измерялась адгезионная прочность и хрупкость методом индентирования на твердомере Роквелла при нагрузке 1500 Н при трёх испытаниях.

Для оценки качества покрытий было проведено скретч-тестирование с использованием прибора Revetest RST (CSM Instruments, США). В качестве индентора применялся алмазный конус Роквелла, радиусом 200 мкм. В процессе тестирования регистрировался сигнал акустической эмиссии (АЭ) в зависимости от нагрузки на индентор. Нагрузка линейно увеличивалась от 0

до 150 Н. Перемещение индентора осуществлялось на расстояние 5 мм со скоростью 3 мм/мин. После завершения теста было получено оптическое изображение дорожки износа покрытия с помощью инвертированного микроскопа Leica DMi8M (Leica Microsystems, Германия).

Для определения фазового состава покрытий был использован метод рентгенофазового анализа (РФА) на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-6000S. В качестве источника излучения применялось $\text{CuK}\alpha$ -излучение, которое позволило получить детальные данные о структуре и составе покрытий. Метод РФА основан на явлении дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решётке исследуемого материала, что позволяет определить фазовый состав покрытий с высокой точностью.

В связи с тем, что покрытия на основе нитридных соединений циркония нашли свое применение в повышении стойкости к окислению деталей и механизмов, были дополнительно проведены рентгенодифракционные исследования фазовых превращений этого покрытия в смоделированных температурных условиях эксплуатации при нагреве образцов в атмосфере воздуха до температуры 1100 °С с применением синхротронного излучения.

Для проведения эксперимента использовалось синхротронное излучение. Эксперимент был выполнен на дифрактометре In Situ станции «Прецизионная Дифрактометрия II» на канале синхротронного излучения № 6 накопителя электронов ВЭПП-3 (Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия). Нагрев образца осуществляли в рентгеновской высокотемпературной камере Anton Paar НТК-2000 платиновым нагревателем, который одновременно являлся держателем образца. Рабочая длина волны излучения $\lambda=0,172$ нм, скорость нагрева образца 15 °С/мин, диапазон температур 30÷1100 °С. Регистрация рентгеновских дифрактограмм производилась с использованием позиционно-чувствительного однокоординатного детектора ОД-3М-350, время экспозиции 1 мин/кадр. Обработка результатов измерений производилась с

использованием программы для обработки результатов измерений Fityk v.1.3.1.

Полученные результаты

По результатам калотестирования, толщина покрытия, напыленного в традиционной разрядной схеме составила 3,9 мкм, а полученные значения микротвердости составили $HV = 40,9$ ГПа.

Толщина покрытия, соответствующая напылению покрытия в газометаллическом пучково-плазменном образовании, составила 3 мкм, что несколько уступает толщине покрытия, полученного в традиционной разрядной схеме (3,9 мкм). Это может быть обусловлено более интенсивным испарением осаждаемых атомов в режиме ППО по сравнению с режимом ПИНК. Однако микротвердость покрытия выросла до 47,8 ГПа.

Из сравнения отпечатков Роквелла (рис. 13) можно отметить, что отслоение покрытия, полученного в газометаллическом пучковом образовании, не носит лепестковый характер на периферии в отличие от покрытия, полученного с применением источника ПИНК. При этом соотношение внешнего диаметра отслоения покрытия к внутреннему диаметру (отпечатка индентора) составляет 1,7, в то время как это соотношение для покрытия, полученного в традиционной разрядной схеме, больше и составляет 2,0. Косвенным образом это свидетельствует о лучшей адгезии покрытия ППО к подложке.

