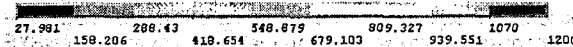


Рис.2. Поля температур, соответствующих моменту времени 2.4 сек.



Литература

1. Кундас С.П. Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей: монография – Мн.: Бестпринт, 2005. – 313с.
2. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина // М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
3. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. – М., ДМК Пресс-2005.-640с.

УДК 681.7.068

РАЗРАБОТКА ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНОК

Веремейчик А.И., Сазонов М.И., Хвисевич В.М., Якушевич С.

Брестский государственный технический университет, г. Брест

Введение

Плазменные потоки используются в различных практических приложениях для изучения движения тел при входе в плотные слои атмосферы Земли и других планет, для промышленного получения различных химических веществ, которые трудно либо вообще невозможно получить; при сварке, резке и упрочнении металлов, нанесении износостойких тонких пленок на детали машин, в металлургии и многих других процессах [1, 2].

1. Плазмотрон с МЭВ

Плазмотроны постоянного тока с секционированной межэлектродной вставкой (МЭВ) [3, 4] находят широкое применение в различных высокотемпературных технологических процессах, особенно в тех случаях, где требуются высокоэнтальпийные плазменные потоки при малых расходах рабочего газа (плазменная переработка токсичных и радиоактивных отходов, нанесение алмазоподобных износостойких пленок, получение фуллеренов и т.д.). Они могут работать как при атмосферном, так и при пониженном давлении в разрядной камере. В настоящее время особенно актуальным являются вопросы применения плазмотронов для осаждения износостойких алмазоподобных пленок.

В Брестском государственном техническом университете (БрГТУ) разработан и изготовлен плазмотрон с секционированной межэлектродной вставкой. На рис. 1 приведена принципиальная схема такого плазмотрона, предназначенного для получения алмазоподобных пленок.

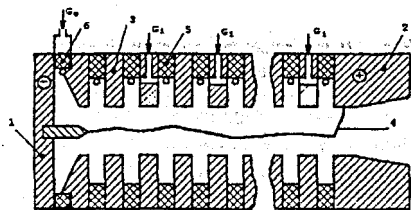


Рис.1. Принципиальная схема плазмотрона с МЭВ:

1 - катод, 2 - анод, 3 - секции МЭВ, 4 - дуга, 5 - изолятор, 6 - кольцо закрутки рабочего газа, G_0 - основная подача газа,

G_i - дополнительная подача газа для организации газовой завесы стенок разрядной камеры

Плазмотрон используется для генерации плазменной аргоновой струи с дозвуковым или сверхзвуковым истечением. Введение реагентов в такую струю и разрядную камеру плазмотрона позволяет управлять процессом роста алмазоподобных пленок CVD методом. Химические реагенты (H_2 , C_2H_2 , CH_4) могут инжектироваться как в плазменную струю, так и через щели между секциями МЭВ в разрядную камеру плазмотрона. Основными деталями плазмотрона являются катод 1, анод 2, секции МЭВ 3 и кольцо закрутки рабочего газа 6.

Для обеспечения стабильного горения дуги 4 на оси электроразрядной камеры и исключения шунтирования дуги в канале плазмотрона толщина секций выбирается такой, чтобы падение потенциала на участке дуги внутри секции не превышало суммарную величину анодного и катодного падений потенциала вдоль дуги. В плазмотроне с МЭВ проведена оценка падений потенциалов и толщины секций, которая не должна превышать одного калибра, на основе известных величин приэлектродных падений потенциалов с целью удержания дуги на оси электроразрядной камеры.

Для увеличения ресурса работы катода при нагреве аргона в плазмотроне применен внутренний электрод из тугоплавкого материала в виде вольфрамового стержня диаметром 3 - 4 мм, который заделан в медную обойму и выступает из нее на 10 - 20 мм. Проведенные длительные испытания плазмотрона при токах дуги 50-320 А и работе его вместе с вакуумной камерой и осаждении углеродных пленок показали, что ресурс разработанного катода составляет не менее 50 - 60 часов.

С целью генерации сверхзвуковой плазменной струи анод в разработанной конструкции плазмотрона выполнен в виде конического сопла, причем входная его часть протяженностью 1,5-2,0 калибра изготовлена цилиндрической диаметром 4-10 мм.

