МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

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

УДК 533.9.03+621.793

Экспериментальное исследование энергетических характеристик импульсного технологического плазмотрона

Денисов Е.И., Лушников Е.А.

студент, кафедра «Плазменные энергетические установки»

Научный руководитель: Камруков А.С., к. т. н., доцент кафедры «Плазменные энергетические установки»

> МГТУ им. Н.Э. Баумана <u>Denisov696@gmail.com</u> Lushnikov-EA@yandex.ru

Введение

Проведённые патентные исследования и информационный поиск показали актуальность и перспективность использования импульсных плазмодинамических процессов модификации физико-химических свойств поверхностей для конструкционных материалов, приводящей к улучшению механических антикоррозионных свойств. По эффективности обработки металлической поверхности инструмента и деталей машин, плазменные технологии не уступают лазерным. Наиболее значимый технический результат и наибольшее количество вариантов практического применения обеспечивают технические решения, основанные на использовании ударносжатой плазмы, при этом наиболее перспективным примером технической реализации устройств для получения ударносжатой плазмы являются устройства, основанные на плазмодинамическом разряде магнитоплазменного компрессора (МПК).

Целью настоящей работы являлась разработка лабораторного образца (прототипа) импульсного технологического плазмотрона на основе сильноточного разряда магнитоплазменного компрессора в воздухе и измерение его основных энергетических и спектральных характеристик.

Состав и структурная схема экспериментального технологического стенда

Блок-схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1.

Питание МПК (поз. 7) осуществляется от конденсаторной батареи варьируемой ёмкости и напряжения (поз. 5). Конденсаторная батарея включает в себя 30 конденсаторов типа К-75-40a, каждый из которых имеет емкость 100 мкФ и максимальное зарядное напряжение 3000 В. Используя параллельное и параллельнопоследовательное соединение конденсаторов, можно изменять суммарную ёмкость батареи до 3000 мкФ, а напряжение до 5 кВ. Диапазон максимальных запасаемых энергий в емкостном накопителе – 13500 Дж при зарядном напряжении 3 кВ и 9400 Дж при напряжении 5 кВ.

Зарядка конденсаторной батареи осуществляется от высоковольтного источника постоянного тока (поз. 1). Регулировка величины выходного напряжения в диапазоне 0...5000 В осуществляется при помощи лабораторного автотрансформатора, контроль -

при помощи киловольтметра (поз. 2). Для инициирования разряда МПК в атмосферном воздухе используется специальная система поджига, которая состоит из генератора высоковольтных импульсов (поз. 8) и генератора формирующих импульсов (поз. 9), задающего форму инициирующего импульса и посылающего сигнал синхронизации на диагностическое оборудование.

Для измерения импульсных разрядных токов используется калиброванный измеритель типа пояса Роговского с интегрирующими цепочками (поз. 6), а для измерения импульсных напряжений применяются скомпенсированные делители напряжения. При этом одновременно измеряются падения напряжения на конденсаторных батареях (поз. 3) и на плазменной нагрузке в процессе всего разряда (поз. 4).

Измерение спектральных потоков излучения в УФ, видимой и ближней ИК областях спектра проводится при помощи калиброванных по эталонным источникам фотоэлектрических приемников излучения со специальными светофильтрами, вырезающими достаточно узкие спектральные интервалы (спектрально-измерительные комплексы типа «Спектр-01К», «Спектр-02» (поз. 12, 13)). Измерение яркостных температур излучения в различных областях спектра проводится с использованием оптических схем и измерительных приборов (фотоэлементов), фиксирующих размеры излучающей области плазменного образования и спектральный диапазон (поз. 18, 25, 26).

Для регистрации спектрального распределения энергии излучения и анализа излучающих компонент плазмы применяется цифровой спектрометр с ПЗС- матрицей (линейкой) «Solar TII» (поз. 17).



 Высоковольтный источник постоянного тока; 2 - Киловольтметр; 3, 4 - Частотноскомпенсированный делитель напряжения; 5 - Конденсаторная батарея; 6 - Датчик тока (пояс Роговского); 7 - Магнитоплазменный компрессор; 8 - Генератор высоковольтных импульсов поджига; 9 - Генератор импульсов; 10, 11 - Скоростная цифровая видеокамера «ВидеоСпринт»; 12 - Цифровой фотоаппарат «CASIO EXILIM EX-F1»; 13, 14 - Спектрально-измерительный диагностический комплекс «Спектр-01К», «Спектр-02»; 15, 16 - Сверхскоростной фоторегистратор «СФР-2М»; 17 - Фотоэлектронный спектрометр «Solar»; 18 - Коаксиальный фотоэлемент; 19..24 - Ослабляющий

светофильтр; 25 - Кварцевая линза; 26 - Диафрагма; 27 - Цифровой осциллограф «Tektronix TDS1002B»; 28 - ПК;

Рисунок 1 – Структурная схема экспериментального технологического стенда.

