

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК ПЛАЗМЫ С КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА

Ю.А. Сысоев

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина*

Описаны конструкция и принцип работы источника эрозионной плазмы с трехступенчатой системой возбуждения вакуумно-дугового разряда. В качестве двух первых ступеней используется применяемая в штатных источниках плазмы установок «Булат» видоизмененная бесконтактная система запуска с плазменным инжектором, работа третьей ступени запуска основана на переходе тлеющего разряда в дуговой. Согласованная работа ступеней запуска на различных этапах формирования покрытий обеспечивает существенное повышение ресурса и надежности системы инициирования вакуумно-дугового разряда и расширяет функциональные возможности источника плазмы.

## ВВЕДЕНИЕ

Одними из наиболее важных характеристик технологических источников плазмы на основе вакуумно-дугового разряда являются надежность и ресурс его системы поджига (СП) дуги, поскольку именно они в основном определяют аналогичные параметры источника плазмы в целом. Работы по совершенствованию СП вакуумно-дугового разряда, вызванные требованиями к повышению надежности источников плазмы и расширению диапазона их работы в сторону импульсных режимов при одновременном обеспечении достаточной простоты как изготовления, так и эксплуатации СП, выполняются с момента создания первых конструкций источников плазмы.

Исследования по возбуждению дугового разряда и его стабилизации в вакуумно-дуговых устройствах, начатые в середине 70-х годов в Харьковском физико-техническом институте, привели к созданию достаточно надежно работающих в стационарном режиме источников плазмы с автостабилизацией и магнитным удержанием катодного пятна (КП) [1]. Однако проблема создания СП вакуумно-дугового разряда, обеспечивающих надежную работу источников плазмы в импульсном режиме с ресурсом более  $10^6 \dots 10^7$  срабатываний, что необходимо при реализации ряда перспективных технологических процессов, осталась нерешенной.

## 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА К НАСТОЯЩЕМУ МОМЕНТУ

Разработанная в [2] и широко применяемая в настоящее время бесконтактная СП вакуумно-дугового разряда в технологических источниках плазмы, по сути, является двухступенчатой. В ней роль первой ступени выполняет плазменный инжектор, генерирующий при срабатывании начальный сгусток плазмы, возбуждающий сильноточный разряд во второй ступени, разрядный промежуток которой образован дополнительным электродом и катодом. В дальнейшем возникшее катодное пятно (КП) дугового разряда магнитным полем выводится на рабочую поверхность катода.

Характеристики такой СП определяются в первую очередь надежностью и ресурсом работы плазменного инжектора. Применение в качестве заполнителей разрядного промежутка различных сортов керамики (22ХС, М-7 и др.) обеспечивает, при приемлемой вероятности (надежности) запуска источника плазмы, ресурс инжектора, не превышающий  $10^4 \dots 10^5$  срабатываний, который увеличивается до  $10^6$  при использовании вместо керамики специально разработанных композиционных материалов [3–5].

Достигнутый ресурс СП обеспечивает достаточную для практических целей надежность работы источников плазмы с автостабилизацией и магнитным удержанием КП в стационарном режиме при нанесении покрытий в широком диапазоне рабочих давлений, в том числе и в режимах с частыми включениями–отключениями дуги (например, в режиме ионной очистки). Однако в импульсном режиме при длительности импульсов дуги менее нескольких сотен миллисекунд такие источники неработоспособны. Связано это с тем, что возбуждение КП в них происходит в районе боковой, нерабочей поверхности катода. При этом для равномерной выработки катода необходимо, чтобы КП, как минимум, достигло центра рабочей поверхности катода, что обеспечивается длительностью (импульсом) горения дуги не менее нескольких сотен миллисекунд. При меньшей длительности горения вакуумно-дугового разряда эрозия катода будет неравномерной и происходить в большей части на нерабочей поверхности катода. Чем меньше длительность импульса, тем больше эта неравномерность, которая в итоге (при длительной работе в режиме коротких импульсов) приводит к образованию кольцеобразной выемки на боковой поверхности катода и отказу источника плазмы из-за невозможности вывода КП на рабочую поверхность катода даже при переходе в стационарный режим.

Следует также отметить, что стабильная работа пускового инжектора с заполнением разрядного промежутка керамикой возможна только в условиях, когда между очередными срабатываниями инжектора происходит восстановление проводящей пленки в его разрядном промежутке. Поэтому длительная ра-

бота источника плазмы в режимах с частыми погасаниями дуги приводит к снижению надежности срабатывания первой ступени запуска. Предложенный в [6] способ применения пусковых импульсов с высоковольтным пиком вначале не всегда дает положительный результат.

