

УДК 621.793.7

Ю.А. Сысоев, канд. техн. наук,
Г.И. Костюк, д-р техн. наук,
А.В. Белявский,
А.Ю. Сысоев,
Р.В. Воропай,
А.А. Бреус

ПОДАВЛЕНИЕ МИКРОДУГ В ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

ВВЕДЕНИЕ

При проведении ионно-плазменных процессов необходимым этапом является создание рабочей плазменной среды. Такая среда создается с помощью различных форм электрических разрядов. И если некоторые из них, к которым относятся разновидности тлеющего разряда, инициировать не представляет особых затруднений, то зажигание дуговых, особенно вакуумно-дуговых разрядов, как правило, сопряжено с рядом достаточно серьезных трудностей. Игнорирование этой проблемы на годы задержало развитие ряда ионно-плазменных технологических процессов и их автоматизацию [1].

Вместе с тем, во многих технологических плазменных процессах и операциях, где зачастую основная роль принадлежит тлеющему разряду, возникает проблема несанкционированного его перехода в дуговой разряд. Такое самопроизвольное дугообразование наблюдается при азотировании в стационарном тлеющем разряде [2], при ионной очистке перед нанесением покрытия в методе КИБ [3]. Близкие проблемы, связанные с возникновением «униполярных дуг» и, как результат, с последующим загрязнением и охлаждением плазмы, имеют место в исследованиях по управляемому термоядерному синтезу.

В ионно-плазменных технологических процессах подобное дугообразование является одним из основных недостатков, снижающих качество обработки. Снижение качества заключается в том, что возникающие катодные пятна оставляют на обрабатываемой поверхности характерный автограф - эрозионный след в виде «елочки». Таким образом, предотвращение этого отрицательного явления – дугообразования, является актуальной задачей, полноценное решение которой позволит существенно повысить качество обработки изделий в ионно-плазменных технологических процессах.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА К НАСТОЯЩЕМУ МОМЕНТУ

Рассмотрение вопроса самопроизвольного дугообразования в ионно-плазменных процессах показывает, что его решение можно разделить на две задачи. Первая заключается в создании таких условий, когда процесс неконтролируемого дугообразования

максимально затруднен, вторая имеет целью быстрое подавление уже возникшего дугового разряда.

При ионной очистке в методе КИБ срыв несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда низкого давления в дуговой разряд инициируется различными неоднородностями и загрязнениями – диэлектрическими пленками и включениями, микровыступами, источниками локальных газовыделений и др. [3], практически всегда присутствующими на поверхности обрабатываемого изделия. Предварительная подготовка обрабатываемой поверхности – полировка с последующей очисткой в растворителях с применением ультразвуковых ванн, позволяет устранить большую часть этих образований и загрязнений, а значит, и существенно уменьшить вероятность появления микродуговых разрядов.

На данный момент наиболее эффективно первая задача решается при использовании импульсных режимов очистки, когда за импульсом высокого напряжения следует пауза. При этом максимально возможное время импульса выбирается таким, чтобы катодное пятно не успело сформироваться на поверхности обрабатываемого изделия (обычно менее 10^{-3} с). Длительность паузы при этом ограничивается, с одной стороны, быстродействием коммутирующих элементов (порядка долей - единиц микросекунд). С другой стороны, она связана с длительностью импульса тем обстоятельством, что во время отсутствия высокого напряжения на обрабатываемой поверхности идет конденсация пленки из ионов материала катода источника плазмы, которая затем должна быть удалена в течение последующего импульса напряжения. Наряду с несомненными достоинствами такого метода ионной очистки следует отметить и его основные недостатки – увеличение длительности ионной очистки и применение достаточно сложных импульсных блоков питания.

Вторая задача – гашение уже существующего дугового разряда, возникает, когда по тем или иным причинам не удалось предотвратить его появление. Известно, что погасание дуги происходит, в частности, при уменьшении тока разряда и при распаде катодного пятна в результате разрушения катода [4]. Погасить дугу можно, просто кратковременно отключив источник питания. При этом длительность отключения должна быть не меньше времени восстановления электрической прочности промежутка (для технического вакуума несколько сотен микросекунд [5]) с учетом особенностей того или иного техпроцесса.

Возникновение катодного пятна дугового разряда происходит, как отмечено выше, на различных дефектах поверхности (неоднородностях, окисных пленках, загрязнениях и т.п.). В дальнейшем, с различной вероятностью, определяемой рядом факторов (параметры источника питания, давление в рабочем объеме и др.), катодное пятно. При удалении инициировавшей его неоднородность может погаснуть, а

может начать хаотичное движение по поверхности, оставляя свой след и погаснув через некоторое время в силу свойства самопроизвольного погасания дуги. При этом кратковременность существования катодных пятен дуги, особенно при низких давлениях, и сравнительно небольшой в них ток легли в основу термина «микродуга».

