

# ДУГОВОЙ ИСТОЧНИК МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

*Д. П. Батин, В. Н. Грудаков, М. Ю. Науменко, Г. Е. Тагиров, Д. Б. Шадрин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» им. академ. Е. И. Забабахина»,  
г. Снежинск Челябинской обл.

## Введение

Объектом исследования является источник металлической плазмы (ИМП) для нанесения покрытий в вакууме. ИМП используются в составе установок для нанесения покрытий в вакууме («Булат-6»). Они получили широкое применение в различных отраслях промышленности для нанесения защитных, упрочняющих и декоративных покрытий методом КИБ (метод конденсации вещества из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой поверхности). Метод КИБ используется для формирования на изделиях, например рабочей поверхности режущего инструмента, твердых износостойких, коррозионно-стойких покрытий, что значительно продлевает их срок службы.

На сегодняшний день существует большое количество конструкций ИМП для нанесения покрытий на наружные поверхности (планарный, торцевой). ИМП для нанесения покрытий на внутренние поверхности не так распространены и не способны наносить покрытия на цилиндрические, конические протяженные детали с закрытыми вершинами.

Цель работы – разработка конструкции ИМП нового поколения для нанесения покрытий на внутренние поверхности сложных тел вращения, как открытых, так и закрытых с одной стороны. ИМП нового поколения должен обладать большей стабильностью и надежностью работы, простотой конструкции, ремонтпригодностью и меньшей себестоимостью по отношению к ИМП предыдущих поколений.

В процессе работы проводились патентные исследования, их анализ, разработка конструкции и экспериментальные исследования по проверке работоспособности разработанного ИМП.

## Общие сведения

Действие ИМП основано на методе катодного распыления материала катода-мишени катодными пятнами (КП) электрической дуги низкого давления.

Наибольшее промышленное распространение получили ИМП с интегрально холодным катодом [1]. Электрическая дуга низкого давления в таких испарителях устойчива в широком диапазоне токов и достаточно проста в технической реализации. Покрытия, получаемые данными источниками, имеют высокие адгезионные свойства, однородны по толщине,

а источники имеют высокую скорость нанесения покрытия.

Электрическая дуга низкого давления характеризуется низким напряжением и высоким током, с ее помощью на поверхности катода-мишени формируются эмиссионные зоны, так называемые КП. Так как температура в КП чрезвычайно высока (может достигать нескольких тысяч °К) [2] происходит интенсивное испарение и ионизация материала катода-мишени с формированием высокоскоростных потоков плазмы, распространяющихся из КП в сторону анода и далее к изделию (детали). КП существует очень короткий промежуток времени, после чего происходит само угасание КП и само инициация его в новой области катода-мишени близкой к предыдущему положению. Визуально это воспринимается, как перемещение дуги по поверхности катода.

По способу стабилизации различают ИМП с автоуправлением и с управлением внешним магнитным полем. В ИМП с автоуправлением регуляризация траекторий КП осуществляется магнитным полем, которое создается самим разрядным током, текущим непосредственно по катоду. В источниках второго типа управляющее магнитное поле создается внешним постоянным магнитом или электромагнитом.

## Назначение и задачи работы

Целью работы является создание новой конструкции источника металлической плазмы.

Поставленная задача решалась путем выполнения нескольких этапов работ.

На первом этапе проводился анализ уровня техники, включающий в себя поиск по патентным и научно-техническим источникам информации, и изучение принципов работы известных ИМП. Были выявлены недостатки конструкций существующих ИМП.

На втором этапе разрабатывалась конструкция нового ИМП. По результатам этой разработки было выпущено КД на ИМП и изготовлен опытный образец.

На третьем этапе производилась проверка работоспособности конструкции нового ИМП.

## Разработка конструкции ИМП

В настоящее время для нанесения металлических покрытий в вакууме применяется большое ко-

личество разнообразных ИМП с применением различных способов управления и стабилизацией КП вакуумной дуги.