Более совершенны в отношении импульсных режимов работы источники плазмы, запуск которых осуществляется с помощью тлеющего разряда в системе электродов пеннинговского или полукатодного типов [1, 3]. При запуске источников переходом тлеющего разряда в дуговой (ПТД) КП образуется непосредственно на рабочей поверхности катода, с равной вероятностью возникновения в любой точке его поверхности. Такая особенность инициирования КП снимает все ограничения по длительности импульса вакуумно-дугового разряда, поскольку равномерная эрозия катода будет обеспечиваться при сколь угодно малых временах горения дуги.

Особенно эффективно СП на основе ПТД работают при наличии на катоде диэлектрических стимуляторов. В качестве таких стимуляторов могут выступать образующиеся на поверхности катода пленки из соединений материала катода с реакционными газами [1, 3].

Создание первоначальной плазмы в СП рассматриваемого типа тлеющим разрядом, существующим в системе электродов достаточно больших размеров, обеспечивает им высокий ресурс работы. Однако существенный недостаток, ограничивающий применение вакуумно-дуговых устройств с запуском тлеющим разрядом, заключается в том, что они практически неработоспособны при пониженных давлениях (менее  $5 \cdot 10^{-2}$  Па) [3].

Целью настоящей работы является разработка и исследование технологического источника плазмы с комбинированной СП, рациональным образом сочетающей преимущества каждого из рассмотренных выше способов возбуждения вакуумно-дугового разряда.

## 2. УСТРОЙСТВО ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ С КОМБИНИРОВАННОЙ СП

В разработанном источнике плазмы с комбинированной СП, схема которого показана на рис. 1, применена трехступенчатая система возбуждения вакуумно-дугового разряда. В качестве двух первых ступеней используется применяемая в штатных источниках плазмы установок «Булат» бесконтактная система запуска, работа третьей ступени запуска основана на переходе тлеющего разряда в дуговой.

Первой ступенью запуска в источнике плазмы является пусковой инжектор. Поскольку данный узел – наиболее ненадежное место СП, в данном источнике установлены две первые ступени запуска (два инжектора), образованные поджигающими электродами 6 и 8, образующими разрядный промежуток с элементом (кольцом) 5 дополнительного электрода. Разрядный промежуток инжектора может быть заполнен как керамикой, так и композиционным материалом [4, 5].

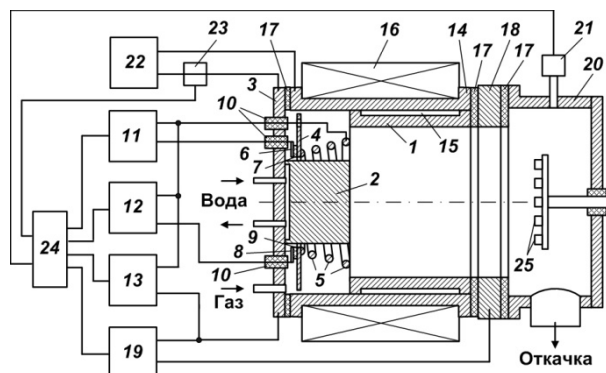


Рис. 1. Схема вакуумно-дугового источника плазмы с комбинированной СП: 1 – анод; 2 – катод; 3 – фланец; 4, 5 – элементы дополнительного электрода; 6, 8 – поджигающий электрод; 7, 9 – диэлектрик; 10 – тоководы; 11, 12 – блок питания первой ступени запуска; 13 – блок питания второй ступени запуска; 14 – корпус с полостью 15; 16 – соленоид; 17 – изолятор; 18 – пусковой электрод; 19 – блок питания третьей ступени запуска; 20 – камера; 21 – датчик давления; 22 – источник питания дуги; 23 – датчик тока дуги; 24 – блок управления; 25 – обрабатываемые изделия

Вторая ступень запуска была видоизменена по сравнению с [2] и образована в источнике элементом дополнительного электрода 6, выполненным в виде усеченной конусообразной спирали, прикрепленной меньшим основанием к элементу 5, и катодом 2. Питание на вторую ступень запуска подается через виток наибольшего диаметра, расположенный вблизи рабочей поверхности катода [7].

Третья ступень запуска образована пусковым электродом 18 (анод) и разнопотенциальными электродами 1 и 2 (анод и катод источника плазмы), образующими полукатодную систему.

Питание ступеней запуска и основного вакуумно-дугового разряда осуществляется от соответствующих блоков, подключенных согласно схеме (см. рис. 1). Включение блоков питания осуществляется блоком управления 24, вырабатывающим сигналы включения–отключения блоков питания ступеней запуска по сигналам, поступающим от датчика давления 21 и датчика тока дуги 23. Остальные элементы (см. рис. 1) имеют общепринятое назначение.