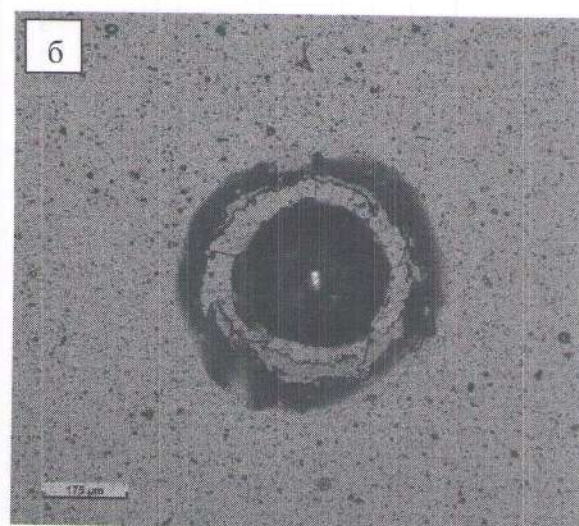
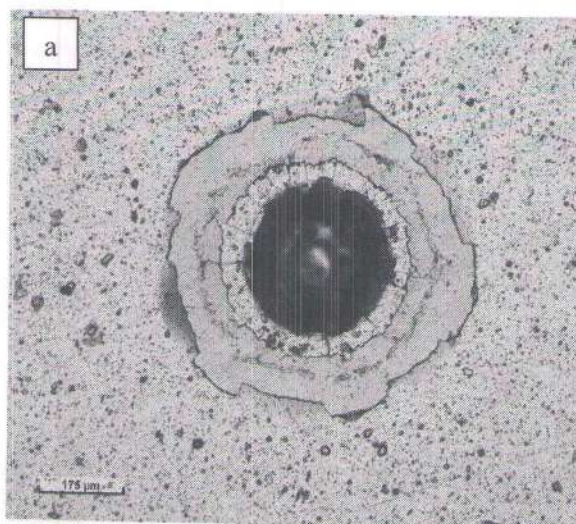


Рисунок 13 – Характерный вид отпечатков Роквелла покрытия $(\text{Zr}+\text{TiBSiNi})\text{N}$, полученного с применением источника ПИНК (а) и пучково-плазменного образования (б).

На рисунке 14а приведена характерная зависимость сигнала акустической эмиссии от нагрузки и глубины внедрения индентора в процессе скретч-испытаний покрытия ПИНК, а на рисунке 14б соответствующее изображение дорожки изнашивания при этом испытании.

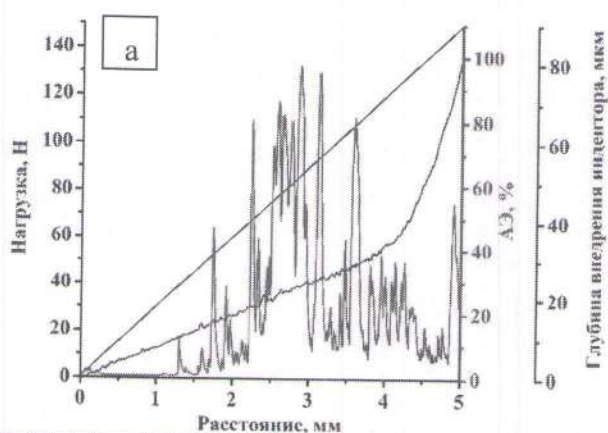


Рисунок 14 – Зависимость сигнала акустической эмиссии от нагрузки и глубины проникновения индентора в покрытие $(\text{Zr}+\text{TiBSiNi})\text{N}$, полученного с применением источника ПИНК (а), соответствующее изображение дорожки износа покрытия $(\text{Zr}+\text{TiBSiNi})\text{N}$ после скретч-испытания (б)

Линейный характер зависимости глубины проникновения индентора в поверхность сохраняется до нагрузки порядка 50 Н. На расстоянии более 1,5 мм от начала пути прохождения индентора начинают фиксироваться всплески сигналов АЭ, хотя покрытие еще не изнашивалось. Это свидетельствует об упруго-деформационном взаимодействии индентора с материалом покрытия и когезионном характере его изнашивания.

На рисунке 15а приведена характерная зависимость сигнала акустической эмиссии от нагрузки и глубины внедрения индентора в процессе скретч-испытаний покрытия ППО, а на рисунке 15б изображение дорожки изнашивания при этом испытании.

