

На правах рукописи

Чуркин Иван Сергеевич

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА  
ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ТЕЛА  
ВРАЩЕНИЯ

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт – Петербургский государственный политехнический университет» (ФГБОУ «СПбГПУ»)

Научный руководитель:

доктор технических наук  
профессор  
Фролов Владимир Яковлевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
Башенко Всеволод Владимирович  
кандидат технических наук  
Бурьяненко Владимир Дмитриевич

Ведущая организация: ОАО «НПО ЦКТИ»

Защита состоится "09" февраля 2011 г., в 18 часов на заседании диссертационного совета Д.212.229.20 при ФГБОУ «СПбГПУ» по адресу: 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, Гл. здание, аудитория 150.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ «СПбГПУ».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, СПбГПУ, отдел аспирантуры и докторантуры.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.212.229.20

к.т.н., доцент

Курмашев А.Д.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Напыление представляет собой процесс нанесения покрытий на поверхность детали с помощью высокотемпературной скоростной струи, содержащей частицы порошка или капли расплавленного напыляемого материала, осаждающегося на подложке при ударном столкновении с его поверхностью. Существующие технологии напыления можно разделить на два основных вида в зависимости от источника тепловой энергии: газопламенное напыление, при котором используется теплота, выделяющаяся при сгорании смеси горючего газа с кислородом, и плазменное напыление, основанное на использовании теплоты, выделяющейся при горении электрической дуги. Технологии плазменного напыления широко применяются в промышленности с семидесятых годов XX-го века. Разработки последних нескольких десятилетий в области создания дуговых плазмотронов для нанесения покрытий основаны на уже существующих конструкциях, что ограничивает развитие технологий плазменного напыления с повышенной производительностью. В настоящее время производительность процесса плазменного напыления составляет примерно 3-8 кг/ч. Энергия, затрачиваемая на плавление и ускорение порошка, по отношению к энергии, подведенной к источнику питания, составляет всего 5-7%. Эта величина называется полным КПД процесса.

Для нанесения покрытий на некоторые изделия, такие как валы тяжелых машин, коленчатых валов судовых дизелей, шаровых клапанов вентилях, матриц пресс-форм, гребней шнеков и других аналогичных деталей, а так же для восстановления изношенных деталей различных машин и механизмов данной производительности недостаточно. Повысить производительность процесса можно, добавив дополнительную мощность непосредственно в струю плазмы, где происходит нагрев и расплавление порошка. С этой целью между соплом плазмотрона и деталью подключается дополнительный источник напряжения. Такой плазмотрон называется плазмотроном с вольтодобавкой на струю плазмы (ВДСП).

Различным аспектам решения задач исследования плазмы и разработки генерирующих ее дуговых плазмотронов для напыления посвящены работы: А. В. Донского, В.С. Клубника, Н.М. Ожегова, О.П. Солоненко, В.Я. Фролова, Н.А.

Кархина, и др. В то же время значительный вклад в моделирование плазменных процессов внесли М.Ф. Жуков, С.В. Дресвин, Н.К. Ши и др.

Критический анализ научно-технической литературы, посвященной способам формирования и методам исследования струи плазмы, показал недостаточную изученность характеристик плазменной струи. Переходя к экспериментальным исследованиям, следует отметить, что плазма в дуговых плазмотронах является достаточно сложным объектом исследований и диагностики. Сложность проведения измерений параметров сжатой дуги в большей мере связана с интенсивностью процессов тепло - и массообмена и высокой степенью концентрации энергии. Это приводит к значительной погрешности при обработке экспериментальных результатов.

**Цель работы** – разработка технологии напыления повышенной производительности с использованием дугового плазмотрона с вольтодобавкой на струю плазмы (ВДСП). Поставленная цель может быть достигнута путем решения следующих задач:

1. Анализа процессов, происходящих в струе плазмы в плазмотроне с ВДСП;
2. Разработка методики расчета параметров электрической дуги, горящей в канале и на струе плазмы плазмотрона с ВДСП;
3. Разработка методики проведения экспериментальных исследований, обеспечивающих установление режимов работы оборудования и параметров струи плазмы, позволяющей оценить достоверность результатов, полученных при математическом моделировании;
4. Разработка методики расчета нагрева частиц порошка в струе плазмы;
5. Выбор оптимальных режимов работы оборудования для нанесения покрытий на тела вращения, соответствующих максимальной производительности и обеспечивающих сохранение качества покрытия.