В варианте источника плазмы с комбинированной СП (рис. 2) пусковой электрод третьей ступени размещен между катодом и анодом устройства, причем функции анода здесь выполняет вакуумная камера. При таком расположении электродов при подаче на пусковой электрод пускового импульса в системе электродов при наличии магнитного поля возникает тлеющий разряд пеннинговского типа, переходящий в дуговой с образованием КП на рабочей поверхности катода устройства. Данное решение упрощает конструкцию вакуумно-дугового устройства для нанесения покрытий при сохранении всех его рабочих функций.

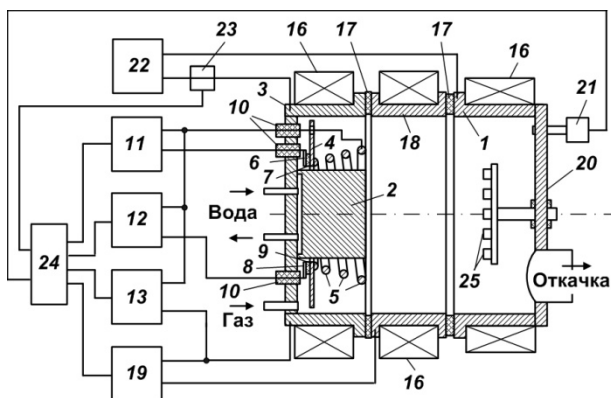


Рис. 2. Вариант конструктивного исполнения источника плазмы с комбинированной СП, позиции соответствуют позициям на рис. 1

### 3. РАБОТА ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ С КОМБИНИРОВАННОЙ СП

Работа источника плазмы разработанной конструкции имеет ряд особенностей. При работе на низких давлениях (менее  $10^{-2}$  Па), например, при ионной очистке, когда эффективность третьей ступени запуска низка, возбуждение дугового разряда осуществляется первой и второй ступенями запуска. При этом, поскольку устройство содержит две первые ступени запуска, то осуществляется поочередное срабатывание каждой по сигналам от блока управления. Отказ одной из них не скажется на работе источника плазмы, поскольку будет продолжать работу другая. В общем случае, такое резервирование позволяет в  $N$  раз повысить ресурс работы первой ступени, где  $N$  – количество первых ступеней. Одновременно при этом повышается надежность срабатывания первых ступеней, поскольку в  $N$  раз будет увеличиваться и время между срабатываниями конкретной первой ступени, что улучшает условия по формированию проводящей пленки в ее разрядном промежутке.

При переходе в режим нанесения покрытия давление в рабочем объеме повышается за счет напуска реакционных газов или их смесей. В этом режиме, при погасании дуги, блок управления по сигналам датчика тока и датчика давления запускает в работу блоки питания третьей и второй ступени запуска. Таким согласованным режимом обеспечивается надежная работа источника плазмы с разработанной СП в течение всего цикла нанесения покрытия. Его ресурс при этом значительно увеличивается, так как при ионной очистке (среднее время проведения порядка 3...5 мин) работают только первая и вторая ступени запуска, а при нанесении покрытия (среднее время проведения 2...40 мин) – только третья и вторая ступени. Такая поочередная работа ступеней, как минимум, в два раза повышает ресурс источника плазмы с комбинированной системой запуска.

Работа СП вакуумно-дуговых устройств на основе ПТД в системе электродов полокатодного и пеннинговского типов ранее исследовалась в [1, 3] и здесь не рассматривается. Особенностью запуска источников плазмы с комбинированной СП является то, что одновременно с третьей ступенью, работаю-

щей на основе ПТД, включается и вторая ступень запуска. В этом случае наличие витка дополнительного электрода второй ступени, расположенного вблизи рабочей поверхности катода и находящегося под положительным потенциалом относительно катода, способствует формированию КП вакуумно-дугового разряда. Данное обстоятельство играет тем более важную роль, чем дальше расположен анод источника плазмы от катода (например, в конструкции источника плазмы исполнения по варианту на рис. 2). Имеет значение и то, что после запуска источника вторая ступень запуска отключается. Этим самым обеспечивается отсутствие тока в цепи дополнительный электрод–катод после запуска источника, что повышает коэффициент использования плазмообразующего материала катода.

