# МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 621

# Экспериментальное исследование энергетических и динамических характеристик прототипа импульсного технологического микроплазмотрона атмосферного давления

**Малых П.С.**, студент Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Плазменные энергетические установки»

Новосёлов И.Е., студент Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Плазменные энергетические установки»

Буякина А.А., студент Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Материаловедение»

Научный руководитель: Камруков А.С., к.т.н., доцент Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, <u>kamrukov@bmstu.ru</u>

### Введение

Высокоэнергетичные импульсные плазменные потоки являются перспективным инструментом для модификации физико-химических свойств поверхностей конструкционных материалов с целью повышения их механической и коррозионной стойкости [1]. Использование импульсных плазменных потоков позволяет добиться эффективности обработки, сравнимой с лазерными методами модификации [2].

Конечные параметры обработанной поверхности (толщина модифицированного слоя, микроструктура, стойкость к износу и коррозии и т.д.) зависят от материала поверхности, её исходного состояния, а также от длительности воздействия и энергетических параметров плазменного потока.

В настоящее время разработка новых, альтернативных лазерному, методов модификации, сочетающих преимущества лазерных методов и компенсирующие их недостатки, ведётся в нескольких направлениях.

Одним из методов является взаимодействие импульсных плазменных потоков с поверхностью образца в вакууме. В работе [3] представлены экспериментальные исследования абляционного (эрозионного) импульсного плазменного ускорителя.

Показаны возможности термического упрочнения поверхностного слоя со значительным повышением его твёрдости, а также имплантации примеси.

Однако с точки зрения технологичности более перспективно проведение обработки в атмосферном воздухе, а также в среде различных рабочих газов при нормальном давлении.

главных задач при разработке импульсных технологических Одной из плазмотронов является формирование азимутально однородного плазменного потока. Данная проблема практически не возникает при инициации разряда в квазивакуумных условиях, однако существенна при организации импульсного разряда в нормальных атмосферных условиях. В настоящее время известны несколько различных способов, частично или полностью решающие данную проблему. В работе [2] данная задача решается путём введения в разрядный промежуток продуктов детонации взрывной газовой смеси. Другим возможным вариантом является предварительная ионизация межэлектродной области с помощью нескольких плазмотронов непрерывного действия[4].Подобное решение предлагается в работе [3], с тем отличием, что вспомогательные плазмотроны являются импульсными. Альтернативным вариантом является уменьшение геометрических размеров импульсного генератора плазмы при сохранении удельной энергии, приходящейся на площадь поперечного сечения его сопла. Азимутально однородная структура плазменного потока в таком микроплазмотроне формируется за промежутки времени, значительно меньшие характерных времён нарастания токового импульса.

Целью настоящей работы являлась разработка лабораторного прототипа импульсного микроплазмотрона на основе сильноточного разряда магнитоплазменного компрессора (МПК) в воздухе, экспериментальное определение и сравнение энергетических и динамических характеристик плазменного потока в режимах с фиксированной запасаемой электрической энергией, но различными характерными временами энерговклада.

## Экспериментальная установка

На рисунке 1 представлена конструктивная схема разработанного прототипа импульсного технологического плазмотрона атмосферного давления.



Рис. 1. Основной МПК в разрезе:

1 – внешний электрод; 2 –изолятор (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); 3 – изолятор (капролон);

4 – упорная гайка; 5 – втулка; 6 – цанга фиксирующая;

7 – прижимная гайка;8 – центральный электрод; 9 – коническая втулка;

10 – цанга токоподвода; 11 – гайка

Микроплазмотрон создан на базе импульсного коаксиального электромагнитного ускорителя плазмы, работающего в режиме МГД-компрессии потока – магнитоплазменного компрессора (МПК). Внешний цилиндрический электрод имеет наружный диаметр 18 мм и внутренний 10 мм (1), изготовлен из вольфрам-медного сплава ВДПМ. Центральный электрод (8)(катод в первом полупериоде) имеет диаметр 4 мм,

выполнен из вольфрама. В качестве разделяющего диэлектрика (2) используется керамическая вставка из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Токоподвод к центральному электроду осуществляется с помощью цанги (10), которая обжимается конической втулкой (9) и гайкой (11). Фиксацию центрального электрода в осевом направлении обеспечивает цанга (6), прижимаемая гайкой (7). Для осуществления сборки втулка (5) выполнена разрезной.

