

На правах рукописи



Мурашов Юрий Васильевич

**Разработка дугового плазмотрона для нанесения
покрытий с учетом явлений неустойчивости
плазменного потока**

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт – Петербургский политехнический университет Петра Великого» на кафедре «Электротехника и электроэнергетика»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Фролов Владимир Яковлевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

Карасев Михаил Валентинович

генеральный директор закрытого акционерного общества «Научно-производственная фирма «Инженерный и технологический сервис»

кандидат физико-математических наук

Поняев Сергей Александрович

старший научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Ведущая организация: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»*


Защита состоится «29» декабря 2016 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.20 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главный учебный корпус, аудитория 150.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте www.spbstu.ru.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 212.229.20

кандидат технических наук, доцент

 *Иванов Дмитрий Владимирович*

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Применение устройств, генерирующих низкотемпературную плазму, получило широкое распространение в промышленности. Основными примерами применения дугового разряда являются плазменное напыление, дуговая сварка и плазменная резка металлов, где в качестве рабочего инструмента используется плазменный поток, генерируемый плазмотроном. Технология плазменного напыления заключается в плавлении напыляемого материала в плазменном потоке для нанесения на рабочую поверхность и используется для нанесения восстанавливающих, жаростойких, антикоррозионных, износостойких и антифрикционных покрытий. Основными критериями качества напыляемого покрытия являются пористость и адгезия. Эффективность технологии плазменного напыления и качество наносимого покрытия зависят от свойств наносимых материалов и характеристик плазменного потока. Именно поэтому главной технологической задачей при разработке новых конструкций плазмотронов для напыления является получение оптимальных параметров плазменного потока и режимов работы плазмотрона, обеспечивающих эффективность технологического процесса, качество наносимого покрытия и высокий рабочий ресурс конструктивных элементов плазмотрона. Научные исследования, направленные на повышение эффективности технологии плазменного напыления, проводятся во всем мире, при этом можно выявить основные школы, разрабатывающие теории физических процессов низкотемпературной плазмы. В Российской Федерации выделяются Новосибирская школа, где становление основ экспериментальных исследований электродуговых генераторов плазмы осуществлялось действительным членом РАН Жуковым М.Ф., Московская школа, возглавляемая академиком РАН Цветковым Ю.В., и школа Санкт-Петербургского политехнического университета (СПбПУ), где у истоков стоял Клубникин В.С.

Новосибирская школа рассматривает общие вопросы газовой динамики и базируется на экспериментальных исследованиях плазмогенерирующих устройств, решая прикладные задачи.

Московская школа сосредоточена на вопросах плазмохимии и материаловедения в технологии плазменного напыления.

Современные программные продукты позволяют осуществлять численное моделирование физических процессов в плазмотроне, тем самым снижая затраты и время при проектировании новых типов устройств для технологии плазменного напыления, а также дает возможность оптимизации

геометрии и характеристик плазмотрона, позволяя отойти от эмпирического характера разработки. Актуальность работы связана с необходимостью разработки дугового плазмотрона для нанесения покрытий и создания эффективной модели, позволяющей учесть явления неустойчивости плазменного потока, позволяющей сократить объёмы работ, выполняемых экспериментальным методом. Математическое моделирование и экспериментальные исследования легли в основу школы СПбПУ.

Школа СПбПУ, ныне возглавляемая Фроловым В.Я., на протяжении последних 40 лет занимается разработкой высокотехнологичного оборудования для технологического процесса напыления (разработано более сотни технологий в области плазмотермического нанесения покрытий), осуществляя сотрудничество с INP Greifswald (Германия) на протяжении многих лет, проводя совместные экспериментальные исследования. Комплексный подход в изучении плазменных технологий школы СПбПУ, включающий в себя как экспериментальные, так и теоретические исследования (в том числе численные методы) позволил стать признанным в мире центром по разработке, исследованию и численному моделированию плазмотронов, плазменных технологий и процессов.

Исследованию явлений неустойчивости плазменного потока и разработке дугового плазмотрона для нанесения покрытий и посвящена настоящая диссертация.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью диссертационной работы является разработка дугового плазмотрона для нанесения покрытий с учетом явлений неустойчивости плазменного потока с установлением закономерности турбулизации потока на участках конструкции плазмогенерирующего устройства.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ состояния современных теории и практики технологии плазменного нанесения покрытий.
2. Анализ физических явлений неустойчивости плазменного потока на стадиях генерирования плазмы.
3. Анализ явлений неустойчивости плазменного потока на выходе плазмотрона с учетом турбулизации генерируемого потока плазмы.
4. Разработка нестационарной математической модели дугового плазмотрона с осевой подачей плазмообразующего газа.

5. Разработка нестационарной математической модели дугового плазмотрона с вихревой стабилизацией.
6. Исследование неустойчивости плазменного потока.
7. Экспериментальные исследования дугового плазмотрона с межэлектродными вставками для нанесения покрытий.

