

ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЫ

Электронно-лучевые технологии занимают существенное место в ряду современных высокоэффективных методов металлообработки и получения материалов с новыми свойствами. Расширение области применения такого рода технологий в промышленности необходимо как для повышения качества и надежности изделий, так и для роста их конкурентоспособности, поскольку использование современных технологий, в том числе и электронно-лучевых, соответствует требованиям европейских и международных стандартов качества.

Возможности технологического применения электронно-лучевого воздействия изучались с начала XX века. С развитием вакуумной техники и появления актуальных технических задач соединения, обработки и получения новых материалов в середине XX века начался период активной разработки и промышленного использования электронно-лучевых технологий. В первую очередь это было обусловлено бурным развитием ядерной энергетики и ракетно-космической техники.

За исторически короткий промежуток времени в мире выполнен огромный объем исследований и разработок в области электронно-лучевых технологий, основные из которых направлены на повышение производительности и снижение стоимости оборудования, на повышение качества изделий и разработку новых технологических процессов, а также на создание новых материалов.

Электронно-лучевые процессы осуществляются в вакууме, что, конечно, ограничивает спектр применения таких технологий, но обеспечивает экологическую чистоту производства, высокий уровень комфортности эксплуатации оборудования, а также требует высокой степени механизации и автоматизации всех операций. Высокая концентрация энергии в электронном пучке, локальность нагрева материала, минимальные деформации обрабатываемого изделия, вакуумная защита зоны нагрева, дистанционность ведения технологического процесса, точная управляемость пространственно-энергетическими параметрами электронного пучка, высокий КПД и низкие эксплуатационные расходы обеспечивают конкурентоспособность электронно-лучевых термических технологий. Эти особенности электронно-лучевых технологий принципиально определяют их дальнейшую перспективность.

Широкий спектр технологических возможностей электронно-лучевой термической обработки определил использование электронных пучков во многих технологических процессах [1], в том числе для резки, плавки, сварки и термической обработки – закалки, упрочнения и модификации поверхности. Физические основы обработки материалов

электронными пучками подробно рассмотрены в монографиях [2–6], а также в большом числе научных статей в известных журналах.

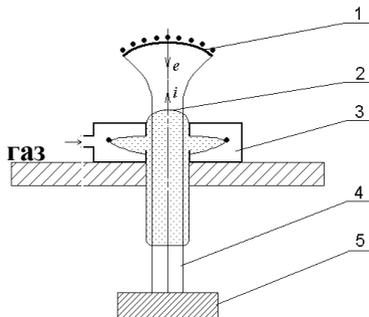
Традиционно в качестве источников электронов в электронно-лучевых установках используются термокатодные электронные пушки, принцип работы которых основан на явлении термоэлектронной эмиссии. В качестве термокатодов, как правило, используются дорогостоящие материалы, такие как молибден, ванадий, лантан и, реже вольфрам, тантал и их соединения.

Одним из основных причин, которые в значительной степени сдерживают расширение области применения электронно-лучевых технологий, являются относительно низкий ресурс наиболее термически напряженного и подверженного ионной эрозии элемента – термокатада (десятки–сотни амперчасов) и высокие требования к качеству и глубине вакуума в рабочей камере. Поэтому практически с самого начала развития электронно-лучевых технологий возникло явное несоответствие между перспективностью широкого применения электронно-лучевых технологий с ограничениями, связанными с оборудованием для их реализации.

Электронные источники, применяемые в промышленности для термического воздействия на материалы должны обеспечивать энергетические и пространственные параметры электронного пучка в течение длительного времени [2, 3]. При высоком вакууме стабилизация параметров источника не представляет больших трудностей. Однако в реальных условиях промышленного производства действует целый ряд дестабилизирующих факторов, таких как «технический» вакуум, направленный парогазовый поток из области расплава, частые разгерметизации рабочей камеры установки, в том числе и аварийные. В этих условиях электронные источники, не имеющие накаливаемых электродов, дают возможность поддерживать постоянные параметры электронного луча более простыми способами, чем источники с термокатадами. Это послужило стимулом для разработки источников электронов, альтернативных традиционным термокатодным пушкам. Исследования, направленные на создание безнакальных электронных эмиттеров проводились практически с самого начала развития электронно-лучевых технологий. В результате этих исследований были разработаны несколько принципиально различных классов электронно-лучевых систем – источники электронов с плазменным эмиттером (ПИЭЛ) [7], источники на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) [8], источники с поверхностным разрядом и на основе взрывной эмиссии (ВЭЭ) [9]. Принципиальным отличием этих источников от термокатодных является использование плазмы для генерации эмиссионного тока, параметры которой, несмотря на различия способов получения, однозначным образом определяют характеристики формируемого электронного пучка.

8.1 Формирование и роль плазмы в источниках электронов.