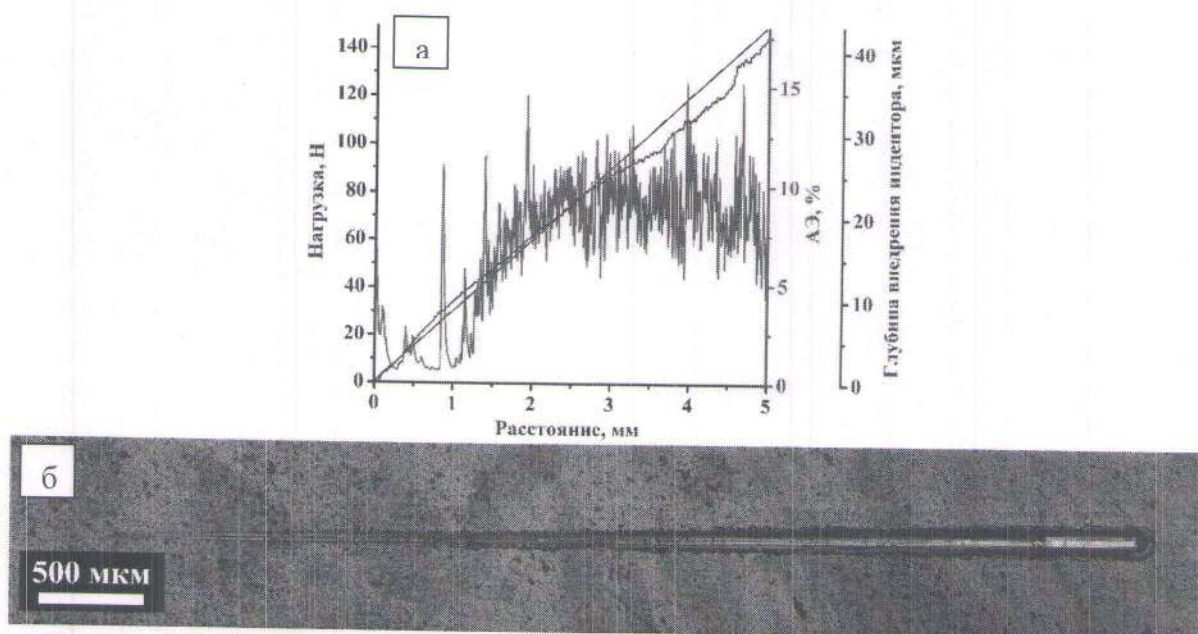


Рисунок 15 – Зависимость сигнала акустической эмиссии от нагрузки и глубины проникновения индентора в покрытие (Zr+TiBSiNi)N, полученного в режиме ППО (а), соответствующее изображение дорожки износа покрытия (Zr+TiBSiNi)N после скретч-испытания (б)

Линейный характер зависимости глубины проникновения индентора в это покрытие сохраняется вплоть до нагрузки порядка 80 Н. На расстоянии более 2,5 мм от начала пути прохождения индентора наблюдается спад сигнала АЭ. Отслоение покрытия от подложки начинается на расстоянии порядка 4 мм, что превосходит показатели покрытия ПИНК, полученного в традиционной разрядной схеме, и свидетельствует о лучшей адгезии с подложкой.

На рисунке 16 приведены в сравнении данные рентгенофазового анализа покрытия $(\text{Zr}+\text{TiBSiNi})\text{N}$, сформированного в традиционной разрядной схеме и покрытия этого же состава, сформированного в газо-металлическом пучково-плазменном образовании. Видно существенное отличие фазовых составов полученных покрытий. В первую очередь, это касается наличия в покрытии $(\text{Zr}+\text{TiBSiNi})\text{N}$ сформированного в режиме ППО, боридов и силицидов титана TiB_2 и TiSi_2 , обладающих большей термостойкостью по сравнению с нитридами титана и циркония. По-видимому, наличие этих фаз обуславливает и большую интегральную твердость всего покрытия.