Схема разрядного контура представлена на рисунке 2. Питание основного МПК (3) осуществляется от конденсаторной батареи (2), собранной из конденсаторов К-75-40а ёмкостью 100 мкФ каждый и максимальным рабочим напряжением 3000 В. Коммутация межэлектродного промежутка основного МПК осуществляется инжекцией плазмы от вспомогательного МПК (4).Разряд во вспомогательном контуре инициируется с помощью импульсного повышающего трансформатора (7). Сопротивление (5) служит для разделения контуров основного и вспомогательного МПК. Батарея (6) является источником питания вспомогательного МПК. Зарядка накопителей энергии (2) и (6) осуществляется с помощью общего высоковольтного источника постоянного тока (1).

Для измерения импульсных разрядных токов использовался пояс Роговского, а для измерения импульсных напряжений – частотно-компенсированный делитель напряжения. Падение напряжения измерялось на батарее(2).



Рис. 2. Схема разрядного контура:

1 – высоковольтный источник постоянного тока;

2 – батарея конденсаторов (300 мкФ – режим №1, 2700 мкФ – режим №2);

3 – основной магнитоплазменный компрессор (МПК);

4 – вспомогательный МПК; 5 – разделительное сопротивление;

6 – батарея конденсаторов поджига (17 мкФ – режим №1, 100 мкФ – режим №2);

7 - импульсный повышающий трансформатор; 8 – блок управления

В экспериментах сравнивались два режима работы: режим №1 – ёмкость конденсаторной батареи составляла 300 мкФ, разрядное напряжение – 3 кВ; режим №2– ёмкость конденсаторной батареи - 2700 мкФ, разрядное напряжение – 1 кВ. Запасаемая энергия составляла 1350 Дж для обоих режимов.

Определение динамических параметров плазменного образования проводилось при помощи скоростной цифровой камеры «ВидеоСпринт».

Для измерения спектральных потоков излучения использовался четырёхканальный спектрально-измерительный комплекс «Спектр-01К». Данный прибор регистрирует потоки излучения в УФ-области (270 ± 20 нм), в видимой области (430 ±50 нм и 555 ±50 нм) и в ближней ИК-области (1000 ± 70 нм).

Регистрация сигналов с пояса Роговского, делителя напряжения и комплекса «Спектр-01К» осуществлялась при помощи цифрового двухканального осциллографа «*Tektronix TDS 1002B*».

#### Экспериментальные исследования

На рисунках 3а и 3б приведены осциллограммы производной тока, на рисунках 4а и 46 – осциллограммы напряжения на конденсаторной батарее.



Рис. 3. Первичные сигналы с пояса Роговского: а) режим № 1; б) режим № 2



Рис. 4. Первичные сигналы с делителя напряжения: а) режим № 1; б) режим № 2

Методика обработки сигналов с пояса Роговского заключается в интегрировании числового ряда исходных значений сигнала и нормировке по заряду при напряжении на конденсаторной батарее, равном нулю.

На рисунке 5 приведены зависимости токовых импульсов от нормированного на длительность первого полупериода тока времени ( $\tau = t/(T/2)$ , T/2 – полупериод разряда). Основные технические параметры разрядных контуров представлены в таблице 1.



Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038, ISSN 2307-

Методика расчёта характеристик колебательного контура представлена в [5]. Результаты обработки данных сведены в таблицу 1.

Таблица 1

	Режим №1	Режим №2
Длительность первого полупериода, мкс	48	225
Время достижения максимума тока, мкс	22	96
Величина максимума тока, кА	51	26
Характерное время энерговклада, мкс	39	150
Доля энергии, выделяемой в первом полупериоде тока, %	60	78
Индуктивность разрядного контура, мкГн	0,72	2,21
Суммарное сопротивление контура, мОм	14	13
Пиковая электрическая мощность, МВт	35	9

Основные параметры разрядных контуров

Как следует из представленных данных, разрядный ток носит колебательный характер с достаточно сильным затуханием. Максимумы токов достигаются на 22 мкс для режима № 1 и 96 мкс для режима № 2 и составляют 51 кА и 26 кА соответственно. Длительности первых полупериодов — 48 мкс и 225 мкс. В первых полупериодах разрядов в контурах выделяется 60 % (режим № 1) и 78 % (режим № 2) энергии, запасенной в конденсаторных батареях. Пиковая электрическая мощность разрядных контуров составляет  $P_{max1} = 35 \text{ MBT}$  и  $P_{max2} = 9 \text{ MBT}$ . Тогда характерное время энерговклада в режиме № 1 – 39 мкс, в режиме № 2 – 150 мкс.

