

## **Процессы микродугообразования в ионно-плазменных технологиях и их подавление**

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

В технологических плазменных процессах с созданием плазмы тлеющим разрядом возникает проблема несанкционированного его перехода в дуговой разряд. Предотвращение этого отрицательного явления – дугообразования – является актуальной задачей, полноценное решение которой позволит существенно повысить качество обработки изделий в ионно-плазменных технологических процессах.

**Ключевые слова:** тлеющий и дуговой разряд, процесс дугообразования, катодные пятна.

### **Введение**

В технологических плазменных процессах с созданием плазмы тлеющим разрядом возникает проблема несанкционированного его перехода в дуговой разряд. Такое самопроизвольное дугообразование наблюдается при азотировании в стационарном тлеющем разряде [1], при ионной очистке перед нанесением покрытия в методе КИБ (конденсация с ионной бомбардировкой) [2]. Близкие проблемы, связанные с возникновением «униполярных дуг» и, как результат, с последующим загрязнением и охлаждением плазмы, имеют место в исследованиях по управляемому термоядерному синтезу [3].

В ионно-плазменных технологических процессах подобное дугообразование, оставляющее на обрабатываемой поверхности эрозионный след, является одним из основных недостатков, снижающих качество обработки. 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. Анализ состояния вопроса к настоящему моменту**

Ранее в работе [4] был рассмотрен процесс самопроизвольного дугообразования в ионно-плазменных технологиях. На основе выполненного анализа проблема неконтролируемого дугообразования была разделена на две технические задачи. Решение первой заключается в создании условий, при которых процесс неконтролируемого дугообразования максимально затруднен (в идеале – полностью отсутствует), вторая задача заключается в быстром подавлении возникшего микродугового разряда. В современных ионно-плазменных технологиях с различной эффективностью решаются обе задачи.

Первопричиной возникновения катодных пятен (КП) дуги являются присутствующие на поверхности обрабатываемого изделия различные неоднородности и загрязнения – диэлектрические пленки и включения, микровыступы, источники локальных газовыделений [2]. Поэтому для решения первой задачи необходимо устранение отмеченных факторов, способствующих дугообразованию.

Достигается это поэтапной подготовкой обрабатываемой поверхности к нанесению покрытия. На первом этапе производят, обычно механическим путем,

снижение шероховатости поверхности с последующей ее очисткой в различных растворителях с применением ультразвуковых ванн. Так, при ионной очистке в методе КИБ срыв несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда низкого давления в дуговой разряд происходит значительно реже, если изделие предварительно было тщательно подготовлено – поверхность отполирована и очищена последовательной промывкой в ацетоне, бензине и спирте.

Во многих ионно-плазменных техпроцессах следующим, финишным этапом очистки является очистка размещенных в вакуумной камере изделий тлеющим разрядом, как правило, в среде аргона. Как отмечается в [5], только обработка тлеющим разрядом позволяет получить поверхность, свободную от диэлектрических пленок.

Для затруднения формирования КП на изделия применяют и конструктивные меры. В частности, известно применение электрически изолированного экрана, размещенного между обрабатываемыми изделиями и стенками вакуумной камеры и имеющего отверстие для входа плазменного потока [6]. Такое решение повышает сопротивление в цепи изделие – стенки вакуумной камеры и, соответственно, уменьшает вероятность появления КП.

В последнее время для решения проблемы микропривязок применяют импульсные режимы ионной очистки [2]. Если длительность импульса высокого напряжения на подложке такова, что времени на формирование КП недостаточно, то такой метод можно отнести к первой технической задаче.

Несмотря на все принимаемые меры по устранению возможности возникновения КП, полностью исключить вероятность появления КП на поверхности изделия в процессе ионной очистки не удастся. В этом случае при возникновении КП на первый план выходит вторая задача – гашение уже существующего дугового разряда. В современных ионно-плазменных установках высоковольтные блоки ионной очистки 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 [6] и т.п. При этом использование релейных схем, применение в качестве датчиков тока токовых реле, а также наличие в электрической цепи ионной очистки накопителей энергии не позволяют обеспечить требуемое для обеспечения качества обработки быстрое действие при гашении микродуг.