Источники с термокатодом. Наличие плазмы в источниках с термокатодом не является необходимым условием для их функционирования. Плазма может формироваться в результате ионизации остаточного или выделяющегося из обрабатываемой мишени газа ускоренными электронами пучка (пучковая плазма), т.е. в традиционных электронных пушках высокого вакуума плазменные процессы являются сопутствующими [9]. С повышением давления газа в системе ускорения и транспортировки электронного пучка, все в большей степени проявляются ионно-плазменные явления, которые оказывают существенное влияние на работу пушек и транспортировку пучков. Наличие плазмы в области анода вакуумного диода приводит к поступлению ионов в ускоряющий (межэлектродный) промежуток, частичной компенсации пространственного заряда электронов, перераспределению электрического поля и увеличению тока, пропускаемого диодом. Такой диод называют биполярным и его характеристики существенно отличаются от вакуумного диода. Электронно-оптические системы (ЭОС) с биполярными потоками заряженных частиц обладают улучшенными по сравнению с традиционной оптикой Пирса параметрами [10-12]. Биполярные потоки со встречным движением электронов и ионов, образуемых в результате воздействия электронного пучка на остаточный газ, нейтральную компоненту газонаполненных систем или за счет специально созданных источников плазмы, характерны для пучково-плазменных приборов [13], систем с выпуском электронного пучка в среду с повышенным давлением [14], технологических пушек с широким электронным пучком [15, 16], систем накачки газовых лазеров [17, 18] и т.д.



1 – термокатод, 2 – плазменный анод, 3 – кольцевой газоразрядный источник (плазмогенератор), 4 – электронный пучок, 5 – коллектор (мишень)

Рисунок - 8.1. Электродная структура источника с термокатодом.

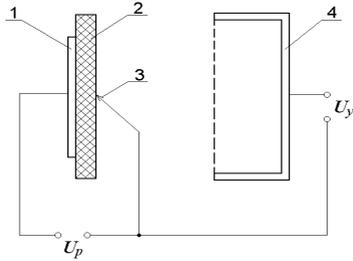
Схема одного из таких источников показана на рис. 8.1. Термоэмиссионным катодом *1* является сферический сегмент с

эмитирующим слоем. Анодом диода служит плазменная поверхность 2, формируемая плазмогенератором 3 – газоразрядным кольцевым источником с отверстиями для выхода плазмы. Плазма в отверстии ускоряющего электрода (анода диода) выполняет в данном случае две функции. Во-первых, ионы, движущиеся к термокатоду из прианодной плазмы, полностью или частично компенсируют отрицательный объемный заряд электронного пучка и существенно увеличивают первичный ток источника (пропускную способность ускоряющего промежутка). Так по данным [12], эмиссионный ток диода с плазменным анодом прямо пропорционально зависит от тока разряда источника плазмы. В случае заполнения плазмой анодного отверстия может быть получен в 5 – 7 раз больший результирующий ток пучка в сравнении с режимом без анодной плазмы. Во-вторых, наличие плазмы уменьшает провисание электрического поля в отверстии ускоряющего электрода. Следовательно, снижается рассеивающее действие этого отверстия и повышается плотность тока которую можно достичь в пучке такого типа вследствие компрессии электронного пучка [19]. Обратный поток ионов из ускоряющего промежутка на катод может служить источником нагрева катода до требуемой температуры [11], исключая из конструкции систему внешнего подогрева и блок питания накала. Такие катоды, в отличие от прямонакальных, позволяют получать электронные пучки с высокой однородностью плотности тока эмиссии по сечению пучка, что особенно важно при формировании широких электронных пучков.

Источники с поверхностным разрядом. В электронно-лучевых устройствах этого типа используется плазма незавершенного разряда по поверхности или плазма искрового разряда в вакууме по поверхности диэлектрика. Одна из возможных электродных конфигураций [11, 20] представлена на рис. 8.2.

К диэлектрическому диску 2 (например, из титаната бария BaTiO_3 , $\epsilon > 10^3$) с одной стороны прижата игла или сетка 3, с другой напылен слой металла 1. Электрический разряд возникает между слоем 1 и иглой 3 при подаче напряжения разряда U_p порядка сотен вольт.

Плазма этого разряда формируется в парах разрушенного поверхностного слоя диэлектрика. Плазма распространяется как по поверхности диэлектрика, так и перпендикулярно поверхности со скоростью $v \approx 10^4$ м/с. Расширяющаяся плазма эффективно эмитирует электроны, извлекаемые и ускоряемые положительным относительно иглы электродом 4.



1 – слой напыленного металла, 2 – диэлектрическая пластина, 3 – игла (сетка), 4 – ускоряющий электрод

Рисунок - 8.2. Типичная электродная структура ПИЭЛ с поверхностным разрядом.

В ПИЭЛ на основе искрового разряда по диэлектрику плотная плазма образуется в парах рабочего вещества (органическое стекло), испаряющегося во время разряда. В этом случае используется аксиально-симметричная конфигурация электродов [7].

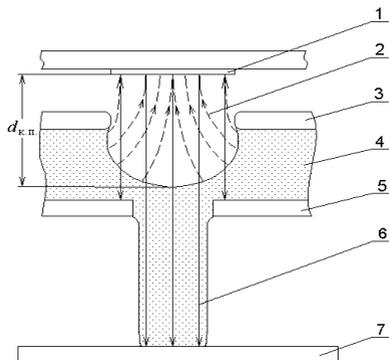
Таким образом, можно получить развитую плазменную поверхность значительной площади, однако при достаточно высокой концентрации плазмы, формируемой за короткое время в ПИЭЛ на основе поверхностного разряда, стационарное извлечение электронов из плазмы затруднено в связи с переключением высокопроводящей плазмой ускоряющего промежутка или развитием в ней неустойчивостей различных типов. Обычно продолжительность импульса тока эмиссии ограничена временем в пределах $\tau_{и} = 10^{-9} - 10^{-6}$ с.