Регистрация формы и размеров плазменных образований и их временной динамики проводится с помощью скоростной фотографической камеры типа «СФР-2М» (поз. 15, 16) и фотоэлектрической съемки процесса, при помощи скоростной цифровой камеры «ВидеоСпринт» и цифрового фотоаппарата «CASIO EXILIM EX-F1».

Регистрация электрических сигналов (с токовых датчиков, делителей напряжения, фотоэлементов и др.) осуществляется при помощи современных цифровых двухканальных осциллографов с полосой пропускания не менее 20 МГц (осциллограф типа «TDS-1001», «TDS-1002», поз. 27). Фото и видео фиксация динамики развития процессов, осуществляется при помощи цифровых фото- и видео-камер, записывающих информацию на жёсткий диск компьютера (поз. 28).

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 2.



 1 – Несущая рама; 2 – Набор токовых перемычек; 3 – Набор конденсаторов К-75-40а, 3000В, 100 мкФ; 4 – Колёсные опоры; 5
– Блок поджига; 6 – Разрядник; 7 – Фланец; 8 – Магнитоплазменный компрессор; 9 – Экспериментальный образец; 10 –
Державка; 11 – Экспериментальный стол; 12 – Токовые шины.
Рисунок 2 – Общий вид экспериментальной

установки

Конструктивные особенности импульсного электроразрядного плазмотрона

Импульсный электроразрядный плазмотрон (МПК) является ключевым элементом технологической установки для плазменно-оптической модификации свойств конструкционных материалов. При его проектировании учитывался предыдущий опыт разработок магнитоплазменных компрессоров и имеющиеся на сегодняшний день результаты экспериментальных и теоретических исследований. Продольный разрез разработанного импульсного электроразрядного плазмотрона иллюстрируется чертежом представленным на рисунке 3.

Центральный электрод (катод) (поз. 7) выполнен из эрозионностойкого сплава ВДПМ. Его часть, обращённая к разряду, имеет сферическую форму Ж30 мм. Внутри катода насквозь проделано отверстие, в которое вставляется изолированный игнайтор (поз.11, 13). Положение игнайтора фиксируется прижимным кольцом (поз. 8) и накидной гайкой (поз. 9). В катоде по периметру проделано 4 сквозных отверстия Ж2 мм. При подаче высоковольтного импульса на игнайтор и катод, происходит пробой разрядного промежутка между ними. В результате чего образовавшаяся плазма

выходит через сквозные отверстия Ж2 мм по направлению к аноду и, тем самым инициирует пробой разрядного промежутка между катодом и анодом (поз. 4). Катод вставляется в диэлектрическую втулку (поз. 5) из фторопласта, имеющую коническую поверхность, обращенную к плазме. Такая геометрия позволяет создать осевую составляющую разрядного тока, обеспечивающую дополнительную магнитную фокусировку струи и тем самым повышающую удельную плотность вкладываемой энергии.

Анод (поз. 4) выполнен из меди, имеет цилиндрическую форму с внешним диаметром Ж58 мм. Крепление МПК с стенду осуществляется при помощи отверстий, расположенных на несущем фланце (поз. 12).



1 –держатель анода; 2 – втулка изоляционная; 3 – кольцо компенсационное; 4 – анод; 5 –втулка; 6 –держатель катода; 7 – катод; 8 – кольцо прижимное; 9 –гайка накидная; 10 – токоввод; 11 – изолятор игнайтора; 12 – фланец анода; 13 – токоввод игнайтора; 14...18 – стандартные изделия. Рисунок 3 – Магнитоплазменный компрессор. Чертёж.

Экспериментальные исследования

Результаты экспериментальных исследований приведены для режима работы импульсного плазмотрона, параметры которого приведены в таблице 1:

Таблица 1 – Параметры режима работы экспериментального импульсно	ого плазмотрона
Ёмкость конденсаторной батареи C_0 , мк Φ	3000
Напряжение конденсаторной батареи U_0 , В	3280
Заряд конденсаторной батареи Q, Кул	9,840
Начальная энергия, запасённая в конденсаторной батарее W_0 , Дж	$16,14 \cdot 10^3$



Рисунок 4 – Первичные сигналы с пояса Роговского и скомпенсированного делителя напряжения (подключённого к МПК)

На рисунке 4 приведены характерные осциллограммы разрядного тока и напряжения на электродах МПК, а на рисунке 5 – результаты электротехнических измерений, представленные в виде временных зависимостей основных энергетических характеристик импульсного плазмотрона: тока, напряжения на МПК, энергии и мощности, выделяемых в плазме.





В таблице 2 представлена сводка основных электротехнических и энергетических характеристик плазмотрона.