На серийных предприятиях Росатома для нанесения покрытий на внутренние поверхности сложных тел вращения, как открытых, так и закрытых с одной стороны используется источник металлической плазмы (патент РФ № 2280709) – рис. 1. По способу стабилизации этот источник относится к ИМП с управлением КП внешним магнитным полем.

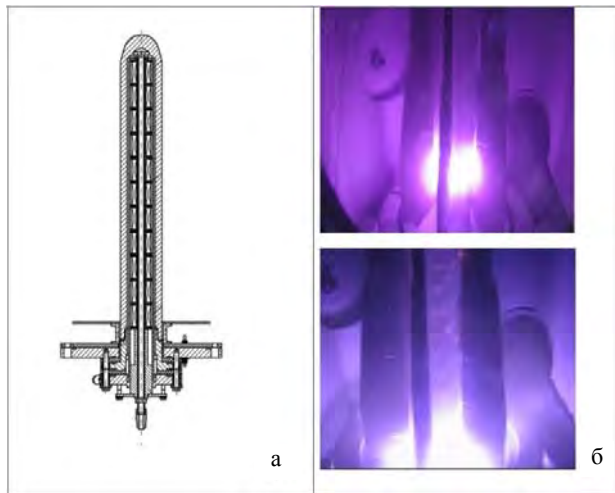


Рис. 1. ИМП с управлением внешним магнитным полем: а – общий вид конструкции; б – зоны локализации катодных пятен

Он содержит установленные в вакуумной камере охлаждаемый катод из испаряемого металла, анод в виде вертикальных пластин расположенных по окружности вдоль катода, и источник питания, соединенный токоподводами с анодом и катодом.

Катод выполнен в виде пустотелого цилиндра с полусферической вершиной. В полости катода размещена магнитная система управлением движением катодного пятна в виде многосекционных соленоидов, которые установлены на магнитопровод. Перемещение катодных пятен электрической дуги низкого давления происходит под действием результирующего магнитного поля соленоидов магнитной системы.

В комплект ИМП входит система управления движением катодных пятен, которая состоит из программируемого устройства, блока обратной связи, регулируемого многоканального источника тока, источника тока дуги и источника постоянного тока.

Данный ИМП обеспечивает высокое качество наносимого покрытия.

Несмотря на то, что конструкция ИМП удовлетворяет требованиям к нанесению покрытий, она имеет ряд недостатков:

- сложная и дорогостоящая система управления магнитной системы. Возникновение сбоя в работе системы управления может приводить к отклонению движения КП от заданного алгоритма, что неизбежно приводит к ухудшению качества наносимого покрытия (неравномерность и разнотолщинность покрытия);

- специфика конструкции не позволяет создать катод составным из нескольких металлов, для нанесения композиционных покрытий;

- сложность изготовления длинномерного катода, связанная с высокими требованиями к качеству литья алюминиевых сплавов;

- невозможность применения катодов из ферромагнитных сплавов.

### Техническое решение

Для достижения поставленных целей была предложена принципиально новая конструкция источника плазмы (рис. 2) с использованием принципа автостабилизации КП электрической дуги низкого давления.



Рис.2. САД модель ИМП

Конструкция нового ИМП (рис. 3) представляет собой охлаждаемый катод U-образной формы 1, выполненный из испаряемого металла. Катод является составным, а его части могут быть изготовлены из разных металлов. Рабочей (испаряемой) поверхностью катода является поверхность *Б* (рис. 3). Внутри катода имеется канал охлаждения, по которому пропущена трубка 4. Анод 2 представляет собой набор вертикальных пластин расположенных напротив рабочей поверхности катода, но не перекрывающих его. Для более стабильного горения вакуумной электрической дуги площадь анода можно увеличивать путем добавления дополнительных пластин.

Нерабочая поверхность катода закрыта дугогасящими экранами 5, которые исключают пребывание КП вне рабочей зоны. В конструкцию ИМП введены датчики ионного тока 6 и 7, подключенные к источнику питания 8, которые позволяют определять крайние положения КП на противоположных концах катода. В качестве источника питания может быть использован инвертор электропитания дуговых испарителей ELA-300/40С [3].