Это же ограничение относится и к источникам со взрывной эмиссией электронов. Их нельзя однозначно отнести к источникам с поверхностным разрядом, так как главную роль в таких источниках играют процессы автоэлектронной эмиссии и взрывного разрушения микроострий, расположенных на поверхности катода при достаточной (критической) напряженности электрического поля. В результате образуется плотная плазма в парах металла катода [7, 20]. Источники электронов на основе ВЭЭ [21-23], обеспечивают наибольшие среди плазменных источников плотности эмиссионного тока в импульсе. Применяются такие источники для накачки эксимерных лазеров, в экспериментах по нагреву плазмы для термоядерного синтеза, для получения рентгеновских импульсов, при решении экологических задач, в частности для утилизации токсичных веществ [24].

Источники электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда просты конструктивно и по набору физических процессов, реализуемых в них. Принцип работы основан на использовании разряда между ненакаливаемыми электродами в газе при низком давлении. ВТР

характеризуется высоким напряжением зажигания и горения (десятки киловольт), сравнительно малой плотностью тока. В разрядном промежутке образуются направленные потоки электронов и ионов, имеющих сравнительно узкий энергетический спектр, поэтому характеристики таких разрядов в значительной степени зависят от электродно - и ионно-оптических свойств электродной системы [7 – 9].

Исследования по разработке и применению источников электронов этого типа представлены в работах [8, 25, 26]. На рис. 8.3 показана типичная схема электродной структуры источника электронов на основе ВТР.



1 – холодный катод, 2 – поток ионов из плазмы, 3, 5, 7 – анодные электроды, 4 – анодная плазма, 6 – пучок электронов, $d_{к.п.}$ – область катодного падения.

Рисунок - 8.3. Электродная схема источника на основе ВТР.

Источники на основе ВТР разделяются на два класса – источники электронов самостоятельного и несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда. Генерация электронов осуществляется при бомбардировке плоского металлического катода быстрыми ионами и нейтралами из плазмы собственно ВТР или из плазмы вспомогательного разряда. В связи с этим к катодам источника на основе ВТР предъявляются особые требования, связанные с возможностью управления эмиссионной способностью катода, максимальным коэффициентом ионно-электронной эмиссии, энергетической эффективностью, теплостойкостью, минимальным распылением и т.д. [25,26]. Электронный поток, эмитированный катодом, ускоряется в катодном падении потенциала. Ток разряда и напряжение горения ВТР изменяется в широком диапазоне в зависимости от размеров, геометрии, материалов электродов, давления и рода газа, временного режима работы источника [7. 8].

Предельные параметры ВТР ограничиваются переходом в низковольтную дуговую форму разряда, вызванным возникновением катодных пятен и перемыканием газонаполненного промежутка ВТР высокопроводящей плазмой.

Для источников данного типа характерна существенная зависимость тока разряда и тока пучка от давления в рабочей вакуумной камере, что обусловлено механизмами формирования и горения ВТР. Это является существенным недостатком, ограничивающим технологическое применение источников, так как большинство технологических процессов воздействия электронным пучком на материалы сопровождается значительной «вспышкой» давления газа в результате процессов дегазации. Тем не менее, источники электронов на основе ВТР находят применение для переплава и испарения металлов, модификации поверхности, возбуждения эксимерных лазеров [17, 18].

Таким образом, плазма в источниках электронов на основе ВТР выполняет несколько функций. Во-первых, является поставщиком ионов для поддержания разряда и обеспечения эффективной электронной эмиссии с поверхности холодного катода, во-вторых, служит элементом электронно-ионно-оптической системы, поскольку конфигурация и положение границы плазмы влияют на распределение электрического поля в области катодного падения и определяет электронно-оптические свойства источника, в-третьих, являясь средой для транспортировки электронного пучка, повышает первичное ускоряющего промежутка за счет компенсации отрицательного объемного заряда пучка ионами плазмы.

Источники с плазменным эмиттером – это газоразрядные устройства, генерирующие плазму, из которой электроны через канал в одном из электродов или через сеточный электрод выходят в ускоряющий промежуток с низким или средним давлением остаточного газа. При наличии электрического поля ускоряющего электрода электроны ускоряются и формируются в пучок. По характеристикам генерируемого электронного пучка источники электронов с плазменным эмиттером разделяются на две группы: со сфокусированными пучками высокой яркости [4, 27], и с пучками большого сечения (ПБС) для термического и электрофизического воздействия на поверхности [9, 12, 27].

Физико-технические задачи, решаемые при создании источников этих групп противоположны. В источниках первой группы для обеспечения высокой плотности тока эмиссии эмитирующая плазма формируется обычно с сильной неоднородностью, в малом объеме и с максимумом плотности в области эмиссионного канала (отверстие в одном из электродов структуры, через которое осуществляется эмиссия электронов из плазмы в ускоряющий промежуток) [7, 29, 30]. Формировать плазму высокой

плотности во всем объеме разрядной камеры нецелесообразно из соображений энергетической эффективности источника и с целью снижения тепловой нагрузки на электроды. Альтернативным вариантом обеспечения высокой плотности тока эмиссии может служить формирование слабых электрических полей в плазме, не нарушающих ее квазинейтральности, но обеспечивающих дополнительный поток плазменных электронов из области плотной плазмы в область эмиссии [31].