**Методы исследований.** В работе использовались теоретические положения теплофизики плазменных сред, численный метод контрольного объема для решения уравнений баланса энергии электрической дуги и уравнений движения, зондовые методы измерения температуры и скорости плазмы и металлографические методы исследования структуры полученных покрытий.

**Достоверность результатов работы** обеспечивалась сопоставлением результатов расчета с экспериментальными данными и изучением характеристик полученных покрытий.

При проведении экспериментальных работ использовалось следующее оборудование: плазмотрон для напыления порошковых материалов типа ПН-В1, входящий в состав установки воздушно-плазменного напыления типа УВПН-40, лабораторный стенд для исследования плазмотронов, микроскоп Zeiss Optio с программой компьютерного анализа изображений Tixomet Pro, измеритель скорости светящихся объектов ИССО-1, цифровые и аналоговые электроизмерительные приборы.

**Научная новизна работы.** Основные научные результаты, полученные впервые и защищаемые автором, заключаются в следующем:

1. Разработана технология нанесения покрытий воздушно-дуговым плазмотроном с вольтодобавкой на струю плазмы.
2. Методика и алгоритм расчета струи плазмы с учетом влияния основной дуги и тока, возникающего за счет вольтодобавки.
3. Методика оценки температуры струи плазмы путем создания модернизированных измерительных зондов.

**Практической значимостью работы** является повышение эффективности работы плазмотрона: коэффициента полезного действия (с 5% до 9%) и производительности установки (на 30-40%) при нанесении покрытий за счет варьирования вольтодобавки, приложенной к струе плазмы. Полученные результаты в учебных материалах кафедры «Электротехники и электротехнологии» ФГБОУ СПбГПУ и в работах ассоциации «Полиплазма».

**На защиту выносятся следующие основные положения:**

1. Методика и алгоритм расчета параметров струи плазмы с учетом влияния тока основной дуги и тока, возникающего за счет вольтодобавки.
2. Результаты теоретических исследований параметров струи плазмы воздушно-дугового плазмотрона (распределение температуры и скорости плазмы в струе) при различных значениях вольтодобавки и режимах работы плазмотрона.

3. Методика проведения экспериментальных исследований, позволяющая установить параметры, оказывающие наибольшее влияние на нагрев частиц порошка: скорость и температуру струи плазмы.

**Апробация работы.** Основные результаты работы на конференциях: всероссийской конференции «Неделя науки СПбГПУ» (Россия, Санкт-Петербург, 2008-2010 гг.); Международной конференции «Пленки и покрытия» (Россия, Санкт-Петербург, 2009-2011 гг.); Всероссийской конференции «Инновационная энергетика – 2010» (Россия, Новосибирск, 2010); Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации – 2010.» (Россия, Новосибирск, 2010); Международной конференции «Symposium on physics of switching arc» (Чехия, Брно, 2009-2011 гг.)

**Публикации по теме работы.** По материалам диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 5 – в изданиях, включенных в перечень ВАК.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, дается краткое состояние проблем изучения и исследований в области воздушно-плазменного нанесения покрытий, сформулированы цели и задачи исследований, отражены научная новизна и практическая ценность.

**Первая глава** посвящена состоянию проблем изучения и исследований нанесения покрытий. Рассмотрены все основные существующие методы нанесения покрытий. Проведена оценка преимуществ и недостатков воздушно-плазменного нанесения покрытий по сравнению с другими технологиями.

**Во второй главе** разработана методика расчета параметров плазмы в канале плазмотрона и в струе плазмы. На основании полученных результатов разработана методика расчета нагрева частиц порошка, переносимых плазменной струей.

**В третьей главе** разработана методика проведения экспериментальных исследований, позволяющая установить наиболее важные параметры плазмы, влияющие на нагрев порошка: скорость и температуру струи плазмы. Произведен анализ полученных результатов.

**В заключении** отражены выводы и рекомендации по результатам исследований в соответствии с целью и решенными задачами.

## ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 1. Методика и алгоритм расчета параметров струи плазмы с учетом влияния тока основной дуги и тока, возникающего за счет вольтодобавки

При расчете параметров плазмы в плазмотроне с ВДСП необходимо учитывать электрический ток, вызванный воздействием вольтодобавки. По этой причине общая расчетная область разбивается на две части: канал плазмотрона, в котором влияние тока, вызванного воздействием вольтодобавки, пренебрежимо мало, и струя плазмы. Параметры плазмы в канале плазмотрона и в струе рассчитываются независимо, при этом результаты расчета параметров плазмы в канале плазмотрона используются в дальнейшем для задания граничных условий на струе плазмы.