Динамические характеристики плазменных потоков определялись с помощью скоростной видеосъемки процесса развития разряда в режиме квазищелевой развертки. Максимальная частота регистрации кадров камеры «ВидеоСпринт» составляет 250000 кадров/с при высоте кадра в 2 пикселя и его ширине в 1280 пикселей. Для снижения интенсивности излучения, приходящего на ПЗС-матрицу, применялись нейтральные светофильтры НС-7, НС-8 и НС-9. Характерные временные развёртки плазменных потоков для исследуемых режимов МПК представлены на рисунке 6.



Рис. 6. Характерные временные развёртки плазменной струи МПК: а – режим № 1; б – режим № 2

Результат обработки представлен на рисунке 7. Практический интерес представляют первые токовые полупериоды, так как они характеризуются наибольшим энерговыделением в контурах.



Рис. 7.Зависимости осевых координат (x<sub>i</sub>) и скоростей плазменного фронта (V<sub>xi</sub>) от безразмерного времени

В обоих режимах максимумы скоростей достигаются на временных промежутках (0,1..0,2)\*Т/2 и составляют 2,6..3,1 км/с и 1,3 км/с для первого и второго режимов соответственно. Неточность определения максимума скорости в первом режиме объясняется небольшим набором координат плазменного фронта ввиду малого времени токового разряда (48 мкс первого полупериода) при минимальном кадровом периоде камеры 4 мкс, что отражается на рисунке ба. Максимальные координаты фронтов составляют 64 мм и 128 мм. Таким образом, пиковая скорость в режиме № 1 приблизительно в два раза больше, чем в режиме № 2 при вдвое меньшем выбеге плазменного фронта. Средние скорости фронтов до момента максимума токового импульса составляют 2,3 км/с и 1,0 км/с для режимов № 1 и № 2 соответственно. Результаты обработки сведены в таблицу 2.

Таблица 2

	Режим №1	Режим №2
Координата отхода фронта к моменту максимума тока, мм	47	111
Максимум скорости фронта, км/с	2,63,1	1,3
Средняя скорость фронтадо момента максимума тока, км/с	2,3	1,0

Основные динамические параметры плазменных потоков

Спектрально-энергетические характеристики МПК измерялись в нескольких вариантах: свободного расширения и радиально ограниченного плазменного потока.

В случае свободного расширения плазменной струи МПК определяли интегральные энергомощностные характеристики излучения.

На рисунках 8а и 8б представлены характерные осциллограммы сигналов с комплекса «Спектр-01К», зарегистрированные на длине волны 270 нм.



Методика обработки сигналов с фотоприёмников описана в [4]. На рисунках 9 и 10 приведены энергомощностные характеристики излучения плазменного потока.



Рис. 9. Спектры излучения в момент максимума тока и интегральные по спектру мощности: 1 – режим № 1; 2 – режим № 2



Рис. 10. Энергетический спектр излучения и интегральная по спектру энергия излучения: 1 – режим № 1; 2 – режим № 2

Для режима №1 интегральная по спектру мощность излучения составляет 110 кВт/ср, интегральная по спектру энергия излучения – 6,3 Дж/ср. Эффективное время излучения составляет порядка 60 мкс. Для режима №2 интегральная по спектру мощность излучения составляет 40 кВт/ср, интегральная по спектру энергия излучения – 6 Дж/ср. Эффективное время излучения составляет порядка 150 мкс.

Практический интерес представляет определение яркостных температур в момент максимума излучения. Для этого поток плазмы радиально ограничивался цилиндрической насадкой, внутренний диаметр которой равен 14 мм. Таким образом, зная размер тела свечения и измеряя спектральную силу излучения, можно корректно определить яркостную температуру плазменного фронта. Характерные осциллограммы сигналов для радиально ограниченного плазменного потока представлены на рисунке 11.



а – режим № 1; б – режим № 2

На рисунке 12 представлены яркостные температуры плазменной струи на различных длинах волн для режима №1.