В источниках второй группы необходимо формирование эмитирующей плазмы в большом объеме с высокой степенью однородности концентрации заряженных частиц в области эмитирующей поверхности [15, 32,33].

Более подробно принцип работы, конструкции и основные характеристики электронных пушек с плазменным эмиттером рассмотрены в следующем разделе.

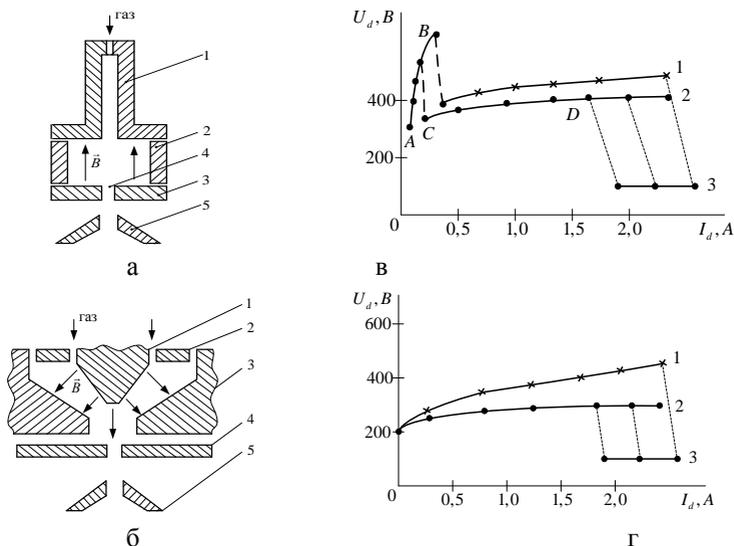
8.2 Электронные пушки с плазменным эмиттером

8.2.1 Принцип работы плазменных источников электронов

В электронных источниках с плазменным эмиттером используются фундаментальные свойства плазмы – при определенных условиях способность эмитировать электроны за пределы плазменного образования [7, 9]. Для получения электронных пучков с плотностью тока и яркостью, по крайней мере, не ниже обеспечиваемых термокатодом, в разряде должна формироваться плазма, обеспечивающая высокую плотность эмиссионного тока (порядка 100 А/см² и выше). Как уже отмечалось, высокие значения концентрации плазмы нецелесообразно обеспечивать во всем объеме разрядной камеры, поскольку снижается эффективность электронного источника, возрастают тепловые нагрузки на электроды. В связи с этим предпочтительным является использование разрядов с большой степенью неоднородности концентрации. Для получения эмитирующей плазмы с высокой плотностью эмиссионного тока использовались различные газоразрядные системы, однако наибольшие практические результаты были достигнуты в плазменных эмиттерах на основе разрядов с полым катодом [7, 30] и в скрещенных $E \times H$ полях [34-36].

В разрядах с полым катодом можно получать сильно неоднородную плазму за счет эффекта полого катода [7, 30, 37], который обусловлен переходом разряда из слаботочной формы в сильноточную, за счет интенсивной ионизации газа в полости, ось которой, как правило, совпадает с осью эмиссионного отверстия. Для возбуждения ионизационных процессов в полем катоде используются различные системы инициирования [7, 38]. Практическое применение нашли схемы инициирования разряда с полым катодом дополнительным отражательным разрядом (рис. 8.4 а). Применение этого разряда, в качестве иницирующего, позволяет

обеспечить требуемые характеристики зажигания и горения разряда с полым катодом, а также относительно просто реализовать возможность автоматического повторного инициирования при случайном погасании разряда с полым катодом [38]. На вольтамперной характеристике разряда (рис. 8.4 в) можно выделить характерные области.



а, в – отражательный разряд с полым катодом [30, 38]: 1 – полый катод, 2 – анод, 3 – отражательный катод, 4 – эмиссионный канал, 5 – ускоряющий электрод. 1, 2 – тлеющий разряд с полым катодом, 3 – дуговой разряд с полым катодом. б, г – разряд в скрещенных $E \times H$ полях [34, 37]: 1 – внутренний катод, 2 – анод, 3 – внешний катод, 4 – эмиттерный электрод с эмиссионным каналом, 5 – ускоряющий электрод. 1, 2 – тлеющий разряд; 3 – дуговой разряд. 1 – $Q = 0.2 \cdot \text{мПа} \cdot \text{м}^3/\text{с}$; 2 – $Q = 0.3 \cdot \text{мПа} \cdot \text{м}^3/\text{с}$.

Рисунок - 8.4. Электродные системы плазменных эмиттеров (а,б) и вольтамперные характеристики газовых разрядов (в,г).

Для разрядов с полым катодом характерно значительное превышение напряжения зажигания над напряжением горения разряда. Участок АВ соответствует тлеющему разряду, ВС – неустойчивая область перехода от тлеющего к разряду с полым катодом, СВ – тлеющий разряд с полым катодом, который при дальнейшем увеличении напряжения переходит в дуговую форму.

В качестве плазменного эмиттера также используются газовые разряды в скрещенных $E \times H$ полях. Высокими технологическими возможностями обладает газоразрядная структура, представленная на рис. 9.4 б, позволяющая получать эмитирующую плазму, отличающуюся высокой стабильностью эмиссионных свойств при повышенных рабочих давлениях [34, 39]. Для данного разряда в отличие от разряда с полым катодом напряжения зажигания не превышает напряжение горения, что позволяет получать электронные пучки как в режиме наводки на стык (с малым током), так и в режиме сварки, а также упрощает систему электропитания газового разряда [40].