Методы исследования. Теоретические исследования основаны на разработке нестационарных математических моделей дугового плазмотрона для нанесения покрытий, осуществления численного моделирования в программном обеспечении Comsol Multiphysics, основанном на использовании метода конечных элементов и анализе полученных результатов. Экспериментальные исследования режимов работы дугового плазмотрона, регистрация данных во времени об основных характеристиках плазмотрона с использованием АЦП при работе от различных источников питания, анализ полученных результатов. Сравнительный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна

1. Разработаны нестационарные математические модели дугового плазмотрона с межэлектродными вставками для нанесения покрытий с осевой подачей плазмообразующего газа и с вихревой стабилизацией электрической дуги в канале плазмотрона с учетом явлений неустойчивости плазменного потока в программном продукте Comsol Multiphysics.
2. Разработана трехмерная нестационарная математическая модель формирования вихревой подачи газа в катодном узле плазмотрона, получены полиномиальные зависимости распределения составляющих скорости на выходе катодного узла в программном продукте Comsol Multiphysics.
3. Разработана математическая модель теплообменных процессов у поверхности частицы напыляемого порошка в ламинарном и турбулентном течениях.
4. Произведено уточнение критического числа Рейнольдса для существующей конструкции дугового плазмотрона с межэлектродными вставками.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке:

- математических моделей плазмотрона с межэлектродными вставками, позволяющих минимизировать экспериментальные исследования при разработке новых конструкций плазмотронов, обеспечивающих

стабильность плазменного потока с целью повышения эффективности процесса плазменного нанесения покрытий;

- требований к конструкции плазмотрона для обеспечения стабильности плазменного потока и эффективного теплоотведения от элементов плазмотрона с целью повышения эксплуатационного ресурса;
- требований к характеристикам источника питания, используемых в технологии плазмотермического нанесения покрытий.

Практическая значимость работы заключается в применении результатов при проектировании новых и модернизации существующих установок плазмотермического нанесения покрытий с целью повышения эффективности процесса плазменного нанесения покрытий и увеличения эксплуатационного ресурса применяемого оборудования.

Объектом исследования является плазмотрон с межэлектродными вставками.

Положения, выносимые на защиту:

1. Анализ явлений неустойчивости плазменного потока дугового плазмотрона.
2. Создание нестационарных математических моделей дугового плазмотрона с межэлектродными вставками для нанесения покрытий с осевой подачей плазмообразующего газа и с вихревой стабилизацией электрической дуги в канале плазмотрона в программном продукте Comsol Multiphysics, позволяющих идентифицировать флуктуации плазменного потока.
3. Результаты теоретических исследований влияния геометрии анодной части плазмотрона и характеристик источника питания на стабильность плазменного потока.
4. Методика проведения экспериментальных исследований: принципиальные схемы проведения экспериментальных исследований, идентификация флуктуаций плазменного потока, определение радиального распределения температуры методами спектрального анализа.
5. Сравнение и анализ теоретических и экспериментальных результатов исследований.

Обоснованность и достоверность научных положений, изложенных в диссертации, базируется на применении общеизвестных положений магнитогазодинамики и термодинамики, методов численного моделирования с привлечением специализированного программного

обеспечения для моделирования физических процессов Comsol Multiphysics, основанном на использовании метода конечных элементов, и согласованности результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на следующих научных конференциях:

1. XXI Международная конференция «Physics of Switching Arcs» (Чехия, Нове-Место-на-Мораве, 2015).
2. Международная конференция «2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference» (Россия, Санкт-Петербург, 2016).
3. XII Международная конференция «Плёнки и покрытия - 2015» (Россия, Санкт-Петербург, 2015).
4. XLII Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Россия, Санкт-Петербург, 2013).
5. XLIV Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Россия, Санкт-Петербург, 2015).
6. Международная конференция, посвященная 150-летию со дня рождения Михаила Андреевича Шателена.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 8 печатных работах, в том числе 3 работы в изданиях, включенных в Перечень ВАК.

Личный вклад. Автор на всех этапах работы непосредственно участвовал в постановке задачи, разработке математической модели работы дугового плазмотрона, выборе методик расчётов теоретических параметров, разработке схемы экспериментального исследования и методов диагностики, монтаже экспериментального оборудования, разработке алгоритма регистрации данных, обработке результатов численного моделирования и экспериментального исследования, а также формировании выводов по выполненной работе.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 75 наименований, и двух приложений. Полный объем диссертации – 95 страниц, в том числе рисунков – 75, таблиц – 8.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность выбранной темы, краткое состояние проблем исследования дуговых плазмотронов, используемых для

технологии плазмотермического нанесения покрытий, сформулированы цели и задачи работы, отмечены научная новизна и практическая ценность.

Первая глава посвящена обзору современного состояния исследований явлений неустойчивости плазменного потока и методов стабилизации. Основные показатели напыляемого покрытия (пористость и адгезия) зависят от физических свойств наносимых материалов и параметров теплового потока. Главной технологической задачей при создании плазмотрона для напыления является получение стабильного теплового потока плазменной струи и обеспечение высокого рабочего ресурса элементов плазмотрона. На данном этапе произведен анализ основных типов неустойчивостей, влияющих на стабильность плазменного потока. Критический анализ широко известных работ в области проектирования и численного моделирования дуговых плазмотронов не выявил однозначного нахождения зависимости стабильности плазменного потока от характеристик источника питания и конструктивных элементов плазмотрона, имеющих ключевое значение в определении явлений неустойчивости плазменного потока.