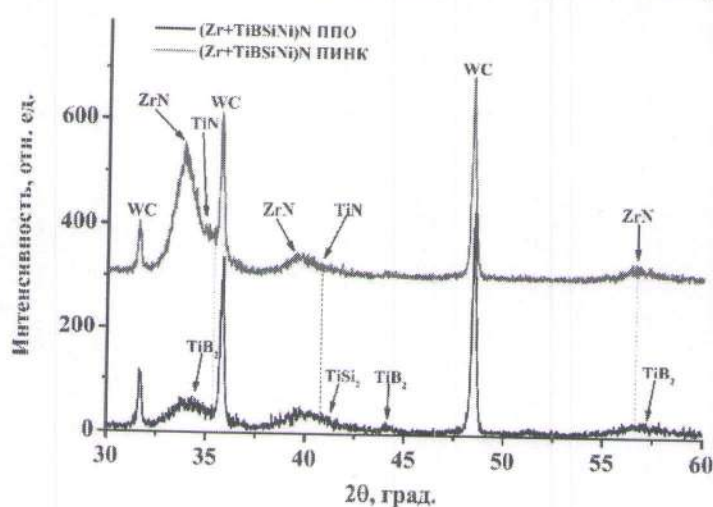


Рисунок 16 – Сравнительные результаты рентгенофазового анализа покрытия $(\text{Zr}+\text{TiBSiNi})\text{N}$, полученного в газо-металлическом пучково-плазменном образовании (нижний график) и в традиционной разрядной схеме (верхний график).

Изложенные выше результаты позволяют полагать о большей эффективности новой схемы синтеза покрытия $(\text{Zr}+\text{TiBSiNi})\text{N}$ в газо-металлическом пучково-плазменном образовании по сравнению с традиционной схемой генерации газо-металлической плазмы. Покрытие этого состава дополнительно было исследовано методом рентгеновской дифракции с применением синхротронного излучения при нагреве в атмосфере воздуха. Исследование показало, что заметные фазовые превращения в этом покрытии начинаются при температуре более 750°C , в частности образовании оксида циркония ZrO_2 . В целом это свидетельствует о высокой термостойкости полученного многокомпонентного покрытия $(\text{Zr}+\text{TiBSiNi})\text{N}$ (рис. 17).

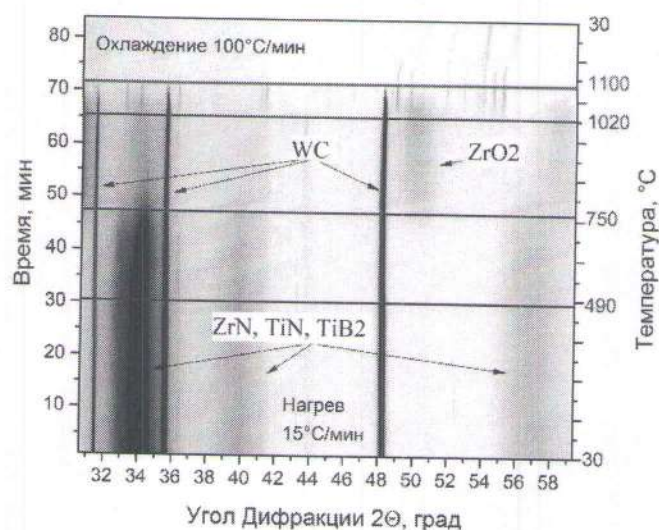


Рисунок 17 - Данные рентгенофазового анализа в режиме «in-situ».

Научные положения, сформулированные на основе результатов исследования

1. Степень неоднородности потока ионов во времени, бомбардирующих поверхность материалов и изделий в процессе синтеза покрытий, осаждаемых методом вакуумно-дугового плазменно-ассистированного напыления в газо-металлическом ППО, генерируемым в полном катоде несамостоятельного тлеющего разряда, на ≈ 15 процентов, ниже, чем в традиционной схеме генерации газо-металлических плазменных образований на основе дуговых разрядов низкого давления с полным анодом, что приводит к созданию условий прогнозируемого и воспроизводимого синтеза требуемых фаз в покрытии.

2. Средняя температура электронов в газо-металлическом ППО, генерируемым в полном катоде несамостоятельного тлеющего разряда, значительно, в 1,5 раза выше, чем в схеме генерации газо-металлического плазменного образования, формируемого в традиционной разрядной схеме на основе дуговых разрядов низкого давления с полным анодом.