В данной работе выполнены исследования процессов образования микродуг на обрабатываемой поверхности и описан метод, позволяющий наиболее эффективно осуществлять подавление возникающих при ионной очистке микродуговых привязок.

## 2. Методика эксперимента

Исследование процессов образования микродуг на обрабатываемой поверхности в процессе ионной очистки выполнялось на установке «Булат-3». В качестве образцов использовались квадратные пластинки размером 15x15x4 мм из нелегированной стали Ст3кп. Поверхность пластинок предварительно полировалась и очищалась растворителями по стандартной методике. Перед размещением на подложкодержателе в камере установки примерно 1/2 поверхности образцов травилось 30 с в 4%-м растворе  $\text{HNO}_3$ , затем образцы тщательно промывались в дистиллированной воде, протирались бязью насухо, потом бязью, пропитанной спиртом-ректификатом.

В качестве материала катода источника плазмы использовался титан марки BT1-00. Ток дуги генератора плазмы равнялся 100 А. Процесс ионной очистки проводился при остаточном давлении в камере  $5 \cdot 10^{-3}$  Па. Время очистки варьировалось в диапазоне 30 – 90 с. Отрицательное напряжение на подложкодержателе имело значение 1,1 кВ либо 2,2 кВ.

В качестве основной системы релейной защиты использовалось реле тока РТ-140/20, отключавшее при срабатывании магнитный коммутатор высоковольтного трансформатора. Дополнительная система защиты представляла собой параллельный колебательный контур, который мог включаться в цепь подложкодержателя.

Состояние поверхности после обработки и элементный микроанализ изучались с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ-106 с системой рентгеновского энерго-дисперсионного микроанализа.

### 3. Результаты исследований

Несмотря на тщательную предварительную очистку поверхности, микродуговые привязки в начальный момент ионной очистки наблюдались на всех образцах, как на полированной поверхности, так и на протравленной. Характерные эрозионные следы, оставляемые КП микродугового разряда на поверхности образцов, при различных способах подавления возникшего микродугового разряда показаны на рис. 1, а – е.

На рис. 1, а показаны эрозионные следы от микродуговых привязок на протравленной поверхности образцов. Увеличенный фрагмент рис. 1, а показан на рис. 1, б. Полученные при аналогичных условиях эксперимента эрозионные следы на полированной поверхности представлены на рис. 1, в. Подавление микродуг в обоих случаях выполнялось основной релейной системой защиты. Сравнение эрозионных следов на протравленных и полированных поверхностях приводит к выводу о небольшом снижении вектора направленного движения КП микродугового разряда в сторону токоподвода.