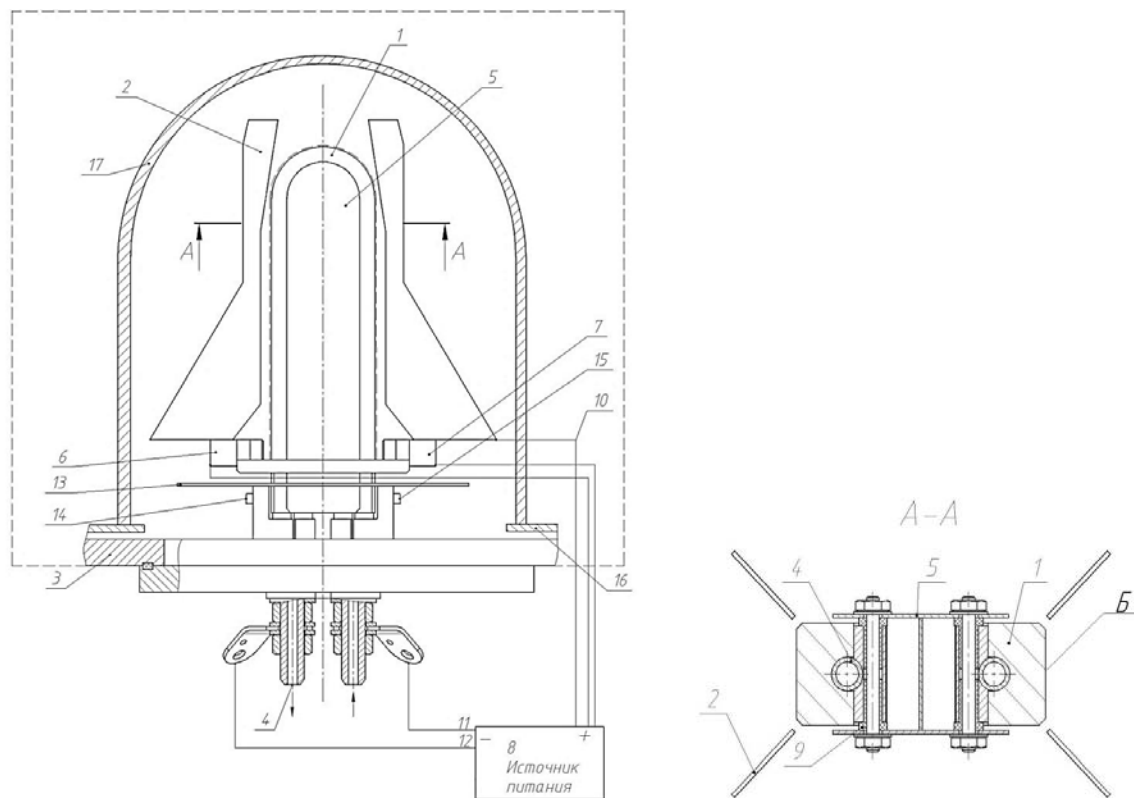


Рис. 3. Конструкция нового ИМП: 1 – катод; 2 – анод; 3 – вакуумная камера; 4 – трубка; 5 – экран; 6 – датчик; 7 – датчик; 8 – источник питания; 11 и 12 – токоподводы; 13 – экранирующее кольцо; 14 и 15 – поджигающие электроды; 16 – поворотное устройство; 17 – обрабатываемая деталь

Для инициирования электрической дуги низкого давления на противоположных концах катода установлены поджигающие электроды 14 и 15. В конструкции ИМП предусмотрено два поджигающих электрода для обеспечения стабильной работы при отказе одного из них. Чтобы исключить пребывание КП ниже датчиков ионного тока, в конструкцию источника введено экранирующее кольцо 13.

Обрабатываемая деталь 17 фиксируется в вакуумной камере 3 на поворотном устройстве 16.