3. Созданный генератор газо-металлических ППО, обеспечивающий формирование газо-металлических ППО с общей концентрацией заряженных частиц $\approx 10^{17} \text{ м}^{-3}$ в диапазоне давлений (0,2-1) Па обеспечивает управляемый синтез нитридных покрытий системы (Zr+TiBSiNi)N и получение в них твердых фаз боридов и силицидов титана TiB_2 и TiSi_2 , обеспечивающих высокую твердость всего покрытия.

Обоснование достоверности полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается воспроизводимостью результатов, использованием надёжных методик измерения, использованием поверенного оборудования. Результаты приведённых исследований находятся в согласии со схожими данными других авторов.

Обоснование новизны и научной ценности результатов исследования и научных положений

Разработан и запущен в эксплуатацию экспериментальный стенд для генерации газо-металлических пучково-плазменных образований.

Показано, что система для генерации газо-металлических пучково-плазменных образований в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом, в которой для стабильного горения несамостоятельного тлеющего разряда использовалась дополнительная инжекция электронов из плазмы несамостоятельного дугового разряда с накалимым и полым катодом, характеризуется повышенной температурой электронов и более низкой степенью неоднородности по сравнению с традиционной схемой генерации газо-металлических плазменных образований с полым анодом.

Сведения об опубликовании результатов исследования в рецензируемых научных журналах

1. V.V. Denisov, Yu. A. Denisova, E.L. Vardanyan, E.V. Ostroverkhov, A.A. Leonov, M.V. Savchuk. Deposition of a multilayer coating in a gas-metal beam-plasma formation at low pressure // Russian Physics Journal, Vol. 64, №1, P. 145-150; (DOI: 10.1007/s11182-021-02310-9).

2. A.A. Leonov, V.M. Savostikov, V.V. Denisov, Yu. A. Denisova, A.B. Skosyrsky, M.V. Savchuk, M. S. Syrtanov, A.V. Pirozhkov, A.N. Shmalov. Comparison of properties of the ZrN mononitride coating and (Zr plus Ti-B-Si-Ni)N multicomponent coating obtained by vacuum-arc plasma-assisted deposition // Journal of Surface Investigation, Vol. 17, P. 43-50; (DOI: 10.1134/S1027451023070315).

3. Денисов В.В., Денисова Ю.А., Варданян Э.Л., Островерхов Е.В., Леонов А.А., Савчук М.В. Осаждение многослойного покрытия в газометаллическом пучково-

плазменном образовании при низком давлении // Известия вузов. Физика. 2021. Т. 64. № 1 (757). С. 125-129. (DOI: 10.17223/00213411/64/1/125).

4. Яковлев В.В., Денисов В.В., Коваль Н.Н., Ковальский С.С., Островерхов Е.В., Егоров А.О., Савчук М.В. Генерация плазмы с повышенной степенью ионизации в импульсном сильноточном тлеющем разряде низкого давления с полым катодом // Изв. вузов. Физика. 2020. № 10. С. 109–116. (DOI: 10.17223/00213411/63/10/109).

5. Савчук М.В., Денисов В.В., Ковальский С.С., Леонов А.А., Прокопьев В.Е., Шмаков А.Н. Газо-металлические пучково-плазменные образования для нанесения упрочняющих покрытий // Materials. Technologies. Design. 2023.

6. M.V. Savchuk, V.V. Denisov, S. S. Kovalsiy, A.A. Leonov, V.E. Prokopiev, A.N. Shmalov. Gas-metallic beam-plasma formations for deposition of strengthening coatings // Materials. Technologies. Design. 2023. № 5. С. 103–112; (DOI: 10.54708/26587572/2023/5515103).

7. Савчук М.В., Денисов В.В., Денисова Ю.А., Егоров А.О., Ковальский С.С., Яковлев В.В. Влияние условий горения электродугового разряда на размер микрокапельной фракции в нитридном покрытии // Известия Вузов. Физика. – 2021. – Т.64. – №11. – с. 158-163. (DOI: 10.17223/00213411/64/11/158).