Математическая модель процессов, протекающих в плазмотроне, составляется на основе закона сохранения энергии, системы электромагнитных уравнений Максвелла, и системы уравнений Навье-Стокса: уравнения движения и уравнения неразрывности. Совокупность этих уравнений с начальными и граничными условиями позволяет получить распределение температуры и скорости плазмы, а так же распределение плотности тока в плазме и градиент давления. После ряда математических преобразований система дифференциальных уравнений, необходимых для расчета параметров плазмы, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho \cdot \left( v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) &= \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} \\ &+ F_{Bz} + \rho \cdot g_z, \\ \rho \cdot \left( v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) &= \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - \\ &- \frac{\partial p}{\partial r} + F_{Br} - \mu \cdot \frac{v_r}{r^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho \cdot v_z) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot \rho \cdot v_r) = 0 \quad (2)$$

$$\rho c_p \left( v_z \frac{\partial T}{\partial z} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \sigma E^2 - U_{rad} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\sigma \cdot r} \cdot \frac{\partial \chi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\sigma \cdot r} \cdot \frac{\partial \chi}{\partial r} \right) = 0 \quad (4)$$

Принимаем допущение, что ток, возникающий за счет вольтодобавки, не влияет на параметры плазмы в канале плазмотрона. Численным методом (методом контрольного объема) решаем данную систему уравнений для определения параметров плазмы. В результате решения этой задачи получаем распределение параметров плазмы внутри плазмотрона и на срезе сопла. Далее, приведенная выше, система уравнений решается для струи плазмы (рис.1.).



**Рис. 1. Границы расчетной области для вычисления параметров струи**

Граничные условия для данного случая задаются следующим образом:

Участок a-b: Граничные условия для скорости и температуры первого рода, их значения получены при расчете параметров плазмы в канале плазмотрона. Граничные условия для  $\chi$  - второго рода.

Участок b-c: Скорость плазмы равна нулю, температура  $T = 300$  К. Граничные условия для  $\chi$  - второго рода.

Участки c-d и d-e: Граничные условия для скорости и температуры второго рода. Граничные условия для  $\chi$  - первого рода:  $\chi = I/2\pi$ .

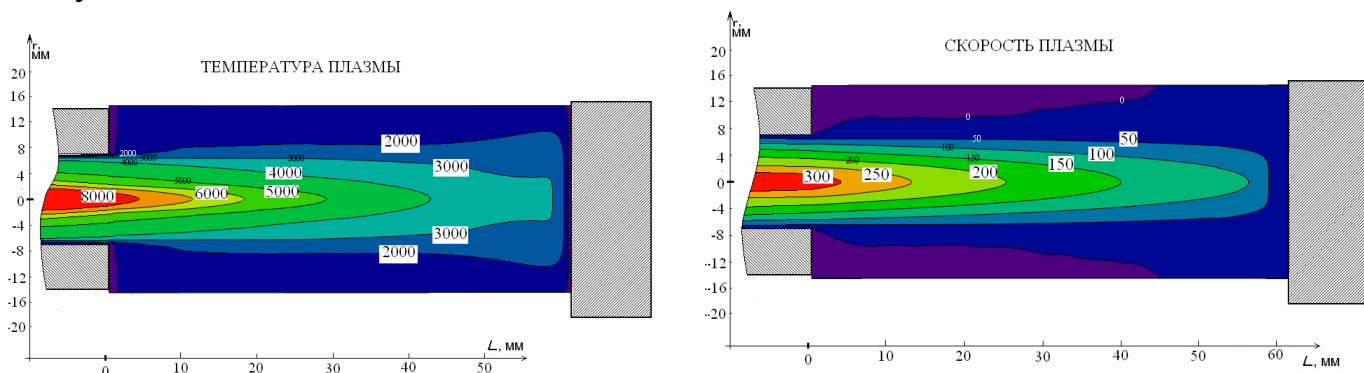
Участок e-f: Скорость плазмы равна нулю, температура равна температуре поверхности плазмы, измеренной экспериментально. Граничные условия для  $\chi$  - второго рода.