Таблица 2 – Основные электротехнические и энергетические характеристики импульсного плазмотрона

Период колебаний Т, с	$362, 0.10^{-6}$
Параметр затухания контура γ , ед	$1,7 \cdot 10^{-1}$
Индуктивность контура L_{c} , Гн	$1, 1 \cdot 10^{-6}$
Индуктивность МПК L _{мPK} , Гн	$0,33 \cdot 10^{-6}$

77-51038/466600

Сопротивление контура R_{C} , Ом	$2, 2 \cdot 10^{-3}$
Сопротивление МПК <i>R</i> _{<i>мрк</i>} , Ом	$4,5 \cdot 10^{-3}$
Эффективность передачи энергии из конденсаторной батареи в МПК $\eta_{_{MPK}}$, %	67,3
Доля энергии, выделяемая контуром в 1ом полупериоде тока η_1 , %	69,8
Время 1ого максимума тока $ au_{1m}$, с	$70 \cdot 10^{-6}$
Максимальное значение разрядного тока I_{1m} , А	$179 \cdot 10^{3}$
Максимальная электрическая мощность, вкладываемая в МПК <i>Р</i> _{МРК} , Вт	$150 \cdot 10^{6}$
Электрическая энергия, вкладываемая в МПК в 10м полупериоде $W_{_{1MPK}}$, Дж	$12,1.10^{3}$
Характерное время энерговклада в плазменную нагрузку, влияющее на	90.10^{-6}
динамические и яркостные характеристики плазмы $ au_{0.5}$, с	

Измерения спектральных и световых характеристик излучения проведены для одного энергетического режима (таблица 1), но при разных формах организации квазиодномерного потока плазмы. Был проведён анализ как свободно расширяющегося разряда, так и радиально-ограниченного. При этом последний режим был реализован с помощью цилиндрических насадок (переменной длины), внутренний диаметр которых совпадал с диаметром анода (рис. 3, поз. 4), что позволило зафиксировать площадь плазменного образования и экспериментально определить яркостные параметры излучения.

Спектральные характеристики плазменной струи регистрировались с двух направлений - с боку и с торца. При этом было установлено, что излучение можно считать квазиизотропным, так как энергетические параметры излучения в этих двух направлениях в пределах погрешности измерений (15...20%) совпадают. Некоторые результаты спектрально-энергетических измерений приведены на рисунке 6 и в таблице 3.



Таблица 3 – Результаты обработки спектральных характеристик (радиальноограниченный разряд, насадок: труба Ø58мм, l=65мм)

Удельная электрическая мощность на единицу миделевой площади МПК,	$5,7 \cdot 10^{10}$
BT/M^2	,
Импульсная сила излучения, Вт/ср	$7.1 \cdot 10^5$

Импульсная сила излучения, Вт	/cp
-------------------------------	-----

Плотность мощности на поверхности детали, Bт/м² $8.5 \cdot 10^8$

77-51038/466600

Максимальная скорость распространения плазменного фронта, м/с	$2,5 \cdot 10^3$
Координата, характеризующая размер оттеснения газа от МПК к моменту	0,18
максимума мощности энерговклада в разряд, м	
Яркостная температура излучения плазмы, К	13400

На основе полученных экспериментальных данных была проведена предварительная оценка эффективности воздействия потока ударно-сжатой плазмы на металлическую преграду. В качестве характеристик конструкционного материала были выбраны характеристики стали марки «СтЗ». Результаты оценок показывают, что глубина проникновения тепловой волны в глубь металла составляет ~ 45 мкм, скачок температуры на поверхности при этом достигает ~ 1000 градусов.

Такой температурный скачок превышает значения температур критических точек стали марки «СтЗ» (Ac1=735°C, Ac3(Acm)=850°C, Ar3(Arcm)=835°C, Ar1=680°C). Поэтому предлагаемая комбинированная радиационно-плазмодинамическая обработка поверхности (традиционный разогрев поверхностного слоя металла, передача части внутренней энергии плазменного потока и ударное воздействие с высоким уровнем давлений) позволяет проводить не только поверхностную термическую закалку, но также и легировать поверхностный слой практически всеми необходимыми элементами.

Заключение

Радиационно-плазмодинамический метод модификации физико-химических свойств поверхностных слоев металлов и их сплавов, основанный на импульсном воздействии плотных плазменных потоков заданного химического состава на обрабатываемую поверхность является одним из наиболее перспективных, на сегодняшний день, методов в промышленности. Приведённые в настоящей работе данные свидетельствуют о высокой перспективности метода. Однако, для разработки оптимальных режимов по энергетике, по структуре, и по глубине модифицированных слоёв необходимо проведение дальнейших исследований.

Список литературы

- 1. Камруков А.С, Козлов Н.П., Протасов Ю.С., Плазмодинамические источники излучения высокой спектральной яркости. В сб. «Радиационная плазмодинамика», Москва, «Энергоатомиздат», 1991; с. 10-156.
- 2. Козлов Н.П., Морозов А.И., Плазменные ускорители и ионные инжекторы, Москва, «Наука», 1984;
- 3. Камруков А.С., Кулебякина А.И., Инженерные методы расчёта импульсных ксеноновых ламп, Москва, ООО НИЦ «Инженер»;
- 4. Козлов Н.П., Гришин Ю.М., Камруков А.С., Пекшев А.В., Шашковский С.Г. Плазменная техника и плазменные технологии, Москва, ООО НИЦ «Инженер», 2003.