В первой главе представлены основные достижения в области изучения и численного моделирования дуговых плазмотронов с учетом явлений неустойчивости плазменного потока. Несмотря на широкий спектр изучаемых вопросов, касающихся равновесности или неравновесности плазмы, подачи плазмообразующего газа (аксиальная или тангенциальная) и т.д., отсутствует детальное описание факторов (их взаимное влияние) и возможность компенсации для стабилизации плазменного потока. Влияние теплообменных процессов при ламинарном и турбулентном потоках на конструктивные элементы плазмотрона и обрабатываемый материал не указаны. Именно этим аспектам уделено внимание в данной работе.

Таким образом, на основании критического анализа в области исследования дуговых плазмотронов определен ряд задач, позволяющих разработать нестационарные математические модели с учетом явлений неустойчивости, конструктивные элементы плазмотрона, учесть характеристики источника питания и осуществить верификацию численных расчетов с помощью результатов экспериментального исследования.

Во второй главе представлена методика численного моделирования работы дугового плазмотрона с учетом явлений неустойчивости плазменного потока и теплообменных процессов в струе плазмы у поверхности частицы в программном продукте Comsol Multiphysics.

Разработанные математические модели дугового плазмотрона представляют собой сочетание задач электромагнитизма, газовой динамики и теплопередачи, тем самым представляя собой мультифизическую задачу, где соответствующие уравнения связаны термодинамическими и транспортными свойствами в неявном виде и в явном виде через джоулев нагрев в случае уравнения баланса энергии и системы уравнений Максвелла.

Разработанные нестационарные математические модели в программном продукте Comsol Multiphysics основаны на расчете уравнений баланса энергии (УБЭ), движения (УД), дополненного уравнением неразрывности (УН), и системы уравнений Максвелла.

Уравнение баланса энергии является одним из основных уравнений при теоретическом описании и численном моделировании математической модели теплообменных процессов в плазме и при нестационарном случае имеет следующий вид:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{v} \cdot \nabla T - \lambda \nabla T = Q_s - Q_{rad}, \quad (1)$$

где T – температура плазмы; ρ – плотность плазмы, зависящая от температуры; C_p – теплоемкость плазмы, зависящая от температуры; v – скорость потока плазмы; λ – теплопроводность плазмы, зависящая от температуры; Q_s – функция источника; Q_{rad} – удельная мощность излучения, зависящая от температуры.

Функция источника Q_s определяет удельную мощность джоулевого нагрева, согласно выражению (2):

$$Q_s = \sigma E^2 \quad (2)$$

Распределение скорости может быть получено из решения уравнения движения для ламинарного потока:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \vec{F} + \nabla \cdot \left[-pI + \mu (\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T) \right], \quad (3)$$

где I – единичная матрица; F – силы, действующие на поток (сила Лоренца); μ – вязкость потока плазмы, зависящая от температуры; p – давление.

Сила Лоренца определяется согласно выражению (4):

$$F_x = \vec{J} \times \vec{B}, \quad (4)$$

Уравнение движения дополняется уравнением неразрывности (5), образуя разрешенную систему дифференциальных уравнений.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5)$$

Расчет электромагнитного поля осуществляется с использованием системы уравнений Максвелла:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{J} = \left(\sigma + \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \vec{E} \\ \vec{E} = -\nabla V \\ \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \times \vec{H} = \vec{J} \\ \vec{B} = \nabla \times \vec{A} \end{array} \right. , \quad (6)$$

где J - плотность тока; σ - электропроводность плазменного потока, зависящая от температуры; ε - диэлектрическая проницаемость воздуха; E - напряженность электрического поля; V - разность потенциалов; A - векторный потенциал магнитного поля; H - напряженность магнитного поля; B - магнитная индукция.

Одним из основных результатов численного моделирования работы дугового плазматрона является распределение температуры, которое позволяет идентифицировать флуктуации потока плазмы. Распределение температуры при расходе плазмообразующего газа 0,55 г/с в различные моменты времени в случае с характеристикой тока $I = f(t)$, представлено на рис. 1.

Согласно результатам численного моделирования работы дугового плазматрона при режиме с расходом плазмообразующего газа 0,55 г/с и характеристикой тока, соответствующей источнику питания АПР-404, время формирования установившегося плазменного потока составляет примерно 0,026 с, а число Рейнольдса – 72.

Распределение температуры при расходе плазмообразующего газа 0,55 г/с в различные моменты времени в случае с характеристикой тока $I = const$ представлено на рис. 2. Из результатов моделирования видно, что при малых расходах плазмообразующего газа влияние характеристики тока источников

питания на стабильность плазменного потока является незначительным. Время формирования установившегося потока и число Рейнольдса, в случае питания плазмотрона от источника питания с идеализированным током, совпадает с результатами для случая с применением в качестве источника питания АПР-404.

Влияние источника питания (т.е. развитие неустойчивости, обусловленной джоулевым тепловыделением) на стабильность плазменного потока начинает проявляться при развитии силовой неустойчивости, связанной с флуктуацией импульса при увеличении расхода плазмообразующего газа. Данное явление отчетливо наблюдается при численном моделировании работы дугового плазмотрона с расходом плазмообразующего газа 2 г/с.