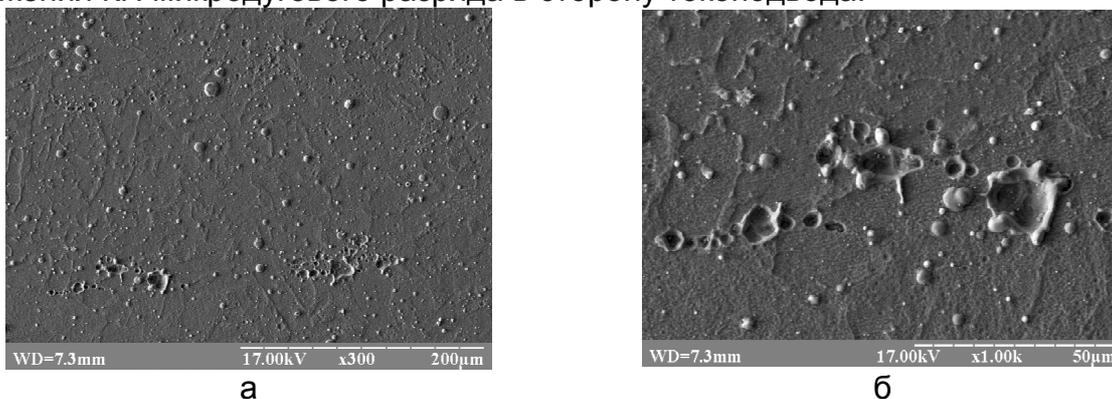


Рис. 1. Характерные эрозионные следы на поверхности образцов:  
 а, б – поверхность после травления,  $U = 1,1$  кВ,  $I_i = 0,8$  А;  
 в, г, е – поверхность полированная,  $U = 0,8$  кВ,  $I_i = 0,4$  А;  
 д – поверхность, покрытая TiN,  $U = 0,8$  кВ,  $I_i = 0,4$  А

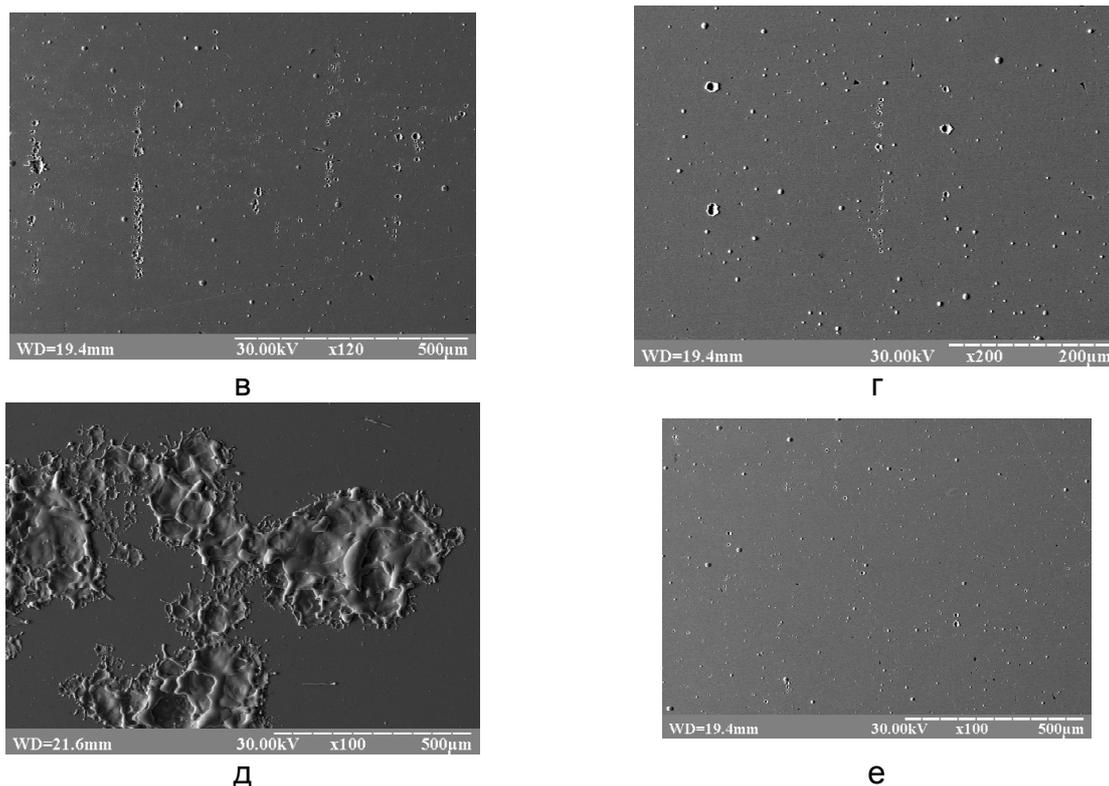


Рис. 1. Окончание

Подключение к основной системе защиты дополнительной защиты с колебательным контуром повышает эффективность подавления возникающих КП, что продемонстрировано на рис. 1, г. Еще видны следы «елочек», однако эрозия существенно меньше.