Участок f-a: Радиальная составляющая скорости плазмы равна нулю из условий осевой симметрии, граничные условия для температуры и осевой составляющей скорости плазмы – второго рода. Функция тока  $\chi$  равна нулю.



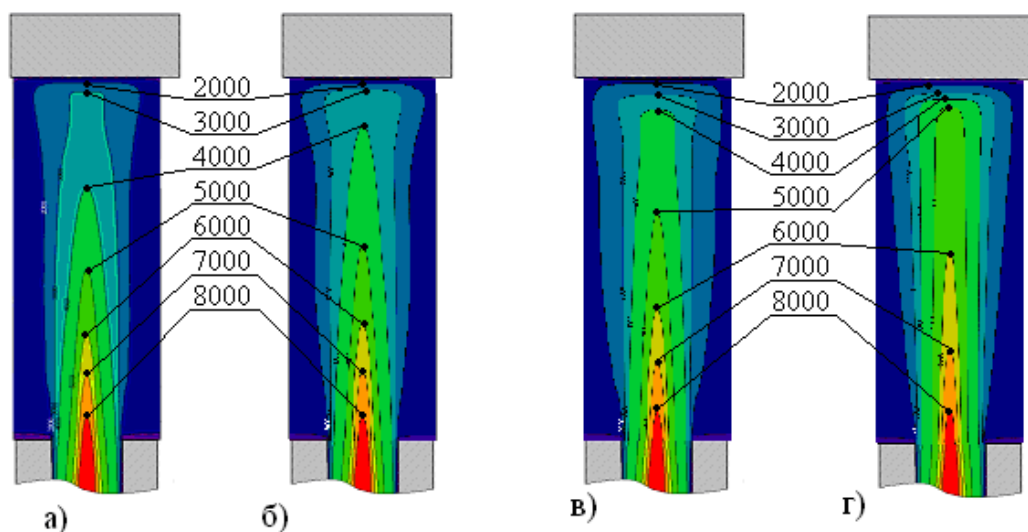
## 2. Результаты теоретических исследований струи плазмы воздушно-дугового плазмотрона при различных значениях вольтодобавки и режимах работы плазмотрона.

На рис. 2 приведены распределения температуры и скорости плазмы, полученные в результате решения систем уравнений (1-4), при  $I_{\text{осн.д}} = 100 \text{ А}$ ,  $U_{\text{осн.д}} = 160 \text{ В}$ ,  $G = 1 \text{ г/с}$ , напряжение вольтодобавки и вызванный им ток равны нулю.



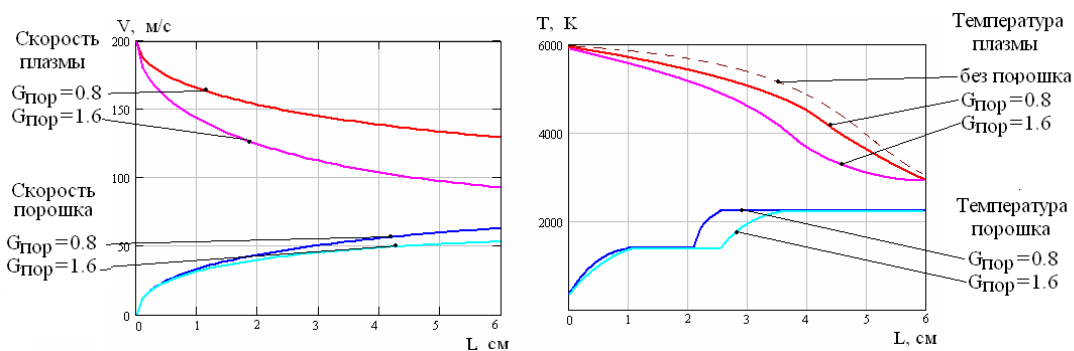
**Рис. 2.** Расчетное распределение температуры (К) и скорости (м/с) плазменной струи

По мере увеличения напряжения вольтодобавки заметно значительное увеличение температуры и скорости во всем объеме плазменной струи. Увеличение этих параметров приведет к более интенсивному теплообмену между плазменной струей и напыляемым порошком. Это позволит увеличить количество расплавляемого в струе и наносимого на покрытие порошка при той же мощности плазменной установки (Рис.3).