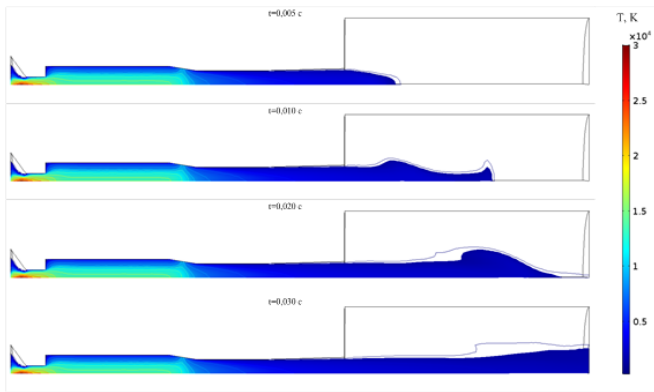


Рисунок 1. Распределение температуры ($I = f(t)$; $G = 0,55 \text{ г/с}$)

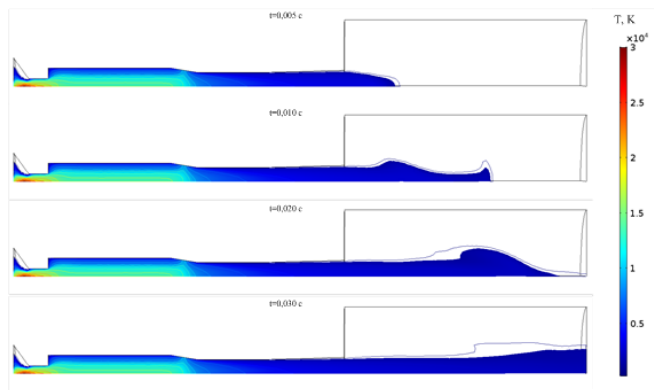


Рисунок 2. Распределение температуры ($I = const$; $G = 0,55 \text{ г/с}$)

Численное моделирование было реализовано для различных режимов работы дугового плазмотрона, способов подачи плазмообразующего газа и разных значениях угла диффузора анодной части с целью установления основных зависимостей и идентификации факторов, влияющих на стабильность плазменного потока.

С целью оценки влияния характера потока на теплообменные процессы разработана упрощенная математическая модель, представляющая собой неизотермические ламинарное и турбулентное течения, с помещенным внутрь твердым телом.

Расчетная область для анализа теплообменных процессов при ламинарном потоке представлена на рис. 3.

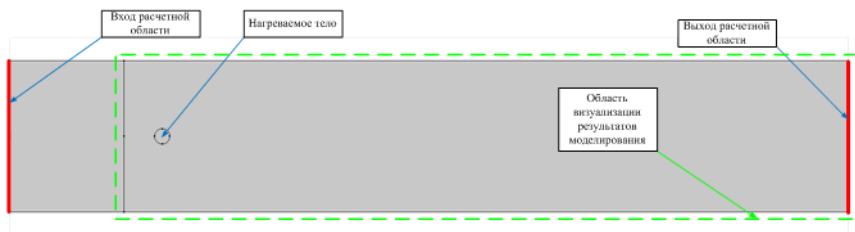


Рисунок 3. Расчетная область (ламинарный поток)

Расчетная область для математической модели с неизотермическим турбулентным течением (см. рис. 4) отличается от расчетной области, представленной на рис. 3, наличием объекта, образующего турбулентное течение плазменного потока.

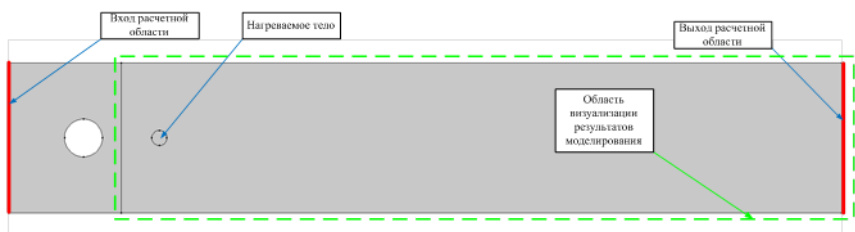


Рисунок 4. Расчетная область (турбулентный поток)

Распределения температуры и скорости для ламинарного неизотермического плазменного потока представлены на рис. 5.

Распределения температуры и скорости для турбулентного неизотермического плазменного потока представлены на рис. 6.

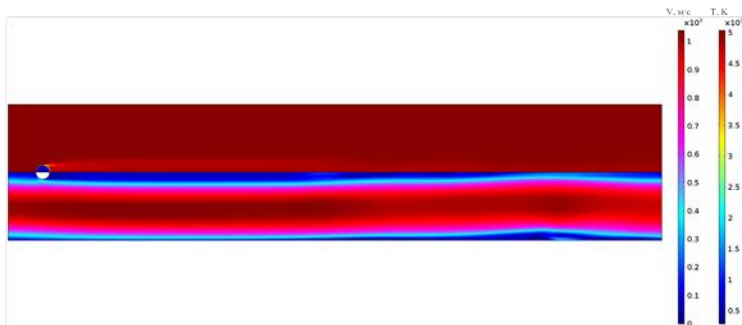


Рисунок 5. Распределения температуры и скорости в момент времени t (ламинарный поток)

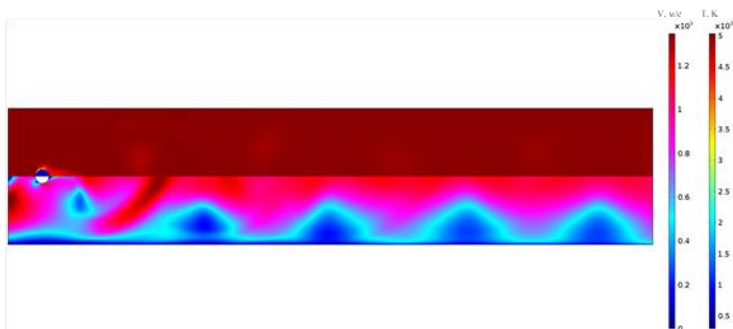


Рисунок 6. Распределения температуры и скорости в момент времени t (SST модель)

На основе общепринятых законов физики разработана нестационарная математическая модель дугового плазмотрона (с осевой подачей плазмообразующего газа и вихревой стабилизацией) с межэлектродными вставками для плазмотермического нанесения покрытий, детально представлены факторы, влияющие на стабильность плазменного потока.