Наличие на поверхности образца неоднородностей, которые создавались путем нанесения полоски аквадага на образец перед помещением его в камеру, приводит к интенсивному дугообразованию (рис. 1, д). Применявшаяся в этом случае основная релейная система защиты малоэффективна. Поверхность образца, представленного на рис. 1, д, после ионной очистки была покрыта по традиционной технологии КИБ слоем TiN толщиной 3 мкм.

Приведенные на рис. 2, а – г фотографии эрозионных следов, оставленных КП микродугового разряда на поверхности образцов, подтверждает факт возникновения и дальнейшего существования КП на границе металл – диэлектрик.

Диэлектриком в данном случае, очевидно, является пленка  $Al_2O_3$ , что подтверждается микроанализом поверхности в точках 1, 3 и 4 (рис. 2, а), приведенными в табл. 1 и найденными формульными коэффициентами, представленными в табл. 2. Затемненная область на рис. 2, б показывает зону, покрытую пленкой  $Al_2O_3$ .

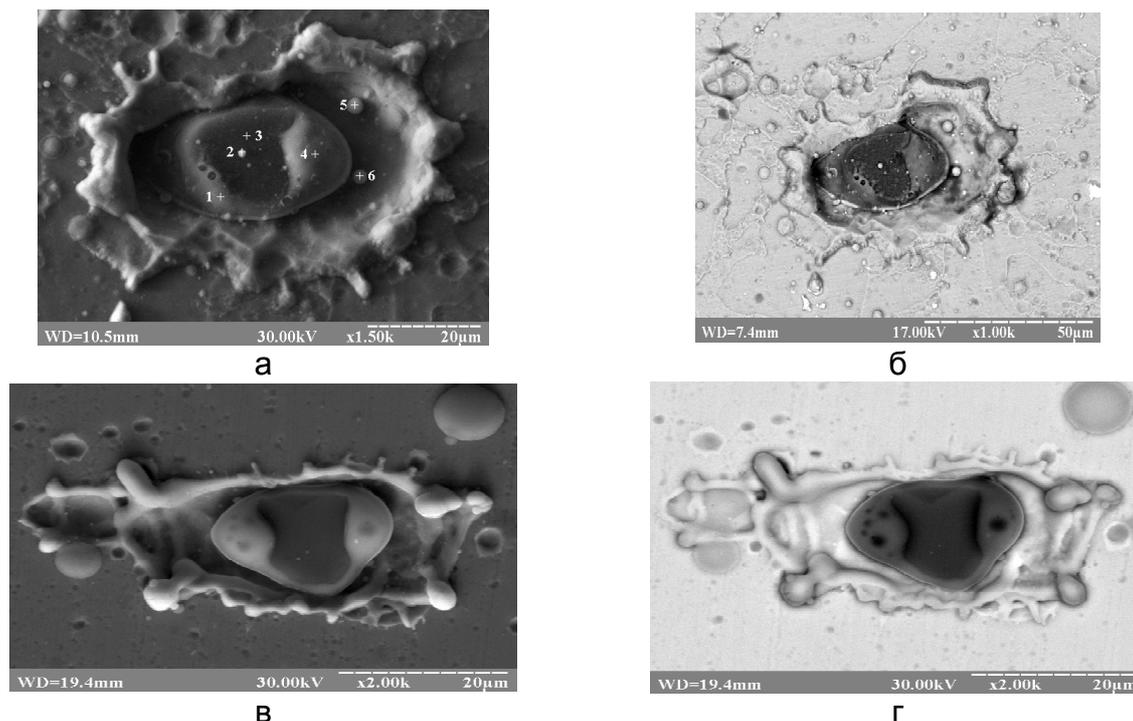


Рис. 2. Привязка микродугового разряда на поверхности образцов в районе диэлектрической пленки:

а,б – поверхность протравлена; в,г – полированная поверхность;

а – цифрами показаны точки микроанализа; а,в - фотография во вторичных электронах;

б,г – фотография в отраженных электронах.