Электроизоляция между секциями МЭВ и электродами обеспечивается прокладками 5 из вакуумной резины. Диаметр электроразрядной камеры и сопла плазмотрона может составлять 4, 6, 8 или 10 мм. Число секций МЭВ также может изменяться (от 3 до 24). Это позволяет заранее определить необходимую эксплуатационную мощность плазмотрона.

Проведены исследования напряженности электрического поля дуги в рабочих газах: аргон, азот, воздух. Эти результаты представлены на рис.2. Установлено, что наиболее эффективно удается нагревать при помощи плазмотрона аргон до температур вплоть до 11000 К. Поэтому для осаждения АПП в качестве рабочего газа выбран аргон, т.к. основным параметром осаждения пленки является температура газа:

Эквивалентное сопротивление
 $\rho_{\text{экв}} \cdot 10^{-2}, \text{ В/м}$

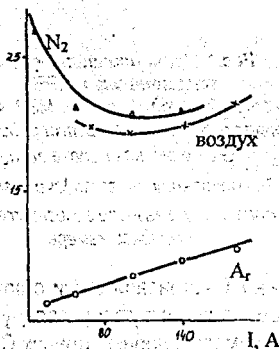


Рис. 2. Напряженность электрического поля дуги для различных газов

На рис. 3 приведены типичные вольт-амперные характеристики дуги, горящей в плазматроне с МЭВ. Эти характеристики экспериментально определены при токах дуги 40-90 А, расходах аргона $G=10-20$ л/мин, диаметре электроразрядной камеры $d=6$ мм.

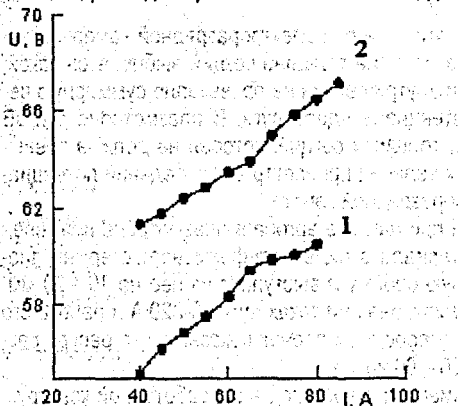


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики дуги в плазматроне с МЭВ при различных расходах аргона G :
 1 - 10,2 л/мин; 2 - 20,0 л/мин; $d=6$ мм,
 $P_c=(6...7) \cdot 10^2$ Па; $P_c=(2...4) \cdot 10^4$ Па,
 $L=40$ мм

В проведенных экспериментах было показано, что с увеличением межэлектродного расстояния L путем добавления секций МЭВ напряжение дуги возрастало. После каждого проведенного эксперимента производился осмотр плазматрона, при этом было установлено отсутствие горения дуги на секции. Это означает, что дуга горела в расчетном режиме на оси плазматрона. Обработка полученных данных позволяет сделать вывод, что вольт-амперные характеристики дуги имеют минимум при критерии $\frac{I}{d}$ меньше 7,5 А/мм. Такой вид характеристик позволяет эксплуатировать плазматрон, используя силовой источник с жесткой вольт-амперной характеристикой и этим обеспечить электрический к.п.д. установки, близкий к единице.

Таблица 1. Технические характеристики разработанного плазмотрона с МЭВ

1. Мощность плазмотрона	3-10 кВт
2. Ток дуги	50-100 А
3. Напряжение дуги	40-100 В
4. Рабочий газ	аргон
5. Расход аргона в основную камеру плазмотрона	до 40 л/мин
6. Расход аргона для организации газовой завесы стенок электроразрядной камеры плазмотрона	до 24 л/мин
7. Диаметр вольфрамового стержня катода	3-4 мм
8. Диаметр электроразрядной камеры плазмотрона	4-10 мм
9. Длина МЭВ плазмотрона	40-150 мм
10. Толщина секций МЭВ	4 мм
11. Ширина щели между секциями	0,9-1,2 мм
12. Диаметр входной части анода сверхзвукового сопла	4-10 мм
13. Конусность сопла	14-16°

2. Установка для осаждения алмазоподобных пленок (АПП)

Для осаждения АПП плазмотрон смонтирован на вакуумной установке типа ВУ-1Б.