В плазменных эмиттерах обоих типов реализуются условия, обеспечивающие увеличение времени жизни электронов в плазме, т.е. среднее время между рождением электрона на поверхности электрода или в объеме разрядной камеры и его уходом на анод или в промежуток ускорения. Тем самым повышается эффективность энерговклада в разряд фактически за счет увеличения длины пробега электронов в плазме, что достигается осцилляциями электронов в специально создаваемых для этого ловушках. Роль ловушек выполняют электрические и магнитные поля специальной конфигурации, создаваемые на основании тех же принципов, что и в магнетронах. Причем как показано в работах Метеля [41], природа ловушки не имеет большого значения, поскольку конечным итогом в любом случае является увеличения интенсивности ионизационных процессов. В источниках с полым катодом создается электростатическая ловушка в полости катода, а в источниках в скрещенных полях, роль ловушки выполняет магнитное поле замагничивающее электроны и препятствующее попаданию их на анод. Необходимо отметить, что в современных конструкциях плазменных эмиттерах, как правило, эти два принципа удержания электронов в плазме используются совместно. Так, например, в разряде с полым катодом формируется магнитное поле с вектором индукции параллельным поверхности анода (см. рис. 8.4а). В плазменных эмиттерах на основе разряда в скрещенных полях (рис. 8.4б) магнитное дополняется электрическим полем, с такой конфигурации, чтобы его силовые линии обеспечивали осцилляции электронов в межэлектродном пространстве. Общим для плазменных эмиттеров обоих типов является то, что магнитное поле в области эмиссионного канала имеет продольное извлечение направление и существенно не влияет на качество электронного пучка [7].

Плазменный эмиттер это не только газоразрядная структура, но и система первичного формирования электронного пучка (эмиттирующая плазменная поверхность, эмиссионный канал определенной геометрии), область ускорения и транспортировки электронов. Поэтому наиболее значительные результаты в конструировании плазменных источников

электронов были достигнуты только после принципиального изменения подхода к созданию подобного рода устройств, согласно которому источники с плазменным эмиттером рассматриваются не как газоразрядные структуры, а как электронные пушки с применением разработанных методик расчета соответствующих систем в термокатодных пушках [3,4,42] и электронных лампах [43].

Для пушек с плазменным эмиттером можно выделить несколько характерных особенностей:

- Электронный ток эмиссии в плазменных эмиттерах всегда является током насыщения, в отличие от тока эмиссии в термокатодных пушках, которые работают в режиме ограничения тока объемным зарядом.
- Средняя начальная скорость электронов, эмиттированных плазмой соответствует средней тепловой энергии плазменных электронов (3 – 5 эВ), что значительно больше средней энергии электронов, эмиттированных термокатодом (0.2 эВ). Однако это обстоятельство не ограничивает применение плазменных эмиттеров для получения электронных пучков с высокой яркостью, поскольку энергия электронов пучка, которую они приобретают в ускоряющем промежутке (10^4 эВ) значительно больше их начальной энергии [7, 38].
- Роль эмиттирующей поверхности в плазменных эмиттерах выполняет подвижная плазменная поверхность, положение которой определяется суперпозицией полей ускоряющего электрода и приэлектродного слоя, отделяющего плазму от всякого электрода газоразрядной камеры. Падение потенциала в приэлектродном слое эмиттерного электрода может изменяться от нескольких сотен вольт (тогда эмиттерный электрод является катодом) до нескольких десятков вольт (тогда эмиттерный электрод выполняет роль анода). В общем случае условие, определяющее положение эмиттирующей плазменной границы, можно сформулировать как равенство нулю напряженности результирующего поля на поверхности плазмы. Из этого условия следует зависимости площади эмиттирующей плазменной поверхности плазмы от параметров плазмы, геометрии эмиссионного канала и системы первичного формирования пучка в целом. На этих зависимостях основан принцип управления эмиссионным током, который применяется в плазменных эмиттерах, и реализуется за счет изменения параметров плазмы (тока разряда) и толщины приэлектродного слоя (потенциала эмиттерного электрода относительно плазмы) [44].

8.2.2 Характеристики источников и параметры электронных пучков

Технологические параметры электронного пучка и физико-технические характеристики источников

Источники электронов с плазменным эмиттером должны обеспечивать параметры, которые необходимы для осуществления определенных режимов электронно-лучевого воздействия. Технологические режимы электронно-лучевого воздействия, как воздействия концентрированным потоком энергии, определяются следующими параметрами: плотность мощности; распределение плотности мощности по сечению; энергия электронов.

Плотность мощности электронного пучка
 $p = j_e U_{ac}$ (U_{ac} – ускоряющее напряжение) определяет технологическую пригодность пучка для реализации конкретной электронно-лучевой технологии. Для большинства ЭЛТ, используемых в машино- и приборостроении, необходимая плотность мощности лежит в пределах 10^6 – 10^{12} Вт/м² [3–5], причем верхнее значение плотности мощности этого диапазона достаточно для плавления материалов (электронно-лучевая сварка, закалка из жидкого состояния).

Распределение плотности мощности по сечению пучка – $\Delta P/P$. В большинстве случаев допустимая неравномерность распределения ограничена значением 10–15 % [5, 15].