Режим ионной очистки: а,б –  $U = 1,0$  кВ,  $I_i = 0,8$  А,  $t = 90$  с;

в,г –  $U = 0,8$  кВ,  $I_i = 0,4$  А,  $t = 60$  с

Таблица 1

Концентрация элементов по данным микроанализа поверхности в области микродуговой привязки

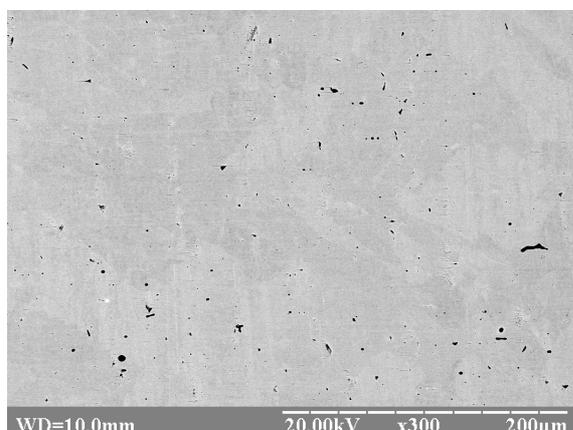
Точка 1			Точка 3			Точка 4		
Информация			Информация			Информация		
Напряжение (кВ): 20.00			Напряжение (кВ): 20.00			Напряжение (кВ): 20.00		
Сумма %: 100.00			Сумма %: 100.00			Сумма %: 100.00		
Элемент	Инт.	С %	Элемент	Инт.	С %	Элемент	Инт.	С %
Mn	K 8844	41.16	Al	K 35480	56.83	Fe	K 9967	33.35
Al	K 13353	19.31	O	K 151	24.81	Mn	K 8970	31.18
Si	K 7150	12.24	Ti	K 2556	8.69	Ti	K 5671	13.20
O	K 95	10.26	Fe	K 1123	4.68	Al	K 8641	8.59
Fe	K 2082	9.37	Si	K 551	1.51	Si	K 4777	4.73
Ti	K 1406	4.57	Mn	K 323	1.40	O	K 49	3.94
S	K 437	1.54	Cr	K 295	1.10	Sn	L 557	2.67
Cr	K 260	1.01	Sn	L 97	0.69	S	K 648	1.35
Mg	K 268	0.38	Ni	K 46	0.29	Cr	K 357	0.99
Ni	K 23	0.17						

Таблица 2

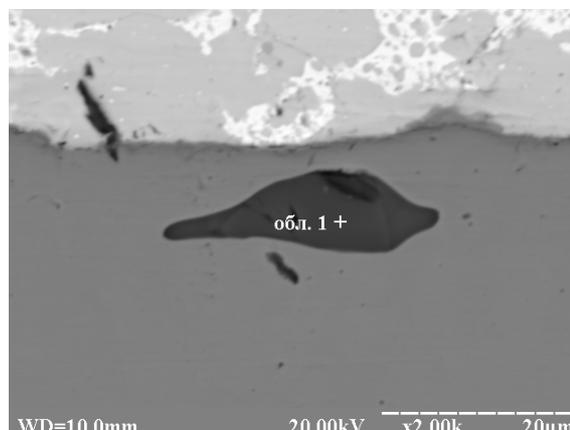
Формульные коэффициенты алюминия и кислорода  
по данным микроанализа в точках 1 и 4