Произведен анализ влияния характеристик источника питания на стабильность плазменного потока, по результатам которого сделан следующий вывод: при использовании существующей конструкции дугового плазмотрона ПН-В1 для стабилизации плазменного потока необходимо использовать источник питания с максимально сглаженной характеристикой тока.

Представлен анализ влияния элементов конструкции дугового плазмотрона с межэлектродными вставками на стабильность плазменного потока. Из результатов анализа следует, что для компенсации характеристик

источника питания возможно путем варьирования угла диффузора анодной части плазмотрона, из результатов численного моделирования следует, что угол должен быть более, чем 2° , в существующей конструкции плазмотрона ПН-В1 угол составляет $1^\circ 24'$, при этом необходимо отметить, что увеличение угла ведет к «укорачиванию» плазменного потока и формированию отрывных течений при угле более 6° .

Анализ математической модели нагрева частицы напыляемого порошка в ламинарном и турбулентном плазменных потоках демонстрирует, что более интенсивный прогрев частицы осуществляется в турбулентном потоке за счет разрушения пограничного слоя путем импульсного воздействия и активной теплопередачи из-за перемешивания слоев течения, что является важным фактором при использовании тугоплавких материалов в технологии плазмотермического нанесения покрытий. Кроме того, результаты данного анализа свидетельствуют о необходимости создания ламинарного потока внутри плазмотрона (для увеличения эксплуатационного ресурса) и турбулентного течения на выходе плазмотрона для более интенсивного прогрева частиц.

В третьей главе приведена разработанная методика проведения экспериментальных исследований, целью которых является верификация нестационарной математической модели.

Регистрация данных во времени аналоговых характеристик с последующей цифровой обработкой результатов позволяет оценить стабильность плазменного потока и идентифицировать неустойчивость, вызванную флуктуацией электрических параметров, и как следствие, изменение параметров тепловой энергии в столбе электрической дуги плазмотрона. Для регистрации силовой неустойчивости, связанной с флуктуацией импульса реализована регистрация данных градиента давления при помощи емкостного микрофона. Принципиальная схема экспериментального стенда для снятия характеристик представлена на рис. 7.

Разработанное оборудование для регистрации данных во времени базируется на применении платформы Arduino Mega 2560, построенной на микроконтроллере ATmega2560.

Организация связи для записи данных осуществлена через универсальный асинхронный приёмопередатчик (УАПП, англ. UART) с привлечением программного продукта MATLAB пакета Simulink для синхронизации платформы Arduino Mega 2560 с компьютером.

Выявлено, что при питании от источника питания АПР-403, обладающего более сглаженной характеристикой тока в сравнении с АПР-404, пульсации падения напряжения на дуге значительно ниже, чем в случае с источником питания АПР-404 (см. рис. 8).

Согласно результатам исследования для технологии плазмотермического напыления целесообразно применять в качестве источника питания АПР-403, обеспечивающий стабильный плазменный поток, что подтверждает анализ Фурье, приведенный в третьей главе диссертации.