Энергия электронов в пучке $W_e = eU_{ac}$. Типичное значение энергии электронов, используемое для осуществления ЭЛТ, находится в диапазоне 20–60 кэВ и определяется в основном требованиями надежности систем электропитания электронно-лучевого энергокомплекса и безопасности их в условиях промышленного производства.

Глубина проникновения электронов в твердое вещество l зависит от ускоряющего напряжения и определяется формулой Шонланда [3, 5]

$$\delta = 2,35 \cdot 10^{-11} U_{ac}^2 \rho^{-1}, \quad (8.1)$$

где U_{ac} – ускоряющее напряжение, В; ρ – плотность вещества, кг/м³. Для различных материалов в твердом состоянии глубина проникновения в диапазоне ускоряющих напряжений 10–30 кВ составляет величину $l \sim 0,3$ – $2,7$ мкм. Причем максимум энерговыделения (на 30–40 % выше, чем у поверхности) приходится на расстояние $l_{\max} \approx (0,1-0,25)l$ от поверхности [5]. Тогда в указанном диапазоне ускоряющих напряжений максимум энерговыделения находится на глубине $l_{\max} \approx 0,03$ – $0,7$ мкм, т.е. источник нагрева можно считать поверхностным. Для жидкого и парообразного

состояний величина проникновения значительно увеличивается (на 1–2 порядка [3]).

К физико-техническим параметрам источников относятся следующие: плотность эмиссионного тока; энергетическая эффективность, связанная с эффективностью переключения; расход плазмообразующего газа, который соответствует давлению газа в технологической камере при использовании определенной откачной системы.

Плотность эмиссионного тока – j_e представляет собой плотность тока насыщения и определяется выражением, соответствующим плотности теплового электронного тока в плазме

$$j_e = en_e \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2}, \quad (8.2)$$

где e – заряд электрона; n_e – концентрация заряженных частиц плазмы ($n_e \approx n_i \approx n$); k – постоянная Больцмана; T_e – электронная температура плазмы; m_e – масса электрона.

Ток эмиссии $I_e = j_e S$ (S – площадь эмиттирующей плазменной поверхности) в общем случае зависит не только от плотности плазмы (величины тока разряда), но и результата суперпозиции поля пристеночного слоя и поля ускоряющего электрода, поскольку последнее определяет величину площади эмиттирующей плазменной поверхности.

Эффективность извлечения – $\alpha = I_e/I_d$ характеризует степень переключения электронов в эмиссионный канал (каналы). Здесь I_e эмиссионный ток, совпадающий с током пучка, поскольку источники электронов с плазменным эмиттером работают в режиме насыщения, I_d – ток разряда.

Энергетическая эффективность. Параметр характеризует энергию, которую нужно затратить от источника питания газового разряда плазменного эмиттера для получения одного ампера (миллиампера) эмиссионного тока электронов и определяется соотношением [7, 9]

$$H_s = \frac{I_e}{P} = \frac{\alpha}{U_d}, \quad (8.3)$$

где P – мощность, затраченная на формирование плазмы (мощность, потребляемая разрядом); U_d – напряжение горения разряда.

Величина расхода плазмообразующего газа Q характеризует газовую экономичность ПИЭЛ и определяется необходимым давлением в газоразрядной структуре. Однако, поскольку

расход плазмообразующего газа в реальных конструкциях крайне мал, то данная характеристика источника отражает главным образом перепад давления, который создается в пламенном эмиттере между газоразрядной структурой и рабочей камерой системой первичного формирования пучка, а также тип используемого для напуска газа. Кроме этого расход плазмообразующего газа определяет необходимые характеристики технологической вакуумной системы, в первую очередь, требуемую производительность.

Комплексные параметры электронного пучка

При оценке технологической пригодности электронного пучка для реализации конкретного технологического процесса, как правило, ограничиваются сравнением плотности мощности пучка p и энергии электронов в пучке W_e с требуемыми параметрами [4]. Однако на стадии проектирования электронно-лучевых устройств, оптимизации геометрии ЭОС для повышения эффективности электронной пушки в конкретных газодинамических условиях, а также при разработке новых технологий возникает необходимость получать, сравнивать и корректировать как более частные параметры (расходимость, распределение плотности тока, электронную температуру плазмы, предельный диаметр пучка), так и комплексные характеристики (эмиттанс, яркость), априори определяя качество, в частности, электронно-оптической системы и в целом электронного пучка. Для оценки каждой из частных характеристик существуют разработанные методы, позволяющие исследовать их в зависимости от внешних условий [4]. Однако все эти параметры взаимосвязаны и изменение одного приводит к изменению другого. Такая ситуация делает затруднительным сравнение качества пучков на основе одного из параметров. Поэтому для получения целостной характеристики качества пучка и их сравнительного анализа целесообразно использовать комплексные характеристики, к которым, в частности, относятся яркость и эмиттанс.

Яркость пучка – величина, соответствующая току пучка, который проходит в единичный телесный угол, опирающийся на единичную площадь

$$B = \frac{dI}{d\Omega dS}, \quad \left[\frac{A}{m^2 \cdot \text{рад}^2} \right] \quad (8.4)$$

где $d\Omega$ – телесный угол, в котором проходит пучок, dS – площадь, на которую опирается телесный угол.