### Принцип работы

В вакуумной камере, с установленным ИМП (рис. 3), на поворотном устройстве закрепляется обрабатываемая деталь 17. С помощью источника питания 8 между катодом 1 и анодом 2 через токоподвод 11 создается электрическое поле. С помощью подачи от источника питания импульса на поджигающий электрод 14 инициируется электрическая дуга низкого давления между катодом и анодом. КП начинают перемещаться по рабочей поверхности катода, от поджигающего электрода в сторону катодного токоподвода, пока не достигнут датчика ионного тока 7, который подавая сигнал на блок управления источника питания 8, переключает катодный потенциал на противоположный токоподвод 12. Катодные пятна перемещаются по поверхности катода, но теперь уже в противоположную сторону. И

снова достигнув датчика ионного тока 6, источник питания переключает катодный потенциал и цикл повторяется, пока не будет завершен процесс нанесения покрытия. Кроме того, источник питания позволяет задавать дискретное переключение токоподводов по времени без использования датчиков ионного тока и тем самым удерживать КП в заданной области рабочей поверхности катода.

### Проверка работоспособности

Источник плазмы устанавливается в вакуумную камеру установки для нанесения покрытий «Булат-6». Токоподводы, через силовые модули К1 и К2 подключаются к источнику питания. Датчики ионного тока через систему управления установки так же подключаются к источнику питания установки. Для инициирования электрической дуги низкого давления поджигающий электрод подключается напрямую к источнику питания. Схема подключения показана на рис. 4.

После установки ИМП вакуумная камера вакуумируется до давления  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па ( $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.). Для стабильного горения электрической дуги низкого давления в вакуумную камеру подается газ Ag.

Источник питания дуги установки «Булат-6» через силовые модули К1 и К2 создает электрическое поле между катодом и анодом ИМП. При подаче на поджигающий электрод импульса, инициируется электрическая дуга низкого давления между

катодом и анодом. Катодные пятна, перемещаясь по поверхности катода от поджигающего электрода в сторону катодного токоподвода достигают датчика ионного тока (Д1). При подходе КП к датчику ионного тока, подключенного к системе управления (СУ), на его выходе наблюдается импульс напряжения. При наличии данного импульса на датчике ионного тока СУ переключает силовые модули, вследствие чего катодный потенциал переключался на токоподвод, размещенный противоположно датчику ионного тока, зарегистрировавшего ионный ток.

Катодное пятно перемещается по поверхности катода в обратную сторону, достигая второго датчика ионного тока, после чего процедура повторялась.

Таким образом, проведя несколько итераций по проведению переключения потенциалов, было визуализировано (через смотровое окно камеры) зафиксировано перемещение КП по всей рабочей поверхности катода. Диаграмма напряжения с датчиков ионного тока (рис. 5) показывает, что время движения КП  $T$  между датчиками (пиковые импульсы) составляет около 55 мс.