Точка 1					Точка 4																																						
<p>Информация</p> <p>Напряжение (кВ): 20.00</p> <p>Сумма формульных коэффициентов: 5</p> <p>Сумма %: 100.00</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Элемент</th> <th>Инт.</th> <th>C %</th> <th>Атом. %</th> <th>Козф.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Al</td> <td>K</td> <td>13195</td> <td>54.20</td> <td>41.239</td> <td>2.062</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>K</td> <td>147</td> <td>45.80</td> <td>58.761</td> <td>2.938</td> </tr> </tbody> </table>					Элемент	Инт.	C %	Атом. %	Козф.	Al	K	13195	54.20	41.239	2.062	O	K	147	45.80	58.761	2.938	<p>Информация</p> <p>Напряжение (кВ): 20.00</p> <p>Сумма формульных коэффициентов: 5</p> <p>Сумма %: 100.00</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Элемент</th> <th>Инт.</th> <th>C %</th> <th>Атом. %</th> <th>Козф.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Al</td> <td>K</td> <td>8251</td> <td>53.01</td> <td>40.085</td> <td>2.004</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>K</td> <td>99</td> <td>46.99</td> <td>59.915</td> <td>2.996</td> </tr> </tbody> </table>					Элемент	Инт.	C %	Атом. %	Козф.	Al	K	8251	53.01	40.085	2.004	O	K	99	46.99	59.915	2.996
Элемент	Инт.	C %	Атом. %	Козф.																																							
Al	K	13195	54.20	41.239	2.062																																						
O	K	147	45.80	58.761	2.938																																						
Элемент	Инт.	C %	Атом. %	Козф.																																							
Al	K	8251	53.01	40.085	2.004																																						
O	K	99	46.99	59.915	2.996																																						

Интересна первопричина появления на поверхности образцов таких диэлектрических пленок. Поскольку образование пленки оксида алюминия за счет переноса алюминия из катода источника плазмы представляется маловероятным (титан марки ВТ1-00 может содержать в своем составе до 0,3%, титан марки ВТ1-0 – до 0,7% алюминия [7], а температура макрокапель материала катода может достигать несколько тысяч градусов [8]), были выполнены исследования поперечных микрошлифов образцов. Полученные снимки (рис. 3, а,б) показывают наличие в образцах большого количества вкраплений с размерами от единиц до десятков микрометров, содержащих среди прочих элементов много алюминия и кислорода, вполне вероятно, в составе  $Al_2O_3$  (табл. 3).



а



б

Рис. 3. Включения в образцах из Ст3:  
а – общий вид; б – включение вблизи поверхности

Таблица 3

Данные микроанализа вкрапления в области 1,  
показанного на рис. 3, б.

Элемент	Инт.	С %
Mn K	9773	56.15
Al K	11509	20.72
O K	130	12.56
Fe K	1582	8.85
Cr K	293	1.35
Si K	168	0.37

Элемент	Инт.	С %	Атом. %	Кэф.ф.
Al K	20094	58.86	45.896	2.295
O K	168	41.14	54.104	2.705

В общем случае нельзя полностью исключить других механизмов формирования диэлектрических пленок на поверхности изделия. Например, т. к. рассматриваемые процессы происходят в техническом вакууме, не исключается попадание паров масла из диффузионного насоса в рабочий объем с последующим образованием на обрабатываемой поверхности различных пленок. Все это говорит о том, что даже в случае полной предварительной очистки поверхности от диэлектрических пленок, не исключено их возникновение за счет различных механизмов уже в процессе самой ионной очистки.

Выполненные в работе [9] исследования скорости перемещения КП, возникающих на границе металл – диэлектрик и движущихся вдоль этой границы, дают значения скорости в пределах 110 ... 190 м/с. При таких скоростях быстрдействие системы защиты имеет существенное значение. При этом длительность отключения должна быть не меньше времени восстановления электрической прочности промежутка (для технического вакуума несколько сотен микросекунд [5]).

Характерное время срабатывания релейных систем отключения составляет несколько десятков миллисекунд. Переход на современные быстрдействующие коммутирующие элементы – тиристоры и полевые транзисторы, а также использование в качестве индикатора тока датчика Холла повышает быстрдействие 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.

При эксплуатации установок, 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 (за исключением элементов 11 – 13) приведена на рис. 4.