В технологических процессах получения покрытий на ионно-плазменных установках серии «Булат» и аналогичных применяется метод снижения дугообразования при ионной очистке предварительной подготовкой поверхности. Одновременно электрические схемы установок позволяют решать вторую задачу - подавлять уже возникший дуговой разряд. Достигается гашение микродуговых разрядов путем применения различных технических решений - кратковременным отключением блока питания ионной очистки, включением в цепь подложки индуктивности, применением колебательных контуров и т.п. При этом использование релейных схем, применение в качестве датчиков тока токовых реле, включение в цепь ионной очистки накопителей энергии не позволяют обеспечить требуемое для обеспечения качества обработки быстрое действие при гашении микродуг.

В данной работе приведены результаты комплексных исследований, направленных на решение второй из выделенных задач, на основании которых был предложен метод эффективного подавления микродуг при ионной очистке, который был положен в основу модернизации штатного блока ионной очистки установки «Булат-6».

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Скорость перемещения катодных пятен

Возникшее катодное пятно микродуги, как уже отмечалось, начинает хаотически перемещаться по поверхности обрабатываемого изделия. При наличии в зоне обработки магнитного поля, которое той или иной величины практически всегда присутствует при реализации технологических процессов осаждения, появляется направленная составляющая этого движения в соответствии с принципом максимума магнитного поля [4]. Длина пройденного катодным пятном дуги пути зависит от его скорости и определяет оставленный им на обрабатываемой поверхности эрозионный след.

К настоящему моменту обнаружены три разновидности катодных пятен. При ионной очистке, при наличии на изделии (катоде) диэлектрических включений и загрязнений появляющиеся катодные пятна относятся к 1-му типу. Этот тип пятен характеризуется значительной скоростью перемещения, лежащей в диапазоне $100 \div 500$ м/с, которая с увеличением магнитного поля возрастает.

Приведенные литературные данные о скорости подтверждают и выполненные нами исследования динамики развития разряда в пусковом инжекторе с помощью лупы времени ЛВ-04. Импульсный

разряд в пусковом инжекторе, разрядный промежуток которого заполнен композиционным материалом [6], где катодное пятно формируется на границе металл – диэлектрик, характеризуется возникновением пятен 1-го типа. Использование в качестве катода внешнего электрода в форме цилиндра с толщиной стенки 1 мм обеспечивает направленное движение катодного пятна по торцу цилиндра. Типичная ЭОП-грамма пускового разряда приведена на рис. 1. Соответствующие этому разряду осциллограммы напряжения и тока показаны на рис. 2.

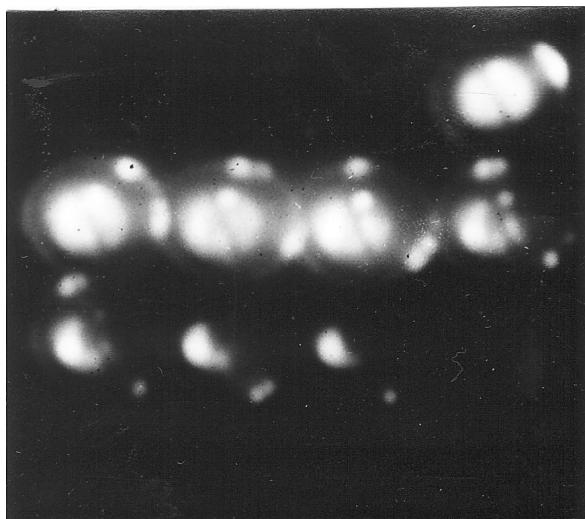


Рисунок 1 – Характерная ЭОП-грамма пускового разряда

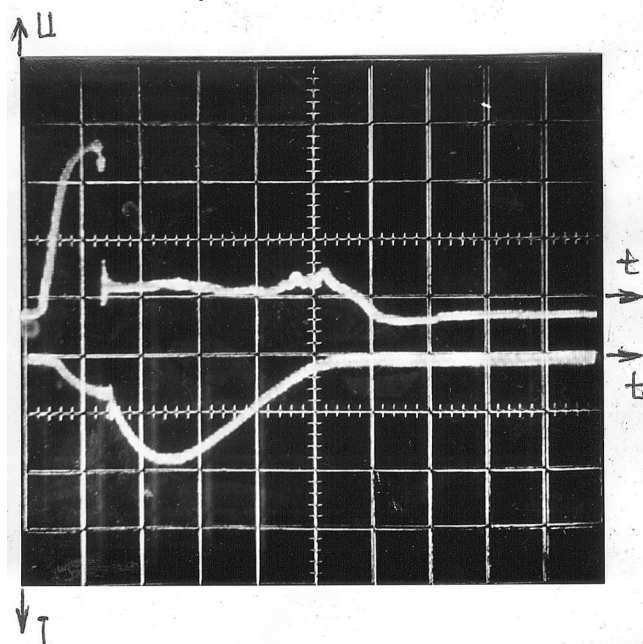


Рисунок 2 – Осциллограммы напряжения и тока пускового разряда

Методика обработки ЭОП-грамм пускового импульсного разряда совместно с осциллограммами процесса для нахождения плотности тока в катодных и анодных пятнах была ранее описана в работе [7]. Для определения скорости перемещения катодных пятен v использовалось соотношение:

$$v = l/n(t_k + t_3),$$

где l – длина пройденного катодным пятном пути, определяемая по ЭОП-грамме; n – количество кадров ЭОП-граммы, в котором наблюдается исследуемое пятно; t_k – длительность кадра; t_3 – задержка между кадрами.

Полученные обработкой ЭОП-грамм скорости перемещения катодных пятен при разряде в пусковом инжекторе при различных энергиях, вкладываемых в разряд, лежат в пределах 110 - 190 м/с. Для примера, ЭОП-грамма, приведенная на рис.1, дает значение скорости порядка 160 м/с.

2.2. Влияние быстродействия систем защиты от микродуг на качество обработки

Характерное время срабатывания релейных систем отключения источника питания ионной очистки доходит до нескольких десятков миллисекунд. За это время катодное пятно 1-го типа может преодолеть путь в несколько метров. Переход на современные быстродействующие коммутирующие элементы – тиристоры и полевые транзисторы, а также использование в качестве индикатора тока датчика Холла, что было выполнено при модернизации штатного блока ионной очистки установки «Булат-6», повышает быстродействие системы защиты до долей микросекунды. В течение этого времени путь катодного пятна не будет превышать длину порядка миллиметра, что существенно позволяет повысить качество обработки изделий при ионно-плазменной обработке.

2.3. Влияние реактивных параметров питающей линии на качество обработки

При эксплуатации в производственных условиях, как правило, все вспомогательные системы располагают в отдельном помещении, соединяя их с рабочей камерой достаточно длинными линиями. Длина этих линий может достигать 10 и более метров. Высоковольтный блок питания ионной очистки подсоединяют к подложкодержателю вакуумной камеры с обрабатываемыми изделиями обычно коаксиальным кабелем. Типичная схема такого подключения приведена на рис. 3.

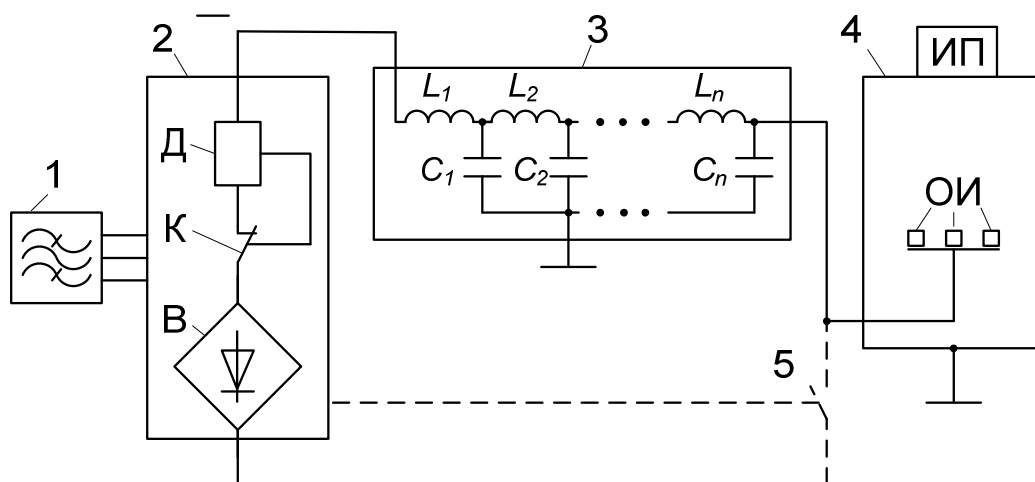


Рисунок 3 – Блок-схема процесса ионной очистки.