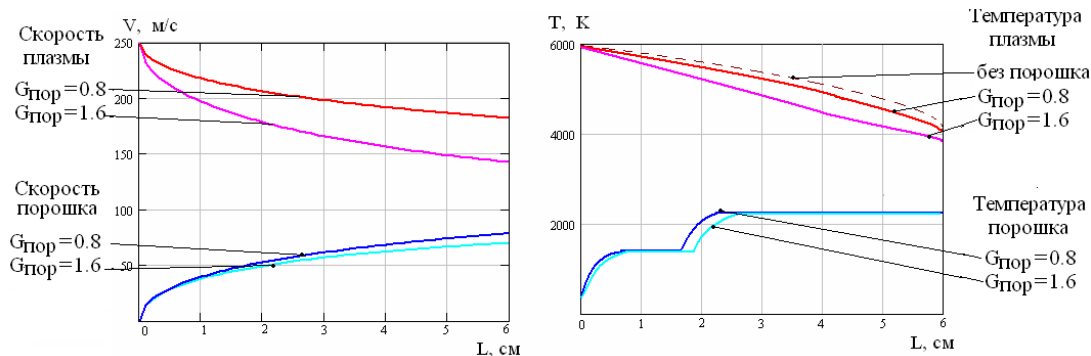
**Рис. 3.** Расчетное распределение температуры при различных значениях тока вызванного вольтодобавкой.  $I_{\text{вд}} = 0 \text{ А}$  (а),  $I_{\text{вд}} = 3 \text{ А}$  (б),  $I_{\text{вд}} = 6 \text{ А}$  (в),  $I_{\text{вд}} = 10 \text{ А}$  (г),

На основании полученных распределений температуры и скорости плазмы проведено математическое моделирование процесса нагрева и ускорения частиц порошка с учетом охлаждения и затормаживания плазменной струи, вызванного воздействием порошка, для различных вариантов материала порошка, различных режимов работы плазмотрона, при различных напряжениях вольтодобавки. На рис. 4. приведены результаты расчета скорости (а) и температуры (б) частиц порошка ПН85Ю15, а так же вызванное им изменение температуры и скорости плазмы.



**Рис. 4. Результаты расчета нагрева групп частиц без вольтодобавки при расходе порошка  $G=0.8$  г/с;  $G=1.6$  г/с**

На рис. 5 приведены аналогичные результаты при токе в струе плазмы  $I=10A$ .



**Рис. 5. Результаты расчета нагрева групп частиц при расходе порошка  $G=0.8$  г/с;  $G=1.6$  г/с. Ток в струе вызванный вольтодобавкой  $I=10$  А**

Из приведенных рисунков видно, что нагрев порошка при введении вольтодобавки происходит значительно быстрее, чем без нее, и, при прочих равных условиях, можно расплавить и нанести на подложку большее количество порошка.

### 3. Методика проведения экспериментальных исследований, позволяющая одновременно установить параметры, оказывающие наибольшее влияние на нагрев частиц порошка: скорость и температуру струи плазмы.

Известно, что при температурах плазмы ниже  $T_{пл} = 5000$  К применение оптических методов диагностики не представляется возможным. Это связано с многокомпонентностью воздушной плазмы и высокой степенью концентрации энергии. По этой причине, для измерения температуры и скорости применялась зондовая методика.

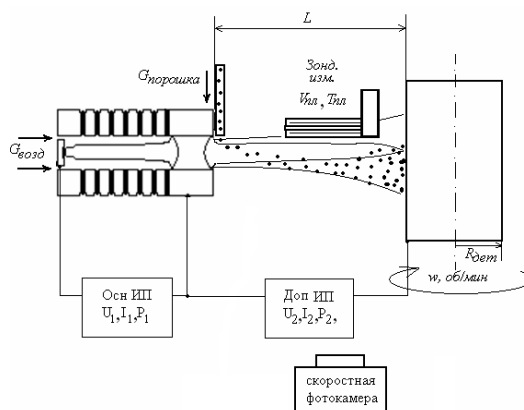
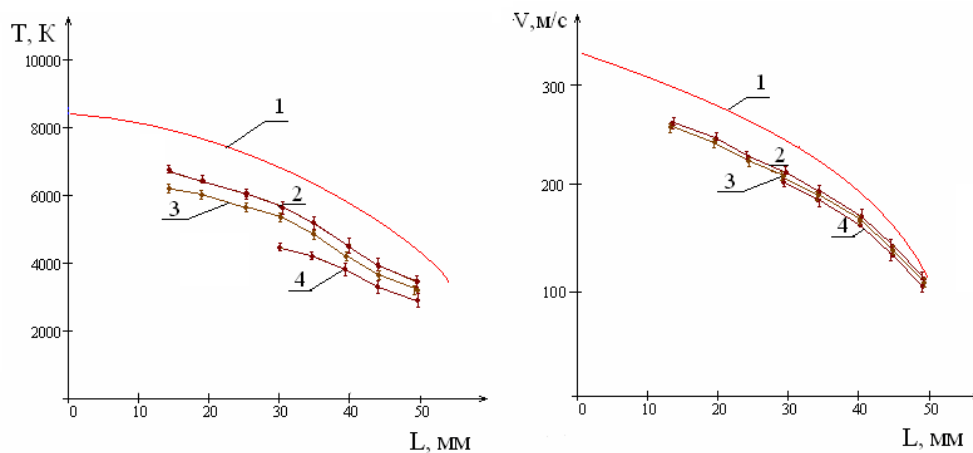