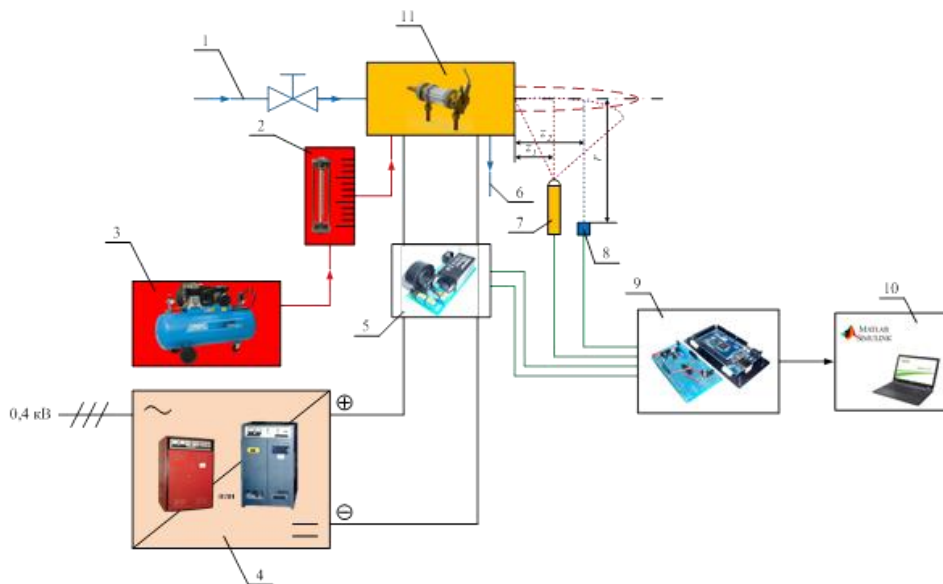


Рисунок 7. Принципиальная схема экспериментального стенда для снятия характеристик плазматрона ПН-В1: 1 – подача водяного охлаждения, 2 – ротаметр, 3 – воздушный компрессор, 4 – источник питания (АПР-403 или АПР-404), 5 – аналоговый модуль для снятия характеристик тока и напряжения на дуге, 6 – отвод охлаждающей жидкости, 7 – оптический датчик (фототранзистор L-610MP4BT/BD), 8 – электретный микрофон (ЕСМ-10D), 9 – модуль расширения преобразования аналоговых сигналов в цифровые и передачи данных по интерфейсу связи USB device, 10 – компьютер с предустановленным программным обеспечением, 11 – исследуемый объект (плазматрон ПН-В1)

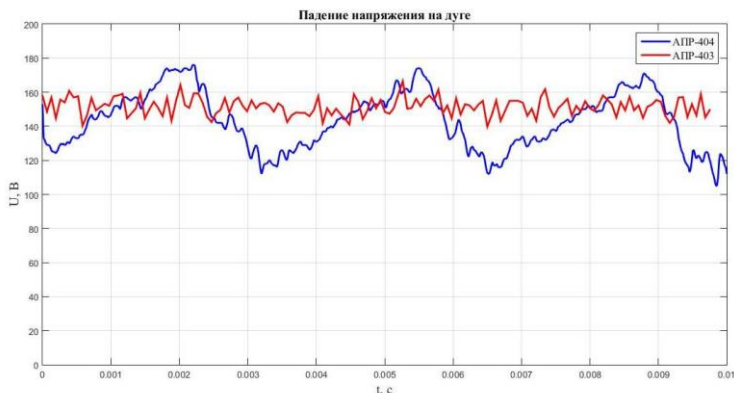


Рисунок 8. Временные зависимости падения напряжения на дуге при использовании источников питания АПР-403 и АПР-404

Спектроскопический анализ плазматрона ПН-В1 осуществлен совместно с лабораторией Лейбницкого института плазменной науки и технологии INP Greifswald с целью получения радиального распределения температуры на различном расстоянии от выходного отверстия сопла плазматрона. Экспериментальные исследования проводились в соответствии со схемой, представленной на рис. 9.

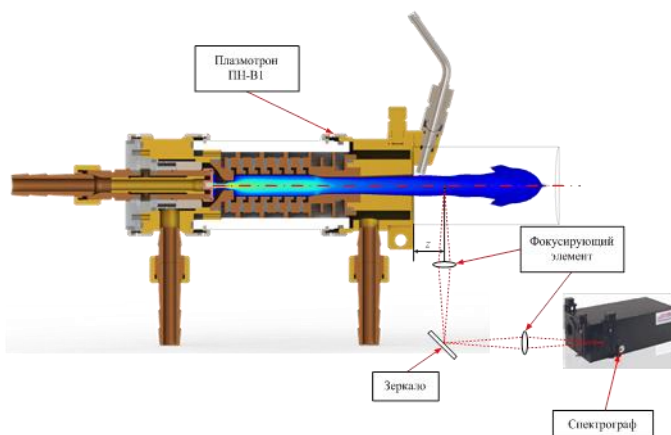


Рисунок 9. Схема проведения спектроскопического исследования

По результатам спектроскопического исследования получены радиальные распределения температуры на разном удалении от выхода плазматрона.

Применяемые методики проведения экспериментальных исследований позволяют получить следующие данные о плазменном потоке:

- характеристики тока и напряжения на электрической дуге;
- уровень шума во времени, определяемый градиентом давления;
- интенсивность светового излучения во времени;
- радиальное распределение температуры.

Полученные экспериментальные данные позволяют оценить стабильность плазменного потока и влияние характеристик источников питания. Согласно полученным результатам исследования целесообразно рекомендовать источник питания АПР-403 в качестве основного источника питания для плазмотрона ПН-В1, что позволяет обеспечить более стабильный плазменный поток, тем самым улучшить характеристики напыляемого покрытия и повысить коэффициент полезного действия технологического процесса плазмотермического нанесения покрытий.

Радиальные распределения температуры, полученные в результате спектрального анализа, в совокупности с характеристикой напряжения на электрической дуге позволяют произвести верификацию разработанной нестационарной математической модели.

В четвертой главе представлен сравнительный анализ результатов численного моделирования и экспериментального исследования дугового плазмотрона с межэлектродными вставками, позволяющий осуществить верификацию нестационарной математической модели.

Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных произведено для режима работы дугового плазмотрона с расходом плазмообразующего газа 0,55-0,56 г/с. Одной из важнейших характеристик при оценке стабильности плазменного потока является падение напряжения на дуге. Расчетная и экспериментальная зависимости падения напряжения на дуге от времени представлены на рис. 10.

Полученные при численном моделировании значения падения напряжения на дуге согласуются с результатами экспериментальных исследований, незначительные различия обусловлены отсутствием движения точки привязки электрической дуги и отсутствием учета приэлектродных процессов в математической модели дугового плазмотрона с межэлектродными вставками.

