II. ГЕНЕРАТОРЫ ПЛАЗМЫ, ЭЛЕКТРОННЫХ И ИОННЫХ ПУЧКОВ И ОБОРУДОВАНИЕ НА ИХ ОСНОВЕ

Генерация плазмы в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом для химико-термической обработки внутренней поверхности полостей протяжённой и сложной формы

Д.Ю. Игнатов, И.В. Лопатин, В.В. Денисов, О.В. Крысина, Ю.Х. Ахмадеев, Н.Н. Коваль*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, г.Томск, пр.Академический 2/3

* e-mail: danilabay29@ya.ru

DOI 10.31554/978-5-7925-0524-7-2018-65-69

Разработан метод обработки внутренних полостей протяжённых изделий криволинейной формы. Для генерации плазмы при низком давлении (0.5-1 Па) использовалась двухступенчатая система, где основной несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом генерировал рабочую плазму в обрабатываемой полости, а плазма вспомогательного разряда, создаваемая плазмогенератором «ПИНК», являлась источником электронов для стабильного зажигания и горения основного разряда. В данной системе были исследованы основные характеристики несамостоятельного тлеющего разряда, найдены режимы горения разряда с наилучшей однородностью распределения температуры по длине протяжённого трубопровода. Проведён процесс азотирования и получен модифицированный слой толщиной до 64 мкм с увеличенной более чем в 2 раза твёрдостью на поверхности. Показана принципиальная возможность генерации плазмы несамостоятельного тлеющего разряда в полости протяжённых изделий криволинейной формы, с достижением хорошего распределения однородности температуры по длине полости.

Введение

Модификация поверхности ионно-плазменными методами активно развивается и изучается в последнее время в науке и технике [1, 2]. Для этой цели создаются газоразрядные системы для генерации низкотемпературной плазмы. Задача модификации поверхности металлических изделий ионно-плазменными методами успешно решается при давлениях (0.6-1) Па [3]. Однако, обработка внутренних поверхностей полостей диаметром до ~30 мм в таких разрядных системах остается технологически сложно реализуемой, вследствие образования катодного слоя (достигающего 10 мм и более), и препятствующего распространению плазмы внутри протяжённой полости. Существуют газоразрядные системы [4, 5], которые позволяют проводить обработку внутренней поверхности протяжённых изделий в плазме аномального тлеющего

разряда. Недостаток данных систем в том, что обрабатываемые изделия должны иметь только прямолинейную форму из-за коаксиально расположенного нитевидного анода, который закрепляется на торцах цилиндрических полостей. Также существуют методы [6] генерации плазмы внутри полости при наружном расположении анода. В данных системах цилиндрическая полость является полым катодом тлеющего либо дугового разряда, горящего при давлениях (10-100) Па, а анодом является электрод, расположенный вблизи торца полости. В такой разрядной системе всегда наблюдается локализация разряда, преимущественно, на небольшом расстоянии от торца полости, приближенного к аноду. Такое горение разряда создаёт температурный градиент, что приводит к ограничению длины изделия, которая составляет, в среднем, не более 10 внутренних диаметров полого катода.

Учитывая все особенности горения разряда в протяжённой полости, которая является полым катодом и имеющихся способов обработки, была предложена двухступенчатая система генерации плазмы с внешней инъекцией электронов из плазмы вспомогательного разряда. Предложенная система позволяет производить ионно-плазменную обработку внутренней поверхности протяжённых изделий криволинейной формы, характерная длина которых составляет 10 внутренних диаметров и более.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальные исследования основных характеристик несамостоятельного тлеющего разряда и процессы азотирования внутренней полости трубопровода проводились на вакуумной установке ННВ-6.6-И1. Откачка камеры производилась турбомолекулярным насосом со скоростью откачки 500 л/с и форвакуумным насосом со скоростью 20 л/с. Данная система откачки позволяла получать предельный вакуум в камере до $3.5 \cdot 10^{-3}$ Па.

Для проведения экспериментов по генерации плазмы в протяжённых прямолинейных и криволинейных полостях в камере на специальном столике устанавливался цилиндрический полый электрод 1 (рис. 1) с внутренним диаметром 28 мм и длиной 335 мм. Внутренняя поверхность электрода являлась полым катодом несамостоятельного тлеющего разряда, а анодом являлся вольфрамовый стержень 2, введённый через торец трубопровода на глубину 50 мм и закреплённый на держателе через который подавался рабочий газ азот. На противоположном торце трубопровода располагалась вольфрамовая сетка 3 с оптической прозрачностью около 0.7, которая вместе с внешней поверхностью электрода являлась анодом для вспомогательного разряда плазмогенератора с комбинированный накаливаемым и полым катодом «ПИНК» [7, 8]. Инжекция электронов осуществлялась

из плазмы вспомогательного разряда через вольфрамовую сетку 3. Электроны, пролетая сквозь сетку, попадают под действие электрического поля основного разряда и ускоряются до энергии, соответствующей напряжению горения тлеющего разряда. Так как внутренняя поверхность электрода 1 является катодом основного разряда образуя электростатическую ловушку, то ускоренные электроны начинают осциллировать в полости до потери своей энергии на неупругих столкновениях с молекулами и атомами рабочего газа либо уходят на анод.