Другой комплексной характеристикой пучка является *эмиттанс* [7, 9, 45]. В первом приближении эмиттанс представляет собой площадь фазового портрета (рис. 8.5) электронного пучка в плоскости

(x, x') и/или при необходимости в плоскости (y, y') , если пучок не обладает радиальной симметрией.

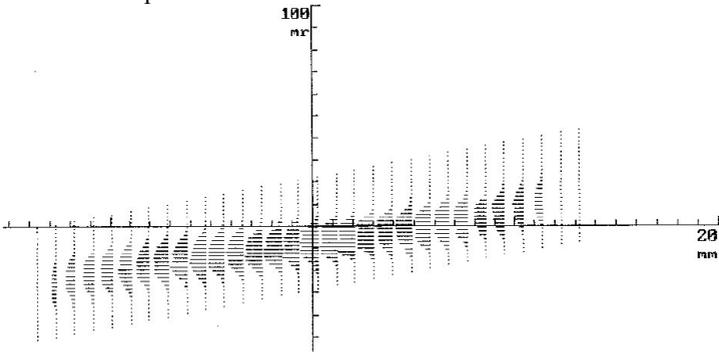


Рисунок - 8.5 – Фазовый портрет электронного пучка в координатах (x, x') [45, стр. 99]

В данном случае x и y координаты (на рис. 8.5 указаны в мм) в плоскости, перпендикулярной направлению распространения пучка (ось z), а x' и y' компоненты радиальной скорости электронов пучка (на рис. 8.5 указаны в мрад), которые определяют расходимость пучка $(\Delta\Theta_{x,y})$ в плоскостях xz и yz соответственно. Таким образом

$$\varepsilon_x = \frac{1}{\pi} \int dx dx' \quad \varepsilon_y = \frac{1}{\pi} \int dy dy' \quad \varepsilon_4 = \varepsilon_x \varepsilon_y \quad (8.5)$$

Если фазовый портрет представляет собой эллипс, то яркость и эмиттанс связаны между собой соотношением:

$$B = \frac{dI_e}{d\Omega dS} \approx \frac{I_e}{(\pi\Delta r^2)(\pi\Delta\Theta^2)} \approx \frac{I_e}{\pi(x_0 x'_0)\pi(y_0 y'_0)} = \frac{I_e}{\pi^4 \varepsilon_x \varepsilon_y} \quad (8.6)$$

Для оценки яркости осесимметричного пучка можно использовать выражение

$$B = \frac{I}{\pi^4 \varepsilon_x^2} \quad (8.7)$$

Измерения эмиттанса возможно осуществить несколькими методами. Одним из наиболее точных и легко реализуемых технически является метод движущихся зонда и щели, показанный на рисунке 8.6 [45, 46]. Поскольку скорость движения зонда U_2 значительно больше скорости движения щели U_1 , то зонд может зафиксировать распределение тока для некоторого квазистационарного положения щели. При этом в процессе измерения эмиттанса, кроме фазового портрета пучка можно получить

много больше дополнительной информации, которая позволит провести комплексную оценку и сравнительный анализ формируемых электронных пучков.

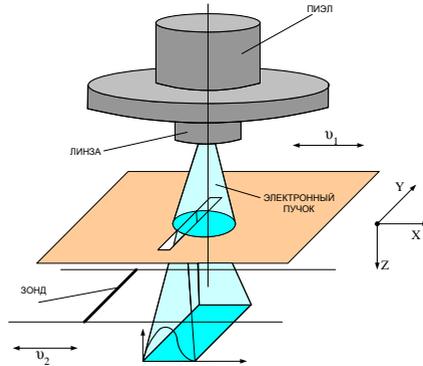


Рисунок - 8.6 – Схема метода определения эмиттанса

В частности, если расходимость пучка x'_{\max} обусловлена тепловыми скоростями эмитированных из плазмы электронов, то угол расходимости пучка можно оценить как

$$\Delta\theta = x'_{\max} = \frac{\bar{v}_x}{v_z} = \frac{1}{v_z} \sqrt{\frac{2kT_e}{\pi m_e}} = \sqrt{\frac{2kT_e}{\pi m_e v_z^2}} = \sqrt{\frac{kT_e}{\pi e U_{\text{уск}}}} \quad (8.8)$$

откуда получаем выражение для оценки электронной температуры T_e (в эВ) в плазме.

$$kT_e = \pi e U x'_{\max}{}^2 \quad (8.10)$$

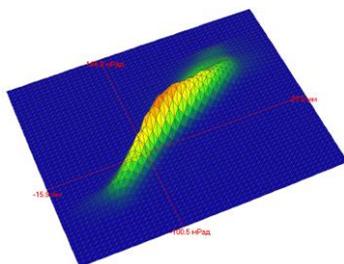
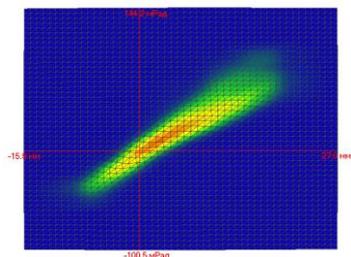
Для оценки диаметра пучка в месте нахождения зонда определяется x_{\max} и

$$d = 2x_{\max} \quad (8.11)$$

Для расчета эмиттанса определяем площадь фазового портрета на заданной высоте сигнала (например, $0,01j_{\max}$) согласно, например, первой формуле из (8.5). Для расчета яркости используем приведенное ранее соотношение (8.7).