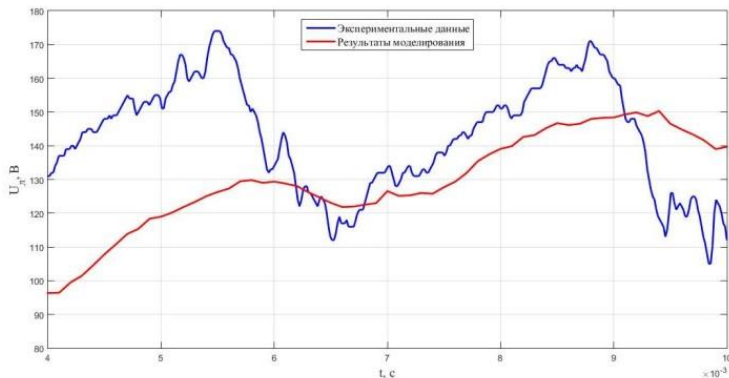


Рисунок 10. Падение напряжения на дуге (результаты численного моделирования и экспериментальные данные)

Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных о радиальном распределении температуры, полученных при спектральном анализе, осложняется из-за флуктуации плазменного потока, т.к. полученные радиальные распределения температуры являются усредненными значениями за время экспозиции, поэтому для более корректного сравнения было проведено осреднение радиальных распределений температуры по времени при установившемся течении плазменного потока, полученных по результатам численного моделирования. Кроме того для качественной оценки флуктуации температуры представлены минимальное и максимальное распределения температуры в установившемся режиме работы плазматрона, полученные из результатов моделирования.

Результаты спектрального анализа приведены с погрешностью, обусловленной методикой обработки результатов. Верификация нестационарной математической модели осуществляется путём сопоставления результатов численного моделирования и спектрального анализа для идентичных режимов работы плазматрона.

Расчетное и экспериментальное радиальные распределения температуры на удалении 11 мм от выхода плазматрона представлены на рис. 11.

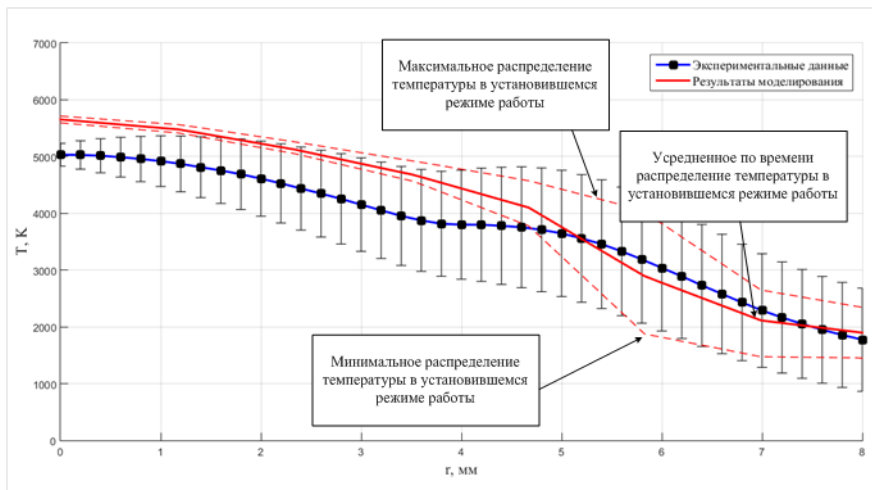


Рисунок 11. Радиальное распределение температуры на удалении 11 мм от выхода плазматрона

Радиальные распределения, полученные в результате численного моделирования, согласуются с результатами экспериментальных исследований в пределах погрешности, что свидетельствует о применимости разработанной математической модели.

Анализ математической модели на границе развития неустойчивости плазменного потока (из результатов экспериментального исследования 1,25 г/с) в идентичных режимах работы дугового плазматрона с проведенными экспериментальными исследованиями позволяет уточнить значение критического числа Рейнольдса. Согласно результатам исследования критическое значение числа Рейнольдса для конструкции плазматрона ПН-В1 составляет 267 и 212 при использовании источников питания АПР-403 и АПР-404 соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны нестационарные математические модели дугового плазматрона с межэлектродными вставками с вихревой стабилизацией и осевой подачей плазмообразующего газа с учетом явлений неустойчивости плазменного потока в программном продукте Comsol Multiphysics. Произведен анализ физических явлений, влияющих на устойчивость плазменного потока. Согласно результатам анализа были установлены факторы, влияющие на стабильность плазменного потока, а также

установлено их взаимовлияние с целью компенсации развития неустойчивости потока.

2. Разработана трехмерная нестационарная математическая модель прикатодного узла плазмотрона, где происходит формирование вихревого потока для последующей стабилизации и обжатия плазменного потока. По результатам численного моделирования получены полиномиальные зависимости осевой и радиальной скоростей на выходе формирователя от расхода плазмообразующего газа. Погрешность полученных коэффициентов полиномиальных зависимостей не превышает 5%. Полученные полиномиальные зависимости используются в качестве граничных условий в разработанной нестационарной математической модели дугового плазмотрона с вихревой стабилизацией и позволяют произвести численное моделирование с применением допущения осевой симметрии плазмотрона.