Использование плазмогенератора «ПИНК» обусловлено возможностью горения такого разряда и генерации плазмы в широком диапазоне давлений (0.05-2 Па), а также возможностью плавной регулировки разрядного тока от 1 до 100 А. В экспериментах по исследованию основных характеристик тлеющего разряда и проведению процессов по ионно-плазменной обработке в полый электрод 1 производилась подача азота, а для более стабильного горения вспомогательного разряда в плазмогенератор «ПИНК» производился напуск аргона.

Рис. 1. Схема двухступенчатой разрядной системы.

Электрическое питание несамостоятельного тлеющего разряда осуществлялось от источника с

напряжением до 1000 В и током до 10 А с функцией стабилизации тока и напряжения. Электрическое питание плазмогенератора «ПИНК» осуществлялось от блока питания разряда, обеспечивающего ток разряда до 200 А при напряжении холостого хода 75 В, накал вольфрамового термокатода осуществлялся блоком питания накала, обеспечивающего переменный ток до 150 А при напряжении до 12 В.

В данной двухразрядной системе были исследованы основные характеристики несамостоятельного тлеющего разряда, для выявления основных факторов, оказывающих влияние на однородность горения разряда внутри протяжённой прямолинейной и криволинейной полости.

Результаты экспериментов и их обсуждение

На графике ВАХ (рис. 2) при увеличении напряжения происходит рост тока, который объясняется увеличением количества ионизаций, производимых электронами, которые ускоряются под воздействием электрического поля в катодном слое тлеющего разряда.

Рис. 2. Зависимость тока тлеющего разряда $I_{\text{тл}}$ от напряжения его горения $U_{\text{тл}}$, при давлении $p_{\text{смесь:Ar, N}_2} = 0.6 \text{ Па}$ и токе вспомогательного разряда $I_{\text{пнк}} = 6.5 \text{ А}$.

Рост тока в области напряжений до ~70 В может быть связан с расширением анодного слоя и, соответственно,

перемещения границы анодного слоя в область более плотной вспомогательной плазмы, проникающей внутрь полости через сетку с ячейками $\sim 5 \times 5 \text{ мм}$. Параллельно с этим идёт образование анодной плазмы вблизи анода. Перегиб ВАХ свидетельствует о том, что граница вспомогательной плазмы вышла за пределы полости в объём вакуумной камеры, где градиент концентрации вспомогательной плазмы гораздо меньше и рост тока эмиссии связан с увеличением радиуса слоя. При повышении напряжения до ~150 В визуально наблюдался разогрев полого электрода только вблизи анода, что может быть связано с образованием анодной плазмы и разогревом анода. При дальнейшем увеличении напряжения до 200 В разогрев полого электрода начинался и со стороны вольфрамовой сетки, где происходит инжекция электронов. Это позволяет предположить, что при более высоком напряжении инжектированные из плазмы вспомогательного разряда электроны создают достаточную для разогрева стенок концентрацию плазмы преимущественно на торце полости, через которую производится инжекция.

На графике зависимости тока тлеющего разряда от давления газовой смеси (Ar+N₂) (рис. 3) наблюдался максимум в области $\approx 0.6 \text{ Па}$, что, вероятно, соответствует максимальной эффективности работы полого катода [6].

Рис. 3. Зависимость тока тлеющего разряда $I_{\text{тл}}$ от давления $p_{\text{смесь:Ar, N}_2}$, при постоянном напряжении тлеющего разряда $U_{\text{тл}} = 200 \text{ В}$, и постоянном токе вспомогательного разряда $I_{\text{пнк}} = 6 \text{ А}$.

При этом давлении наблюдалась максимальная однородность свечения разогретых стенок полого электрода по его длине, что также может свидетельствовать о максимальной эффективности работы полого катода при данном соотношении геометрических размеров полого катода, давления в полости и энергии электронов.

График зависимости тока тлеющего разряда от тока вспомогательного разряда плазмогенератора «ПИНК» (рис.4) имеет линейный характер. Такое поведение зависимости объясняется тем, что ток электронов в основном разряде пропорционален сумме тока электронов из вспомогательного разряда и тока электронов, образованных при вторичной ионно-электронной эмиссии.

Рис. 4. Зависимость тока тлеющего разряда $I_{\text{тл}}$ от тока вспомогательного разряда $I_{\text{пнк}}$ при постоянном напряжении тлеющего разряда $U_{\text{тл}}=200 \text{ В}$ и давлении $p(\text{смесь: Ag, N}_2) = 0.6 \text{ Па}$.