8. Савостиков В.М., Денисов В.В., Денисова Ю.А., Леонов А.А., Овчинников С.В., Савчук М.В. Влияние условий осаждения на свойства многослойных покрытий на основе нитридов Zr, Ti, Al и Si, синтезированных плазменно-ассистированным катодно-дуговым напылением // Известия Вузов. Физика. – 2021. – Т.64. – №12. – с. 43-48. (DOI: 10.17223/00213411/64/12/43).

Сведения о представлении результатов исследования на международных и всероссийских научных конференциях

1. Генерация газо-металлических пучково-плазменных образований в несамостоятельном тлеющем разряде // VII Международный Крейнделевский семинар «Плазменная эмиссионная электроника», 31 июля – 6 августа 2023, Республика Бурятия, Россия (устный доклад Савчук М.В.)

2. Gas-metallic beam-plasma formations for deposition of strengthening coatings // The 16th International Conference "Gas Discharge Plasma and Their Applications"(GDPA 2023), Ufa, Russia, September 18–22, 2023 (устный доклад Савчук М.В.)

3. Influence of pulse-periodic low-pressure arc discharge mode on coating properties // The 16th International Conference "Gas Discharge Plasma and Their Applications"(GDPA 2021), Ekaterinburg, Russia, September 5–10, 2021 (устный доклад Савчук М.В.)

4. Depositing of multilayer multicomponent coatings to increase the lifetime of cutting tool
// 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2022), Tomsk,
Russia, October 2 – 8, 2022 (устный доклад Савчук М.В.)

Сведения о личном вкладе аспиранта в получение результатов научного исследования

- Проектирование сборки и введение в эксплуатацию экспериментально
стенда.
- Проектирование и изготовление отдельных узлов электродной системы.
- Подготовка и проведение экспериментов.
- Обработка и интерпретация результатов проводилась совместно с
коллегами лаборатории пучково-плазменной инженерии поверхности ИСЭ
СО РАН.
- Подготовка публикаций по результатам научных исследований.
- Апробация результатов исследований на научных конференциях.

Список использованной литературы

1. V.V. Denisov, Yu. Akhmadeev, N.N. Koval, S.S. Kovalskii, I.V. Lopatin, E.V. Ostroverkhov, N.N. Pedin, V.V. Yakovlev, P.M. Schanin // Phys.Plasmas – 2019. – Vol.26 – P. 123510.
2. В.В. Будилов. Интегрированные методы обработки конструкционных и инструментальных материалов с использованием тлеющих и вакуумно-дуговых разрядов. – М.: «Машиностроение». – 2013. – 320 с.
3. А.С.Гренадёр, К.В. Оскомов, А.А. Соловьев, Н.М. Иванова, В.С. Сыпченко // Изв. Вузов. Физика. – 2019. – Т.62. – №7. – с. 97-104.
4. А.И. Меньшаков, Д.Р. Емлин, Н.В. Гаврилов, Ю.С. Сурков, С.О. Чолах // Изв. Вузов. Физика. – 2018. – Т.61. – № 8-2. – с. 97-104.
5. А.А. Андреев, В.М. Шулаев, Л.П. Саблев. Азотирование сталей в газовом дуговом разряде низкого давления // ФИП. – 2006. – Т.4. – В. 3 – 4. – С. 191 – 197.
6. Meletis, E.I. Intensified plasma-assisted processing: science and engineering // Surface and Coating Technology. – 2002. – V. 149. – P. 95 – 113.
7. Н.В. Гаврилов, А.С. Мамаев, А.И. Медведев. Азотирование аустенитной нержавеющей стали в низковольтном пучковом разряде // Известия высших учебных заведений – Физика. – №11/2. – 2009. – С. 166 – 171.
8. П.М. Щанин, Н.Н. Коваль, И.М. Гончаренко, С.В. Григорьев. Азотирование конструкционных сталей в газовых разрядах низкого давления // ФиХОМ. – 2001. - №3. – С.16 –19.