Рис.6. Принципиальная схема экспериментальной установки

Кроме того, процессы в плазменной струе характеризуются значительными градиентами основных величин, в том числе и температуры, что приводит к значительной погрешности при обработке экспериментальных результатов. Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на рис. 6.

Измерение энтальпии плазмы производилось по разнице тепловых потоков, воспринимаемых зондом в случае отбора газа через внутренний канал зонда и без отбора газа. При этом расход газа через канал зонда измерялся ротаметром с учетом поправки на разрежение, измеряемое манометром. Разница тепловых потоков определялась с помощью дифференциальной термопары, установленной на входе и выходе зонда. Измерение локальной скорости плазменной струи осуществлялось при работе зонда в режиме датчика полного напора, на основании результатов определения энтальпии в этой же точке по ранее приведенной методике.

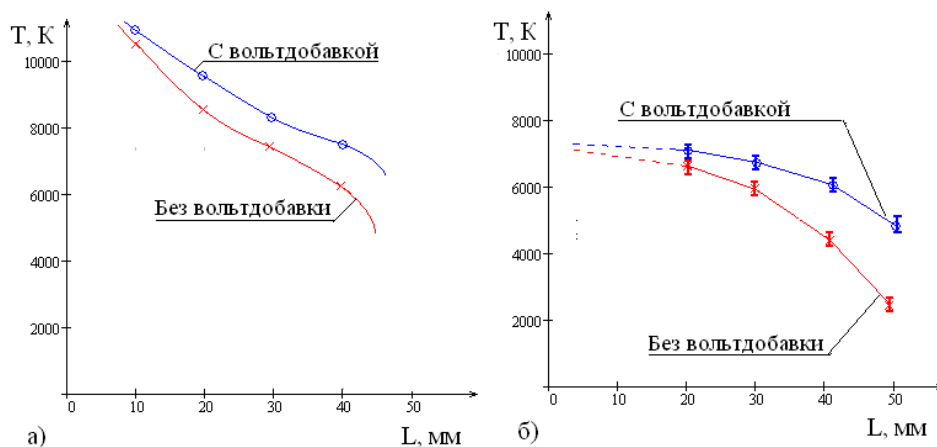
Скорость полета напыляемых частиц измерялась с помощью прибора ИССО-1, действие которого основано на механической развертке изображения траектории движущихся светящихся объектов (с помощью вращающегося перпендикулярно направлению движения частиц зеркала). Метод имеет определенные ограничения, связанные с тем, что объект (частица) должен иметь достаточно высокую температуру (и, тем самым, светимость), чтобы быть выявленным на фоне ярко светящейся зоны плазменной струи. Кроме того, измерение производится применительно к потоку частиц, имеющих различные скорости, и является усредненным для всего потока частиц.