В состав установки входят:

- плазмотрон мощностью 10 кВт;
- откачной пост;
- система подачи газа в рабочую камеру плазмотрона и плазменную струю;
- пульт управления.

Схема реактора 2 установки, используемого для осаждения алмазоподобных пленок, приведена на рис. 4.

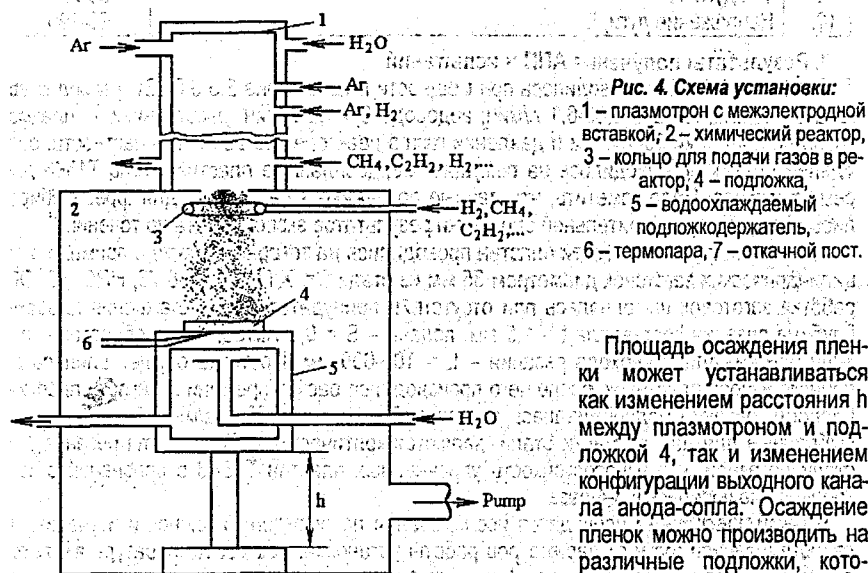


Рис. 4. Схема установки:

- 1 – плазмотрон с межэлектродной вставкой;
- 2 – химический реактор;
- 3 – кольцо для подачи газов в реактор;
- 4 – подложка;
- 5 – водоохлаждаемый подложкодержатель;
- 6 – термометр;
- 7 – откачной пост.

Площадь осаждения пленки может устанавливаться как изменением расстояния h между плазмотроном и подложкой 4, так и изменением конфигурации выходного канала анода-сопла. Осаждение пленок можно производить на различные подложки, которые прижимаются к водоохлаждаемому держателю.

лаждаемому подложкодержателю 5: Температура подложки может регулироваться как расходом воды, так и мощностью плазмотрона. Контроль температуры осуществляется терпарой 6.

Как уже отмечалось, данная установка применялась для осаждения алмазоподобных пленок для нанесения тонких износостойких алмазоподобных пленок способом химического осаждения (CVD-методом) из газовой фазы с применением высокотемпературной сверхзвуковой плазменной струи. Осаждение пленок проводилось при мощности плазмотрона 2,5-3,0 кВт, расходах аргона - 3-6 л/мин, метана - 0,03-0,1 л/мин, водорода - 0,4-1,2 л/мин, расстояниях от плазмотрона до подложки - 90-190 мм и давлении газа в реакторе 150 - 280 Па.

Таблица 2. Техническая характеристика вакуумно-плазменной установки

№	Параметры, характеристики	Величина
1.	Минимальное давление в камере при общем натекании газа 20 л/мин, Па	10 ³
2.	Рабочий газ	аргон
3.	<i>Расход аргона в основную камеру, л/мин</i>	1,5-20
4.	Расход аргона для поддува между секциями, л/мин	0,4-10
5.	Расход метана в зазор между секциями, л/мин	0,2-2
6.	Расход воды на охлаждение, л/мин	
	катода	1,0
	каждой секции	0,5
	анода	3,0
7.	Расход воды на охлаждение установки, л/мин	14
8.	Род тока дуги	постоянный
9.	Ток дуги, А	30-280
10.	Напряжение дуги, В	90-190

3. Результаты получения АПП и испытаний

Осаждение пленок проводилось при мощности плазмотрона 2,5-3,0 кВт, расходах аргона 3-6 л/мин, метана 0,03-0,1 л/мин, водорода 0,4-1,2 л/мин, расстояниях от плазмотрона до подложки 90-190 мм и давлении газа в реакторе 150-280 Па. В частности, осаждение пленок производилось на режущие твердосплавные пластины типа Т15К6 для резцов и фрез. Надо заметить, что данные по режимам напыления для фрез выбирались исходя из предварительной обработки результатов эксперимента по точению.