9. Борисов, Д.П. Генерация объемной плазмы дуговым разрядом с накаливаемым катодом / Д. П. Борисов, П.М. Щанин, Н.Н. Коваль // Изв. вузов. Физика. – Т. 37. – № 3. – 1994. – С. 115–121.
10. 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.
11. Korolev, Yu. D. Low-pressure discharges with hollow cathode and hollow anode and their applications / Yu. D. Korolev, N.N. Koval // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2018. – V.51. – p. 323001(1-21).
12. Лопатин И.В. Самостоятельный тлеющий разряд низкого давления с полым катодом при токах в десятки ампер / Лопатин И.В., Ковальский С.С., Ахмадеев Ю.Х., Щанин П.М., Коваль Н.Н. // Физика плазмы. – 2012. – т. 38.- № 7. – С. 639-643.
13. Лопатин, И.В. Генератор плазмы на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом большого объема / Лопатин И.В., Ахмадеев Ю.Х., Коваль Н.Н., Щанин П.М. // ПТЭ. – 2011. – № 1. – С.151 - 155.
14. А.В. Визирь, Е.М. Окс, Щанин П.М., Г.Ю.Юшков // ЖТФ. 1997. Т.67. №6. С.27-31.
15. Шандриков М.В. Генераторы низкотемпературной плазмы на основе разряда низкого давления с инжекцией электронов из дугового контрагированного разряда: дис. канд. техн. наук.: 05.27.02 / Шандриков Максим Валентинович. – Томск, 2004. – 146 с.
16. Ю. А. Быстров. Спектрометрический анализ состава плазменного потока вакуумно-дугового разряда / Ю. А. Быстров, Д. К. Кострин, А. А. Лисенков // Вакуумная техника и технология. – 2014. – Т.23. – №1 – С.164-166.
17. В. А. Герасимов. Повышение точности спектрального метода измерения параметров оптически прозрачных тонких плёнок / В.А. Герасимов, Д.К. Кострин, Л.М. Селиванов, А. А. Ухов // Вакуумная техника и технология. – 2014. – Т.24. – №1 – С.39-42.
18. А.А. Ухов. Особенности анализа состава плазмы с помощью малогабаритного оптического спектрометра / А.А. Ухов, Д.К. Кострин, В.А. Герасимов, Л.М. Селиванов // Известия СПбГЭТУ. – 2015. – № 3. – С.7 - 10.
19. Ковальский, С.С. Автоматизированная система зондовых измерений параметров плазмы разрядов низкого давления / С.С. Ковальский, В.В. Денисов, Н.Н. Коваль, И.В. Лопатин // Изв. вуз. Физика. – 2014. – Т.57. – №11-3. – С. 78 – 81.
20. V. V. Denisov, Yu. A. Denisova, E.L. Vardanyan, E.V. Ostroverkhov, A.A. Leonov and M.V. Savchuk, Deposition of a Multilayer Coating in a Gas-Metal Beam-Plasma Formation at Low Pressure, Russian Physics Journal, 2021, Volume 64, p 145-150.

21. Сысун, В.И. Зондовые методы диагностики плазмы / В.И. Сысун: Учебное пособие. – Петрозаводск: изд-во ПетрГУ, 1997. – 60 с.

22. V.M. Savostikov. Physical and mechanical properties of multicomponent (Zr+TiBSiNi)N coating fabricated by plasma-assisted vacuum-arc deposition / V.M. Savostikov, A.A. Leonov, V.V. Denisov, Yu. A. Denisova, M.V. Savchuk, A.B. Skosyrskii, A.N. Shmakov // Russian Physics Journal. – 2024. – Vol.66. – №11 – P.1173-1178.

23. 18. V. M. Savostikov. Investigation of the Physical and Mechanical Properties of Coatings Obtained by the Vacuum-Arc Sputtering of Ti–B–Si–Ni Cathodes Manufactured Using Self-Propagating High-Temperature Synthesis and Pressing / V. M. Savostikov, A. A. Leonov, V. V. Denisov, Yu. A. Denisova, A. B. Skosyrsky, and I.A. Shulepov, J. Surf. Investig. – 2023. – Vol.16. – P.681 – 686.