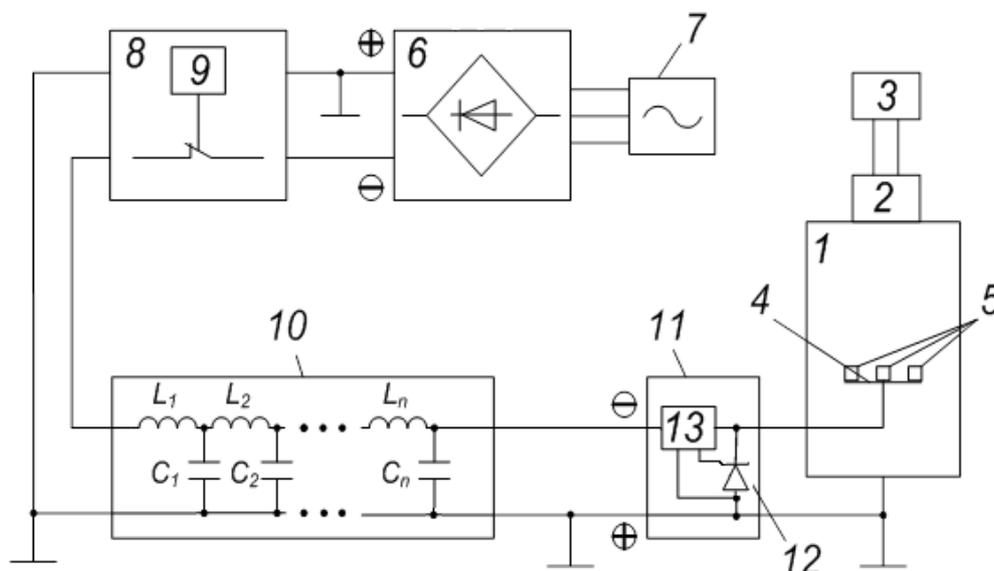


Рис. 4. Схема процесса ионной очистки в технологиях КИБ:  
 1 – вакуумная камера; 2 – вакуумно-дуговой источник плазмы;  
 3 – блок питания дуги; 4 – подложкодержатель; 5 – изделия;  
 6 – блоком ионной очистки; 7 – 3-фазная сеть 220/380 В; 50 Гц;  
 8 – система защиты с блоком управления 9;  
 10 – соединительная линия; 11 – дополнительная система защиты;  
 12 – коммутирующий элемент (тиристор); 13 – датчик тока

Оценка энергии  $W$ , запасаемой в подводящей линии 10 при характерных ее параметрах ( $L = 0.3 \cdot 10^{-6}$  Гн/м;  $C = 55 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $l = 10$  м) и средних режимах ионной очистки ( $I = 10$  А;  $U = 1500$  В;  $i = 10$  А;  $u = 30$  В) показывает, что ее достаточно для поддержания горения возникшего микродугового разряда в течение времени  $2,6 \cdot 10^{-6}$  с.

Для устранения этого явления в [10] предложено использовать дополнительную систему защиты 11, подключенную согласно рис. 4. Такая дополнительная система защиты 11 при возникновении микродуг за счет срабатывания тиристора 12, управляемого датчиком тока 13, закорачивает выход соединительной линии 10, не позволяя энергии, накопленной в линии, запитывать микродуговой разряд. После обрыва тока микродугового разряда обе системы защиты – основная 8 и дополнительная 11 возвращаются в исходное состояние и процесс ионной очистки продолжается.

Эффективность работы дополнительной системы защиты проиллюстрирована на рис. 1, е. Видно, что при ее применении величина эрозионных следов КП существенно снижается по сравнению со случаем ее отсутствия (рис. 1, а – г).

Дальнейшее повышение качества обработки изделий за счет снижения времени существования КП микродуговых разрядов возможно путем повышения быстродействия срабатывания систем защиты, в частности, применением коммутирующих элементов с временем срабатывания на уровне наносекунд [11].

#### 4. Выводы

1. Выполнены исследования процесса микродугообразования при ионной очистке на поверхности образцов в ионно-плазменных технологиях. В начальный момент ионной очистки микродуговые привязки наблюдались на всех исследованных образцах, как на полированных, так и на протравленных поверхностях.