**Рис. 7** Осевое распределение температуры и скорости в струе плазмы

- 1** – Расчетные значения температуры;
- 2** – Результаты измерения зондом с дополнительной теплоизоляцией;
- 3** – Результаты измерения поперечным зондом;
- 4** – Результаты измерения зондом Грея;

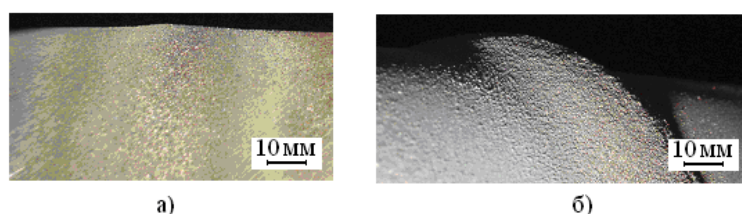
На рис. 7 приведены результаты измерения температуры и скорости плазмы, полученные с использованием различных зондов в сравнении с результатами расчетов. Наиболее близкие к расчетным результаты были получены при использовании специально разработанного зонда с дополнительной теплоизоляцией. Достаточно близкие результаты получены при использовании поперечнообтекаемого зонда. Результаты измерения скорости плазменной струи различались незначительно при использовании всех трех зондов.



**Рис.8.** Осевое распределение температуры струи плазмы, полученное в результате: математического моделирования (а) и зондовых измерений (б)

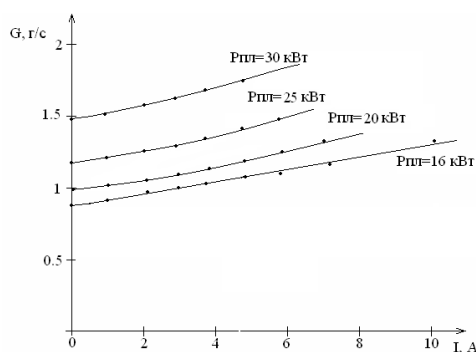
На рис. 8 показано отличие осевой температуры плазменной струи без вольтодобавки и с вольтодобавкой, обеспечивающей ток в струе плазмы  $I_{вд}=10$  А.

Так же была проведена экспериментальная проверка влияния вольтодобавки на производительность процесса. Нанесение покрытий осуществлялось при максимально возможном расходе напыляемого порошка. При очень большом расходе частицы слишком сильно охлаждают плазму и попадают на деталь, не достигнув температуры плавления.



**Рис.9.** Фотография образцов, напыленных с использованием (б) и без использования вольтодобавки (а)

Установлено, что нагрев порошкового материала ПН85Ю15 диаметром  $d = 50$  мкм в струе плазмотрона мощностью 16 кВт при токе дуги 150 А идет недостаточно эффективно при расходах порошка более  $G_{пор} = 0.8$  г/с: максимальная толщина нанесенного покрытия составила 0.8 мм. (рис 9.а.). С введением вольтодобавки обеспечивающей ток в струе плазмы  $I_{стр} = 5$  А максимальная толщина покрытия нанесенного за тоже время составляет 5 мм, максимальный расход порошка при котором образуется покрытие можно увеличить до  $G_{пор} = 1$  г/с (рис 9.б.)



**Рис. 10. Зависимость максимально возможного расхода порошка, наносимого на покрытие при напылении, от тока вольтодобавки и мощности плазмотрона.**

На рис. 10. показана зависимость максимально возможного расхода порошка, наносимого на покрытие при напылении, от тока вольтодобавки и мощности плазмотрона. Для всех полученных покрытий была проведена проверка пористости, микротвердости и содержания кислорода нанесенном покрытии. Качество полученного покрытия в данном диапазоне параметров изменялось незначительно.

### Заключение

В диссертации, представляющей собой научно-квалификационную работу, разработана электротехнология воздушно-плазменного нанесения покрытий плазмотроном с ВДСП.

1. Разработана методика расчета параметров струи плазмы с ВДСП.
2. В результате математического моделирования получены пространственные распределения температуры струи плазмы, аксиальной и радиальной составляющих скорости плазмы, давления плазменного потока и другие параметры плазмы в широких диапазонах тока основной дуги (110-250 А), различных расходах плазмообразующего газа (0.5-1.5 г/с) и различных значениях тока, вызванного влиянием вольтодобавки (0- 10 А)
3. Разработана методика расчета нагрева частиц порошка в струе плазмы, позволяющая учесть тепловые потери плазменной струи.
4. Определен диапазон значений (напряжение и ток) вольтодобавки, при которых происходит повышение производительности нанесения покрытий без ухудшения качества и свойств покрытий (значения пористости, микротвердости и содержание кислорода в нанесенном покрытии изменились в пределах 10%).

5. Разработана методика проведения экспериментальных исследований, позволяющая измерять наиболее важные параметры струи плазмы распределения температуры и аксиальной составляющей скорости струи плазмы.