Испытания источника плазмы с комбинированной СП (вариант исполнения по рис. 1) в режиме нанесения покрытий, показали, что надежность запуска устройства третьей ступенью при включенной в этот момент второй ступени запуска, определяемая вероятностью зажигания вакуумно-дугового разряда, в диапазоне давлений  $10^{-2}...5$  Па, при наличии магнитного поля величиной  $10^4...10^5$  А/м и амплитуде пусковых импульсов 1,5...2,0 кВ, близка к 100 %. При нанесении покрытий в импульсных режимах ( $t_{и} = 100$  мкс и  $t_{и} = 1$  мс, скважность импульсов равнялась двум) эрозия рабочей поверхности катода равномерна независимо от режима.

### ВЫВОДЫ

Разработана конструкция технологического источника плазмы с комбинированной трехступенчатой СП, которая обеспечивает повышение надежности и ресурса его работы, а также работу в импульсных режимах при нанесении покрытий с любой длительностью импульсов.

В предложенной конструкции в качестве двух первых ступеней СП используется применяемая в штатных источниках плазмы установок «Булат» видоизмененная бесконтактная система запуска с плазменным инжектором. Работа третьей ступени запуска в данной СП основана на переходе тлеющего разряда в дуговой. Согласованная работа ступеней запуска на различных этапах формирования покрытий, обеспечиваемая блоком управления по сигналам датчиков давления и тока, приводит, как минимум, к двухкратному повышению ресурса. Одновременно происходит существенное увеличение надежности комбинированной СП вакуумно-дугового разряда как за счет использования двух первых ступеней запуска, так и за счет применения ПТД в третьей. Кроме того, расширяются функциональные возможности источника плазмы в результате его работы в импульсном режиме при нанесении покрытий.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. И.И. Аксенов, А.А. Андреев, В.А. Белоус, В.Е. Стрельницкий, В.М. Хороших. *Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование*. Киев: «Наукова думка», 2012, 727 с.

2. И.И. Аксенов, В.А. Белоус. Зажигание вакуумной дуги в стационарных источниках металлической плазмы от автономного плазменного инжектора // *ПТЭ*. 1979, №3, с. 160-162.

3. Ю.А. Сысоев. Инициирование вакуумно-дугового разряда в технологических источниках плазмы // *Сб. науч. тр. «Вопр. проектир. и производства деталей констр. летат. аппар.»*. Спец. вып. «Новые технол. в машиностр.». Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2010, в. 3(63), с. 280-295.

4. Ю.А. Сысоев. Высокоресурсные пусковые инжекторы для источников плазмы электротехнологических установок. *Новые электро-*

*технологические процессы в машиностроении*: Тез. докл. Всесоюз. семин. Кишинев: Кишинев. политех. ин-т, 1990, с. 99-100.

5. А.Н. Григорьев, А.К. Турчина. Пусковое устройство для источника металлической плазмы // *ПТЭ*. 2008, №1, с. 147-148.

6. И.И. Аксенов, В.Г. Брень, С.П. Попова, В.М. Хороших. Пусковое устройство вакуумного электродугового плазменного ускорителя // *Источники и ускорители плазмы*. Харьков: ХАИ, 1981, с. 50-55.

7. А.с. 1558284 СССР. Вакуумно-дуговое плазменное устройство / Ю.А. Сысоев, Г.И. Костюк, И.И. Аксенов // *Открытия. Изобретения*. 1988.

*Статья поступила в редакцию 18.01.2013 г.*

## **ТЕХНОЛОГІЧНЕ ДЖЕРЕЛО ПЛАЗМИ З КОМБІНОВАНОЮ СИСТЕМОЮ ЗБУДЖЕННЯ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РОЗРЯДУ**

*Ю.О. Сысоев*

Описано конструкцію та принцип роботи джерела ерозійної плазми з тріступінчатою системою збудження вакуумно-дугового розряду. В якості двох перших ступенів використовується застосовувана в штатних джерелах плазми установок «Булат» видозмінена безконтактна система запуску з плазмовим інжектором, робота третього ступеня запуску заснована на переході тліючого розряду в дуговий. Узгоджена робота ступенів запуску на різних етапах формування покриттів забезпечує істотне підвищення ресурсу та надійності системи ініціювання вакуумно-дугового розряду і розширює функціональні можливості джерела плазми.

## **TECHNOLOGICAL PLASMA SOURCE EQUIPPED WITH COMBINED SYSTEM OF VACUUM-ARC DISCHARGE INITIATION**

*Yu.O. Sysoiev*

The construction and the operation principle of erosion plasma source with a three-stage system of vacuum-arc discharge excitation is described. As first two step was used the modified contactless start system with plasma injector, which was widely used in standard plasma sources of the "Bulat" systems. The operation principle of the third stage was based on the transition of glow discharge to arc discharge. Coordinated operation of three stages during various stages of coating deposition provided significant increasing of service life and reliability of the system of vacuum-arc discharge initiation and extended the functionality of the plasma source.