2. Подтвержден результатами электронной микроскопии и элементного микроанализа эффект привязки возникающих катодных пятен микродугового разряда к границе раздела металл – диэлектрик. Рассмотрен вопрос о возможных механизмах образования диэлектрических пленок на обрабатываемой поверхности в процессе ионной очистки.

3. Показано влияние быстродействия системы защиты от микродуг на качество обрабатываемых изделий. Результаты исследований эффективности систем защиты от микродуг показали, что максимальная эффективность достигается в системе с отсечкой энергии, запасенной в подводящей линии.

4. Намечены перспективы дальнейших исследований в данном направлении, которые заключаются в повышении быстродействия срабатывания систем защиты и поиске наиболее эффективного решения первой из выявленных задач.

#### Список литературы

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

2. Андреев, А.А. Вакуумно-дуговые покрытия [Текст] / А.А. Андреев, Л.П. Саблев, С.Н. Григорьев. – Х. : ННЦ ХФТИ, 2010.– 317 с.

3. Недоспасов, А.В. Физика пристеночной плазмы в токамаках [Текст] / А.В. Недоспасов // Успехи физ. наук.– 1987.– Т.152, вып. 3.– С. 479 – 492.

4. Подавление микродуг в ионно-плазменных процессах [Текст] / Ю.А. Сысоев, Г.И. Костюк, А.В. Белявский и др. // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: спец. вып. «Новые технологии в машиностроении»: сб. науч. тр.– Вып. 3 (63).– Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ» , 2010. – С. 304 – 310.

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

6. Барвинок, В.А. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления [Текст] / В.А. Барвинок, В.И. Богданович. – М.: Машиностроение, 1999. – 309 с.

7. ГОСТ 19807-91. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки. Введен 1.01.1992. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 6 с.

8. Сысоев, Ю.А. Динамика температуры капельной фазы вакуумно-дугового разряда [Текст] / Ю.А. Сысоев, М.В. Гончаренко // Теплофизические процессы в технологии авиадвигателестроения: сб. науч. тр. – Х.: Харьк. авиац. ин-т. – 1988. – С.46 – 52.

9. Костюк, Г.И. Методика обработки ЭОП-грамм и осциллограмм импульсного разряда в плазменном инжекторе [Текст] / 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.

10. Пат. Украины 67171, МПК С23С 14/00. Установка для нанесения покрытий / Сысоев Ю.А., Костюк Г.И., Минаев Н.А., Сысоев А.Ю. Заявитель и патентообладатель Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – № u201107165; заявл. 06.06.2011; опубл. 10.02.2012, Бюл. №3, 2012. – 6 с.

11. Грехов, И.В. Полупроводниковые наносекундные диоды для размыкания больших токов [Текст] / И.В. Грехов, Г.А. Месяц // Успехи физ. наук.– 2005. – Т. 175, №7. – С.735 – 744.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., Костюк Г.И.  
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Поступила в редакцию 21.07.12.

## **Процеси мікродугоутворення в іонно-плазмових технологіях та їх придушення**

У технологічних плазмових процесах зі створенням плазми тліючим розрядом виникає проблема несанкціонованого його переходу в дуговий розряд. Запобігання цьому негативному явищу – дугоутворення є актуальним завданням, повноцінне вирішення якого дозволить суттєво підвищити якість оброблення виробів в іонно-плазмових технологічних процесах.

**Ключові слова:** тліючий і дуговий розряд, процес дугоутворення, катодні плями.

## **Mikrodugoobrazovaniya processes in ion-plasma technologies, and their suppression**

In the technology of plasma processes with the creation of a glow discharge plasma is a problem of unauthorized transfer it in an arc discharge. Prevention of this negative phenomenon - the arcing is an urgent task, a complete solution which will significantly improve the quality of processing products in the ion-plasma processes.

**Keywords:** glow and arc discharge, the process of arcing, the cathode spots.