6. Разработана методика, позволяющая повысить точность измерения температуры струи плазмы, при значительных градиентах температурного поля (до тысячи К на миллиметр) и относительно малых размерах струи плазмы (~15 мм), путем создания более точных измерительных зондов. Расхождение экспериментальных и расчетных результатов с учетом систематической погрешности не превышает 25%.

7. Повышена эффективность работы плазмотронов для нанесения покрытий на тела вращения за счет увеличения производительности процесса (на 30-40%) при фиксированном коэффициенте использования порошка и мощности плазмотрона. При сохранении производительности процесса вольтодобавка позволяет соответственно снизить мощность установки на 30 – 40 %.

#### **Основные публикации по теме диссертации**

##### *Публикации в изданиях рекомендованных перечнем ВАК России*

1. Плазменная технология нанесения декоративных покрытий В.Я.Фролов, Б.А. Юшин, И.С.Чуркин // *Металлообработка*, 2009, №1(49), с. 20 – 23.

2. Методика расчета плазменной струи загруженной мелкодисперсным порошком/ И.С. Чуркин, Ф.И. Шустов, С.Г. Зверев, В.Я. Фролов// *Сборник трудов*. Изд. СПбГПУ- 2010.– с. 135-137.

3. Моделирование факела плазмотрона для нагрева мелкодисперсных порошков/ В.Я. Фролов, В.А. Кархин, Д.В. Иванов, И.С. Чуркин// *Научно-технические ведомости СПбГПУ*- 2010.- №1 – с.246-255.

4. Чуркин И.С., Фролов В.Я.. Повышение производительности плазменно-дугового нанесения покрытий // *Сборник трудов*. Изд. СПбГПУ– 2011. – с.186-188.

5. Чуркин И.С. Воздушно-плазменное нанесение покрытий повышенной производительности.// *Научно-технические ведомости СПбГПУ*- 2011.- №3 – с.123-130.

*Публикации в других изданиях:*

6. Чуркин И.С. Шустов Ф.И./ Исследование факела плазмы воздушно-дугового плазмотрона для напыления с помощью водоохлаждаемого зонда// Сборник статей: XXXVI Неделя науки СПбГПУ., с. 65-66. Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ. 2008
7. Чуркин И.С. Шустов Ф.И., Зверев С. Г./ Методика расчета плазменной струи загруженной мелкодисперсным порошком// Сборник статей: XXXVII Неделя науки СПбГПУ, с. 65-66. Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ. 2009
8. Чуркин И.С., Фролов В.Я., Юшин Б.А. / Моделирование факела воздушного плазмотрона для нанесения покрытий. // Пленки и покрытия 2009: труды 9-й Международной конференции. – СПб: Изд-во СПбГПУ. – .2009.- С. 279-288
9. Чуркин И.С. Фролов В.Я./ Повышение производительности плазменно-дугового нанесения покрытий// Сборник статей: XXXIX Неделя науки СПбГПУ. с. 65-66. Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ. 2010
10. Фролов В.Я., Иванов Д. В., Чуркин И.С./ Моделирование плазменных процессов в дуговых плазмотронах с вольтдобавкой на струю плазмы// Сборник статей: Инновационная энергетика. II Всероссийская конференция. С.302- 306 Новосибирск. Изд. НГТУ
11. Чуркин И.С. Фролов В.Я./ Высокопроизводительные плазменные технологии нанесения покрытий на тела вращения// Сборник статей: Наука. Технологии. Инновации. Всероссийская конференция молодых ученых. с. 178-179. Новосибирск. Изд. НГТУ.
12. Чуркин И.С., Фролов В.Я/ Повышение производительности процесса плазменное дугового нанесения покрытий,// Пленки и покрытия 2011: труды 10й Международной конференции. – СПб: Изд-во СПбГПУ. – .2011.- С. 261-268
13. Churkin I.S. Improvement of the efficiency of an air plasma spraying technology //«XVIII Symposium on physics of switching arc», Brno university of technology, 2009.– p. 162-165.
14. Churkin I.S. Research and development of plasma technologies of spraying of coatings //«XIX Symposium on physics of switching arc» Brno university of technology, 2011.– p. 149-152.

В статьях, выполненных в соавторстве, личный вклад автора состоит в написании математических моделей, обработке и анализе экспериментальных данных, разработке методики экспериментальных исследований. В работах 2, 3 и 4 вклад автора составляет 70%, 50% и 70% соответственно. В остальных статьях вклад между авторами распределен равномерно.