3. Произведен анализ влияния конструктивных элементов дугового плазмотрона на стабильность плазменного потока. Установлено, что при использовании диффузора анодной части плазмотрона с углом в диапазоне от 2° до 6° в номинальном режиме работы явление неустойчивости, обусловленное флуктуацией электрических параметров источника питания, и как следствие, изменение параметров тепловой энергии в столбе электрической дуги плазмотрона, компенсируется (коэффициент пульсаций напряжения для угла диффузора анодной части плазмотрона $1^\circ 24'$ при расходе плазмообразующего газа 2 г/с в номинальном режиме при использовании источника питания АПР-404 составляет 0,37, для угла диффузора анодной части плазмотрона 2° при расходе плазмообразующего газа 2 г/с в номинальном режиме при использовании источника питания АПР-404 составляет 0,06). Установлено, что увеличение угла диффузора анодной части приводит к «укорачиванию» плазменного потока и формированию отрывных течений (развитию неустойчивости, приводящей к формированию турбулентных течений вблизи стенок плазмотрона).

4. Разработана нестационарная математическая модель нагрева частицы напыляемого порошка в ламинарном и турбулентном потоках, позволяющая произвести анализ теплообменных процессов. Согласно результатам анализа более интенсивный прогрев частицы (в 1,97 раза температура возрастает быстрее при турбулентном течении, чем при ламинарном) осуществляется в турбулентном потоке за счет разрушения пограничного слоя путем импульсного воздействия и активной теплопередачи из-за перемешивания слоев течения, что является важным фактором при использовании тугоплавких материалов в технологии плазмотермического нанесения

покрытий. Кроме того, из результатов данного анализа следует, что необходимо обеспечить формирование ламинарного потока внутри канала плазмотрона для повышения эксплуатационного ресурса конструктивных элементов.

5. Разработана методика проведения экспериментальных исследований, позволяющая оценить стабильность плазменного потока при различных режимах работы дугового плазмотрона, а также идентифицировать влияние характеристик источника питания на устойчивость потока плазмы. Согласно полученным результатам рекомендовано использовать источник питания АПР-403, позволяющий обеспечить устойчивость плазменного потока, тем самым улучшить характеристики напыляемого покрытия и повысить коэффициент полезного действия технологического процесса плазмотермического нанесения покрытий.

6. Идентифицировано развитие неустойчивости плазменного потока на выходе дугового плазмотрона с межэлектродными вставками, согласно результатам исследований развитие неустойчивости плазменного потока наблюдается в режимах с расходом плазмообразующего газа более 1,25 г/с.

7. Радиальные распределения температуры, полученные в результате спектрального анализа, в совокупности с характеристикой напряжения на электрической дуге позволяют произвести верификацию разработанной нестационарной математической модели.

8. Произведено уточнение значений критического числа Рейнольдса путем сопоставления результатов численного моделирования верифицированной математической модели в идентичных режимах работы дугового плазмотрона с проведенными экспериментальными исследованиями. Согласно результатам исследования критическое значение числа Рейнольдса для конструкции плазмотрона ПН-В1 составляет 267 и 212 при использовании источников питания АПР-403 и АПР-404 соответственно.

9. Результаты работы, имея теоретическую основу, подтвержденные экспериментальными исследованиями и численными методами, могут быть применены при совершенствовании существующей и разработке принципиально новых конструкций дугового плазмотрона для плазмотермического нанесения покрытий. Применение численного моделирования позволит сократить объемы работы при экспериментальных исследованиях конструкций плазмотронов.

Основные публикации, в которых отражены результаты диссертации

1. Murashov I. Numerical simulation of DC air plasma torch modes and plasma jet instability for spraying technology / Frolov V., Ivanov D. // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW). – 2016. – pp.625-628. (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
2. Мурашов Ю.В. Моделирование вихревой стабилизации дугового плазматрона. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. №2(243). Т. 1. С. 53–61. (рекомендовано ВАК)
3. Frolov V. Special aspects of dc air plasma torch's operating modes under turbulent flow conditions. / Murashov I., Ivanov D. // Proc. 21st Symposium on Physics of Switching Arc (Nové Město na Moravě, Czech Republic, Sept. 7.-11., 2015) Plasma Physics and Technology Journal, Volume 2, pp. 129-133. (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
4. Мурашов Ю.В. Численное моделирование нестационарных процессов в дуговом плазматроне с межэлектродными вставками / Фролов В.Я., Кадыров А.А. // Неделя Науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. – Санкт-Петербург, 2015. – Часть II. – С. 137–139.
5. Мурашов Ю.В. Исследование неустойчивости и турбулентности потока плазмы в дуговом плазматроне для нанесения покрытий. / Фролов В.Я. // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. – Санкт-Петербург, 2013. – Часть I. – С. 102–104.
6. Мурашов Ю.В. Моделирование тиристорного источника питания с замкнутой системой управления в Simulink. / Смородинов В.В. // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. – Санкт-Петербург, 2013. – Часть I. – С. 105–107.
7. Мурашов Ю.В. Описание возможностей платформы arduino. Применение в системах промышленной автоматике. / Голобоков А.А., Фролов В.Я. // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. – Санкт-Петербург, 2013. – Часть I. – С. 108–110.
8. Фролов В.Я. Особенности режимов работы плазматронов постоянного тока для нанесения покрытий в условиях турбулизации потока / Иванов Д.В., Мурашов Ю.В. // Пленки и покрытия – 2015: труды 12-й Международной конференции. – Санкт-Петербург, 2015.