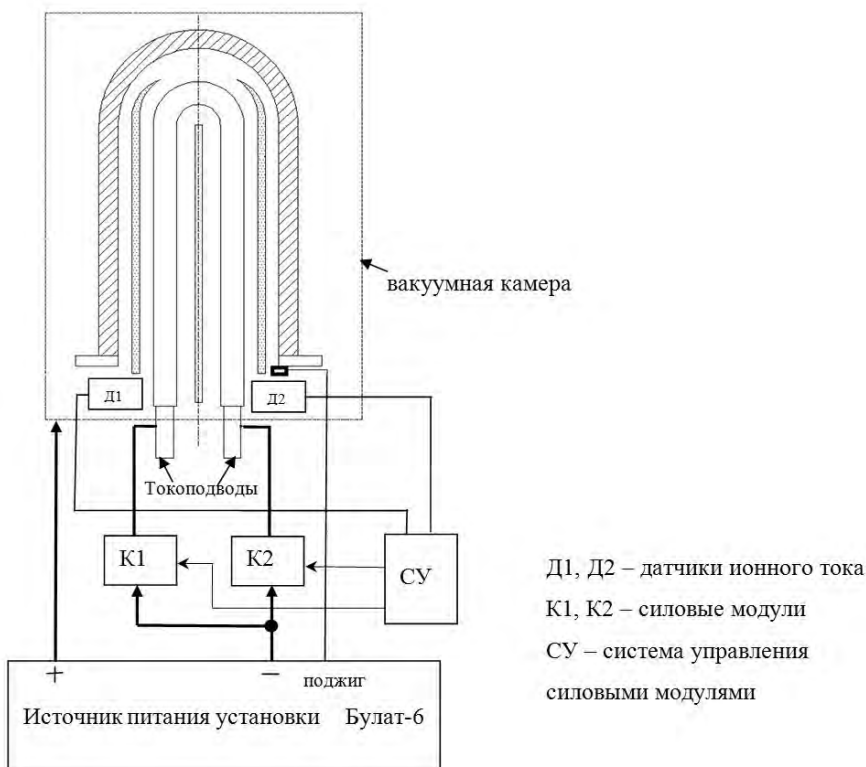


Рис. 4. Схема подключения к установке «Булат-6»

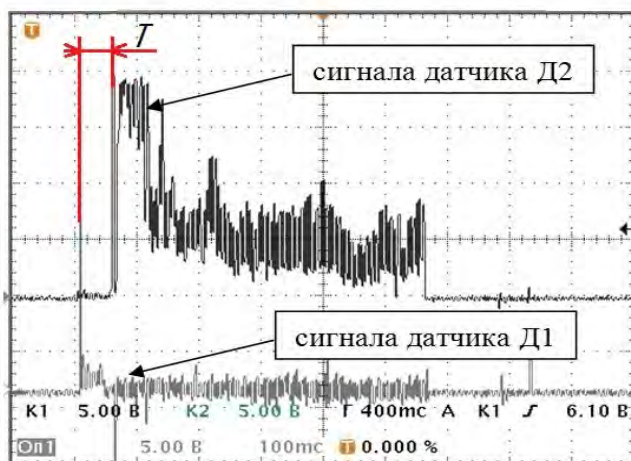


Рис. 5. Сигнал на датчике ионного тока

## Заключение

В результате проведенной работы создан ИМП нового поколения, который способен наносить покрытие на внутренние поверхности тел вращения как открытых, так и закрытых с одной стороны, а так же на внутренние поверхности сложных тел вращения

Конструкция нового ИМП имеет следующие преимущества по сравнению с ИМП предыдущего поколения:

- в конструкции ИМП отсутствует сложная магнитная система, что значительно упрощает и удешевляет конструкцию;
- в комплекте ИМП отсутствует сложная система управления магнитной системы, что значительно удешевляет конструкцию и позволяет избегать сбоев в работе ИМП, тем самым повышая надежность и стабильность работы ИМП, а, следовательно, и качество наносимого покрытия;
- конструкция ИМП позволяет изготавливать катод составным из нескольких частей и из различных металлов (в том числе и ферромагнитных);
- конструкция катода имеет конфигурацию не сложной формы, что значительно сокращает трудозатраты на изготовление;

- конструкция ИМП обладает лучшей ремонтопригодностью, что позволит сократить трудозатраты на его обслуживание.

Проведенные на опытном образце эксперименты показали работоспособность разработанной конструкции ИМП. В настоящее время ИМП проходит конструкторско-технологическую отработку и в дальнейшем будет передан на серийные предприятия.

На конструкцию ИМП получен патент РФ № 2601725.

## Литература

1. Саксаганский Г. Л. Электрофизические вакуумные насосы. М.: Энергоатомиздат, 1988. С. 280.
2. Кобайн Дж., Эккер Г. и др. Вакуумные дуги: Пер. с англ. / Под ред. Дж. Лафферти. М.: Мир, 1982. С. 432.
3. Руководство пользователя Инвертор электропитания дугового испарителя ELA-300/40С. Москва, Зеленоград, 2015 г.