Пунктирная линия — 270 нм, точечная линия — 430 нм, штрихпунктирная линия — 555 нм, сплошная линия — 1000 нм

В момент, близкий к максимуму тока ( $\tau_m=22$  мкс), яркостные температуры на различных длинах волн достаточно близки, что позволяет принять их усреднённое значение за эффективную температуру излучения плазмы.

Зависимость усреднённых по длинам волн яркостных температур от времени, нормированного на полупериод токового импульса, приведена на рисунке 13.

Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038, ISSN 2307-



1- режим № 1; 2 – режим № 2

Для режима № 1 в момент максимума тока спектр излучения плазмы описывается излучением абсолютно черного тела температурой порядка 13500 К. Соответственно, плотность мощности излучения составляет 190 кВт/см<sup>2</sup>. Аналогичные измерения для режима №2 дают значения усреднённой яркостной температуры в момент максимума тока порядка 9500 К. Соответственно, плотность мощности радиационного потока составляет 57 кВт/см<sup>2</sup>.

С целью изучения микроструктуры модифицированного слоя был проведён металлографический анализ образцов стали СтЗ, облучённых в режиме № 2, и измерена их микротвёрдость. Обработка проводилась одним импульсом с расстояния от среза сопла 5 мм. Микрошлиф облучённого образца приведён на рисунке 14.

Из рисунка14видно, что в модифицированном слое можно выделить две характерные зоны (сверху—вниз): поверхностный модифицированный слой толщиной 15 мкм и слой толщиной ~ 15 ÷ 20 мкм. В нижнем подслое, как и в исходном состоянии, фиксируются две структурные составляющие, однако вместо тёмного перлита имеет место структура, схожая с поверхностным модифицированным слоем.

Модифицированный поверхностный слой по своей структуре является мартенситом, это также косвенно подтверждается твёрдостью полученного слоя (порядка 700 HV; в исходном состоянии твердость составляла 100...200 HV).



Рис. 14. Микроструктура стали Ст3 в результате плазменной модификации в режиме №2, увеличение 200Х

Модифицированный подслой подвергался неполной закалке. Это предположение можно обосновать следующим образом. Данный участок поверхности был разогрет до температуры двухфазной области аустенитно-ферритной. Аустенит при резком охлаждении переходил в мартенсит, а феррит оставался в структуре без изменений.

### Заключение

В результате проведённых исследований разработан экспериментальный технологический микроплазмотрон на основе сильноточного импульсного разряда магнитоплазменного компрессора в атмосферном воздухе и определены основные энергомощностные, термодинамические и временные характеристики процессов воздействия импульсных плазменных потоков на конструкционные материалы.

Выполнены эксперименты по облучению импульсными плазменными потоками образцов из стали марки Ст3,проведён микроструктурный анализ плазменномодифицированных поверхностей. Показано, что обработка конструкционной стали Ст3 импульсными плазменными потоками МПК приводит к увеличению микротвердости поверхности в несколько раз. Для более детального изучения влияния энергомощностных характеристик плазменного потока на свойства модифицированного слоя необходимо проведение дальнейших исследований.

# Список литературы

- 1. Денисов Е.И., Лушников Е.А. Экспериментальное исследование энергетических характеристик импульсного технологического плазмотрона // Молодежный научнотехнический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 8. Режим доступа: <u>http://sntbul.bmstu.ru/doc/466600.html</u> (дата обращения 22.05.2014).
- 2. Тюрин Ю.М., Жадкевич М.Л. Плазменные упрочняющие технологии. Киев: Наукова Думка. 2008. 215 с.
- 3. Полюхович И.А., Лушников Е.А. Экспериментальное исследование энергетических и характеристик импульсного динамических технологического плазмотрона атмосферного давления // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Электрон. 2013. № 3. Баумана. журн. Режим доступа: http://sntbul.bmstu.ru/doc/563704.html (дата обращения 22.05.2014).
- Импульсно-периодический плазмотрон: а.с.2343651 РФ / Чивель Ю.А., Минько Д.В., Кузнечик О.О., Никончук И.С. Заявл.13.06.2007; опубл.10.01.2009.
- Батыгин Ю.В., Сериков Г.С., Чаплыгин Е.А. Численная обработка результатов измерения импульсных токов поясом Роговского // Автомобильный транспорт. 2009. № 25. С. 194-199.
- 6. Камруков А.С., Кулебякина А.И. Инженерные методы расчета импульсных ксеноновых ламп. М.: ООО НИЦ «Инженер», 2010. 220 с.