Испытания износостойкости пластин проводились на токарном станке с применением цилиндрических заготовок диаметром 35 мм из стали Ст. Х ГОСТ 5950-73, НРС, 40. Обработка заготовок выполнялась при отсутствии принудительного охлаждения пластин. Глубина резания составляла $t = 1,5$ мм, подача - $S = 0,2$ мм/об, число оборотов - $n = 1000$ об/мин, длина прохода резания - $L = 100-600$ мм. Проточка осуществлялась до полного износа пластинок, после чего производился расчет времени стойкости пластин. Скорость резания поддерживалась постоянной и равной 109,9 м/мин. Такие режимы, выбранные для данной марки стали, являются критическими. Результаты резания для стали показали, что износостойкость упрочненных пластин Т15К6 в сравнении с контрольной повысилась в 3-4 раза.

В настоящее время проводятся исследования по осаждению пленок и изучению их свойств в зависимости от параметров работы установки. Так как температура является одним из основных факторов, влияющих на формирование физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий, необходимо провести исследование и анализ темпе-

ратурных полей в получаемой пленке. Главной сложностью является то, что данная задача теплопроводности неразрешима классическими методами. Разработана методика и алгоритм численного решения данной задачи. При постановке математической модели процесса напыления рассматривается система уравнений нестационарной теплопроводности с учетом граничных условий. Решение проводится методом тепловых потенциалов. С помощью данного метода краевая задача теплопроводности сводится к системе уравнений Вольтера второго рода, которая решается численно с использованием ЭВМ. Распределение температуры учитывается в дальнейшем при расчете остаточных напряжений в покрытиях, которые, как известно, оказывают значительное влияние практически на все эксплуатационные характеристики напыленных деталей и могут быть причиной появления трещин и отслоений. С помощью метода граничных элементов ведется разработка программы для расчета температурных полей и остаточных напряжений в покрытиях на деталях различных размеров и формы.

Выводы

1. Для повышения эффективности преобразования энергии и использования плазменных потоков и струй исследованы электрические и тепловые характеристики электрических дуг в продольном потоке различных газов. Разработана методика расчета генераторов плазменных струй – плазмотронов постоянного тока.
2. Созданы плазмотрон постоянного тока и установка для получения АПП для научных исследований и решения различных инженерных задач.

Литература

1. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. "Прикладная динамика термической плазмы" / «Наука» СО АН. Новосибирск. 1975. - 299 с.
2. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Фуллерены и структуры углерода. // УФН, № 9. - 1995. - С. 977-1009.
3. Богданов А.А., Дайнингер Д., Дюжев Г.А. Перспективы развития промышленных методов производства фуллеренов. // ЖТФ, 2000. Т. 70, вып. 5.
4. Курочкин Ю.В., Пустогаров А.В. Исследования плазмотронов с подачей рабочего тела через пористую межэлектродную вставку / Экспериментальные исследования плазмотронов. Под ред. М.Ф. Жукова. - Новосибирск, 1977. - С. 82-104.

УДК 539.3

МЕТОД ГРАНИЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В РАСЧЕТАХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И ТЕРМОНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ УПРОЧНЕНИИ

Веремейчик А.И.

Брестский государственный технический университет, г. Брест

В любом процессе термообработки конструктивных элементов машин и механизмов (закалке, поверхностном плазменном напылении и т.д.) важнейшим фактором является исследование распространения полей температур и термонапряжений [1, 2].

Температурное поле является одной из основных физических характеристик поверхностного упрочнения высококонцентрированными источниками нагрева. Зная изменение температуры тела в зависимости от времени, ее установившиеся значения в определенной точке, можно судить (в зависимости от условий обработки, физических свойств тел, окружающей среды) о том, какие процессы термообработки могут быть реализова-