Следующая серия экспериментов была посвящена азотированию в данной разрядной системе. Давление при проведении азотирования было выбрано исходя из полученного при исследовании газовых характеристик максимума и составило 0.6 Па , напряжение тлеющего разряда выставлялось такое, при котором достигалась максимальная однородность теплового свечения по всей длине трубопровода и составило 230 В , при токе 7 А , а ток вспомогательного разряда подбирался таким, который позволил визуально оценивать по тепловому излучению равномерность нагрева трубопровода и составил 5.1 А . Средняя плотность ионного тока на внутреннюю

поверхность трубопровода по оценкам составила $j_{\text{ион}} = 20 \text{ мА/см}^2$.

Для оценки эффективности азотирования по длине полого электрода были установлены три образца в виде колец с внутренним диаметром равным диаметру обрабатываемой трубы и высотой 5 мм . Толщина образцов равнялась толщине стенки полого электрода и составляла 1 мм . Образцы располагались на торцах полого электрода и в середине. Процесс азотирования проходил в течение 1.5 часов . В результате эксперимента на образце, расположенном возле сетки был получен модифицированный слой толщиной 34 мкм , в середине - 43 мкм , а возле анода - 63 мкм . Твёрдость на поверхности всех образцов увеличилась в среднем в 2.6 раза (с 2.6 ГПа до 6.9 ГПа).

Также был проведён эксперимент по генерации плазмы в полом электроде криволинейной формы (рис. 5).

Рис. 5. Фотография криволинейного полого электрода.

По полученной фотографии можно сделать предварительные оценки по достаточно равномерному распределению температуры, а, следовательно, и равномерной генерации плазмы внутри полости криволинейной формы. Параметры горения разряда составили: $p(\text{N}_2) = 0.6 \text{ Па}$, $U_{\text{тл}} = 250 \text{ В}$, $I_{\text{тл}} = 2 \text{ А}$, $I_{\text{пнк}} = 3.1 \text{ А}$.

Заключение

Разработана и создана система для генерации плазмы на основе несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом и внешней инжекцией электронов из плазмы вспомогательного разряда с целью модификации внутренней поверхности протяжённых изделий прямолинейной и криволинейной формы при давлениях горения разрядов (0.5-1) Па.

Изучены основные параметры несамостоятельного тлеющего разряда. Изучены ВАХ основного разряда, изучено влияние изменения газовых параметров на ток разряда, исследованы эмиссионные характеристики плазмы вспомогательного разряда «ПИНК». На основе полученных результатов, были выявлены факторы, оказывающие влияния на однородность горения разряда по всей длине прямолинейной и криволинейной протяжённой полости.

Получены результаты исследования характеристик модифицированного слоя образцов, обработанных в плазме несамостоятельного тлеющего разряда.

Полученные результаты позволяют продолжить дальнейшее изучение параметров разряда и плазмы, а также совершенствование уже полученных результатов. К моменту написания статьи запланировано использование пирометра для точного измерения температуры обрабатываемых изделий, а также планируется провести зондовые исследования распределения параметров плазмы по всей длине обрабатываемых изделий.

*Работа поддержана грантом
Российского научного фонда (проект №14-29-00091).*

Литература

[1]. Арзамасов Б.Н. Ионная химико-термическая обработка сплавов: Монография / Б.Н. Арзамасов, А.Г. Братухин, Ю.С. Елисеев, Т.А. Панайоти. - М.: Изд. МГТУ им Баумана, 1999. - 400 с.

[2]. Берлин Е.В. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей: Монография / Е.В. Берлин, Н.Н.

Коваль, Л.А. Сейдман. – М: Техносфера, 2012. – 464 с.

[3]. Винтизенко, Л.Г., Григорьев С.В., Коваль Н.Н., Толкачев В.С., Лопатин И.В., Щанин П.М. Дуговые разряды низкого давления с полым катодом и их применение в генераторах плазмы и источниках заряженных частиц // Изв. Вузов. Физика. - 2001. - Т. 44. - № 9. - С. 28-35.

[4]. Быстрик В. А., Каталов Р. В., Прозоров А. Г., Черников Ю. П., Подшивалов А. В., Быстрик Е. А., Бычков Н. А. Устройство для обработки внутренней поверхности трубы // Патент России № 2102524. 1998.

[5]. Гончаренко И.М., Окс Е.М., Чагин А.А. Способ вакуумной обработки внутренней поверхности труб // Патент России № 2039845, 1995.

[6]. Москалев Б.И. Разряд с полым катодом: М: Энергия, 1969 – 184 с.

[7]. Борисов Д.П., Коваль Н.Н., Щанин П.М. Устройство для создания низкотемпературной газоразрядной плазмы // Патент России 2116707, 1998.

[8]. Борисов Д.П., Коваль Н.Н., Щанин П.М. Генерация объемной плазмы дуговым разрядом с накаливаемым катодом // Изв. Вузов. Физика. - 1994. - Т.37. - № 3. - С.115-120.