1 – 3 - фазная сеть 220/380 В; 50 Гц; 2 – высоковольтный блок ионной очистки, в котором размещены: В – выпрямитель; К – коммутирующий элемент; Д – датчик тока; 3 – соединительная линия; 4 – вакуумная камера с обрабатываемыми изделиями ОИ и источником плазмы ИП; 5 – коммутирующий элемент

Оценим энергию W , запасаемую в такой длинной линии в ходе процесса ионной очистки, имеющей распределенную индуктивность

$$L = L_1 + L_2 + \dots + L_n \quad \text{и} \quad \text{распределенную} \quad \text{емкость}$$

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$

При использовании в качестве соединительной линии коаксиального кабеля его полную индуктивность и емкость можно найти из выражений:

$$L = (\mu\mu_0 l / 2\pi) \cdot \ln(R_2/R_1) \quad \text{и} \quad C = (2\pi\epsilon\epsilon_0 l) / \ln(R_2/R_1),$$

где l - длина кабеля; R_1 - радиус внутреннего провода; R_2 - радиус оплетки; μ - магнитная проницаемость диэлектрика, заполняющего зазор между внутренним проводом и оплеткой; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; ϵ - диэлектрическая проницаемость диэлектрика; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Энергия, запасенная в линии, складывается из энергий, запасенной в магнитном поле индуктивности и электрическом поле конденсатора:

$$W = W_L + W_C.$$

Значения W_L и W_C определяются из выражений:

$$W_L = LI^2/2 \quad \text{и} \quad W_C = CU^2/2.$$

Обладая энергией W , подводящая линия может обеспечивать существование катодного пятна с усредненным током i и падением напряжения на нем u в течение времени t :

$$t = W/i \cdot u.$$

Взяв для оценки имеющиеся на практике или близкие к ним значения $L = 0,3 \cdot 10^{-6}$ Гн/м; $C = 55 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $l = 10$ м; $I = 10$ А; $U = 1500$ В; $i = 10$ А; $u = 30$ В, получим величину t , равную $2,6 \cdot 10^{-6}$ с.

Таким образом, при отключении с помощью коммутирующего элемента К (рис. 3) высоковольтный блока ионной очистки 2 еще в течение нескольких микросекунд будет происходить подпитка катодного пятна. При этом в предположении, что скорость катодного пятна v равна порядка 100...200 м/с, на поверхности обрабатываемого изделия может образоваться эрозионный след протяженностью от долей до одного миллиметра.

Устранить данный недостаток в полной мере можно введением дополнительного коммутирующего элемента 5 (на рис. 3 показан пунктиром), который обеспечивает закорачивание питающей линии со стороны вакуумной камеры при возникновении микродуг.

ВЫВОДЫ

1. На основании выполненного анализа способов подавления самопроизвольно возникающих дуговых разрядов в ионно-плазменных процессах выявлены две основные задачи, первая из которых заключается в создании условий, когда процесс неконтролируемого дугообразования максимально затрудняется, а вторая имеет целью быстрое подавление уже возникшего дугового разряда.

2. С помощью ЭОП-грамм импульсного разряда в пусковом плазменном инжекторе с использованием разработанной методики их обработки определены скорости перемещения катодных пятен 1-го типа, которые для данных условий эксперимента оцениваются значениями, лежащими в интервале $110 \div 190$ м/с.

3. Определено влияние быстродействия системы защиты от микродуг на качество обрабатываемых изделий. С целью повышения быстродействия выполнена модернизация штатного высоковольтного блока установки «Булат-6» на базе современных коммутирующих элементов, что позволило повысить быстродействие системы защиты до долей микросекунды.

4. Оценено влияние энергии, запасаемой в питающей линии, на время существования дугового разряда после отключения блока питания ионной очистки. Предложен способ устранения этого влияния путем введения дополнительного коммутирующего элемента со стороны вакуумной камеры.

5. Намечены перспективы дальнейших исследований в данном направлении, которые заключаются в поиске наиболее эффективного решения первой из выявленных задач, что позволит практически полностью устранить необходимость в решении второй задачи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аксенов И.И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы / И.И.Аксенов. – Х.: ННЦ ХФТИ, 2005. – 212 с.

2. Белевский В.П. Импульсная ионная обработка и осаждение тонких пленок и покрытий / В.П. Белевский, А.И. Кузьмичев, Э.Ф. Масалитин. – К.: Общество «Знание» Украины, 1991. – 22 с.

3. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев. – Х.: ННЦ ХФТИ, 2005. – 212 с.

4. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги / И.Г. Кесаев. – М.: Наука, 1968. – 244 с.

5. Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме / И.Н. Сливков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 256 с.

6. Сысоев Ю.А. Высокоресурсные пусковые инжекторы для источников плазмы электротехнологических установок / Ю.А. Сысоев // Новые электротехнологические процессы в машиностроении: тез. докл. Всесоюз. семин. – Кишинев: Кишинев. политехн. ин-т, 1990. – С. 99 – 100.

7. Костюк Г.И. Методика обработки ЭОП-грамм и осциллограмм импульсного разряда в плазменном инжекторе / Г.И. Костюк, Ю.А. Сысоев // VII Всесоюзная конференция по плазменным ускорителям и ионным инжекторам : тез. докл. VII Всесоюз. конф. 26-28 сентября 1989 г. – Х.: ЦНИИАтоминформ, 1989. – С. 231 – 232.