Из рис. 8.6 видно, что получаемые распределения являются трехмерными. При этом вид распределения вдоль оси x (большой оси эллипса) позволяет визуально, но с высокой степенью достоверности, оценить однородность распределения плотности тока пучка по его сечению и сделать соответствующие выводы о влиянии изменяемых параметров на распределение плотности тока, что иллюстрируется на рис. 8.7 сравнение площадей и объемом получаемых распределений [47]. В частности видно, что сравнение численных значений яркости и эмиттанса не дает

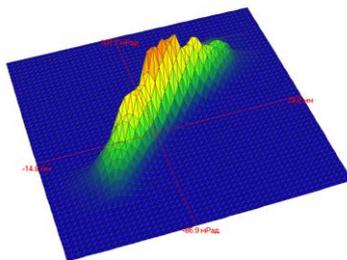
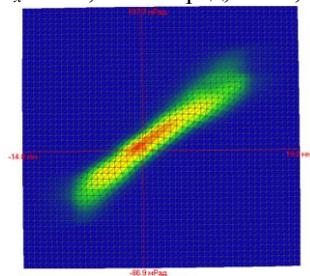
необходимого представления о качестве формируемого электронного пучка и точности юстировки ЭОС, тогда как сравнение трехмерных портретов пучков позволяет осуществить полный сравнительный анализ.



а – плохая юстировка ЭОС

$i_e = 85 \text{ мА}$, диаметр несфокусированного пучка – 26,2 мм,

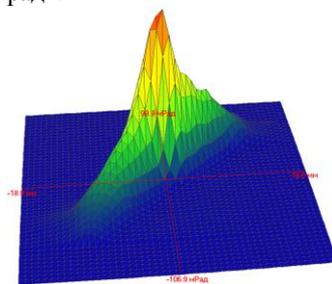
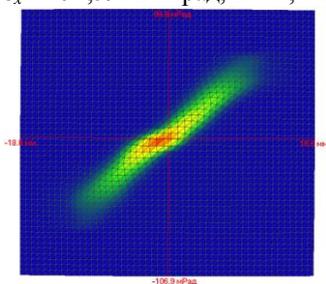
$\varepsilon_x = 177,55 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$, $V = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ А} \cdot \text{мм}^{-2} \cdot \text{мрад}^{-2}$



б – недостаточно точная юстировка ЭОС

$i_e = 40 \text{ мА}$, диаметр несфокусированного пучка – 28,7 мм,

$\varepsilon_x = 194,59 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$, $V = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ А} \cdot \text{мм}^{-2} \cdot \text{мрад}^{-2}$.



в – хорошая юстировка ЭОС

$i_e = 30 \text{ мА}$, диаметр несфокусированного пучка – 22,7 мм,

$\varepsilon_x = 156,22 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$, $V = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ А} \cdot \text{мм}^{-2} \cdot \text{мрад}^{-2}$

Рисунок 8.7 – Трехмерные изображения фазовых портретов для электронных пучков различного качества. $U_{ac} = 16 \text{ кВ}$

Основные характеристики плазменных источников электронов

Характеристики источника электронов отображают, как правило, эмиссионную способность используемого в нем эмиттера и закономерности токопрохождения. Применительно к ПИЭЛ можно выделить три основные характеристики: эмиссионную, вольтамперную и газовую [7].

Эмиссионная характеристика $I_e(I_d)$ устанавливает связь тока эмиссии с током разряда, формирующего эмиттирующую плазму при постоянном потенциале ускоряющего электрода, и отражает возможность управления током эмиссии варьированием параметров газового разряда. Необходимо отметить, что несмотря на линейную зависимость плотности тока эмиссии j_e от концентрации плазмы n_e , вид эмиссионной характеристики в общем случае оказывается неадекватным зависимости $n_e(I_d)$ и может существенно изменяться для различных типов разрядных систем. Это обусловлено тем, что увеличение концентрации плазмы приводит к снижению потенциального барьера у эмиттирующей поверхности вследствие уменьшения про тяженности пристеночного слоя у эмиттерного электрода [9]. Кроме этого изменение разрядного тока может вызывать перераспределение токов на отдельные электроды разрядной камеры, вследствие чего плотность плазмы и ее потенциал вблизи эмиттерного электрода могут изменяться [31], что соответствующим образом отражается на величине тока эмиссии. Эти и другие факторы приводят к отклонению эмиссионной характеристики от линейной функции разрядного тока.

Вольтамперная характеристика $I_e(U_{ac})$ источника электронов связывает ток эмиссии с ускоряющим напряжением. С точки зрения технологического использования наиболее привлекательным является выбор рабочего значения ускоряющих напряжений в области, где ток пучка слабо зависит от ускоряющего напряжения, т.е. на вольтамперной характеристике должна присутствовать область с малой или нулевой крутизной (область квазинасыщения) для снижения влияния пульсаций ускоряющего напряжения на мощность и плотность мощности пучка.

Газовая характеристика $I_e(p)$ плазменного источника связывает ток эмиссии с давлением газа p в системе.

Альтернативой этой зависимости является $I_e(Q)$, поскольку расход плазмообразующего газа является непосредственно измеряемой величиной, которую контролировать гораздо легче, чем давление в технологической камере, которой подвержено динамическим изменениям в процессе технологической операции. При этом расход газа однозначно определяет

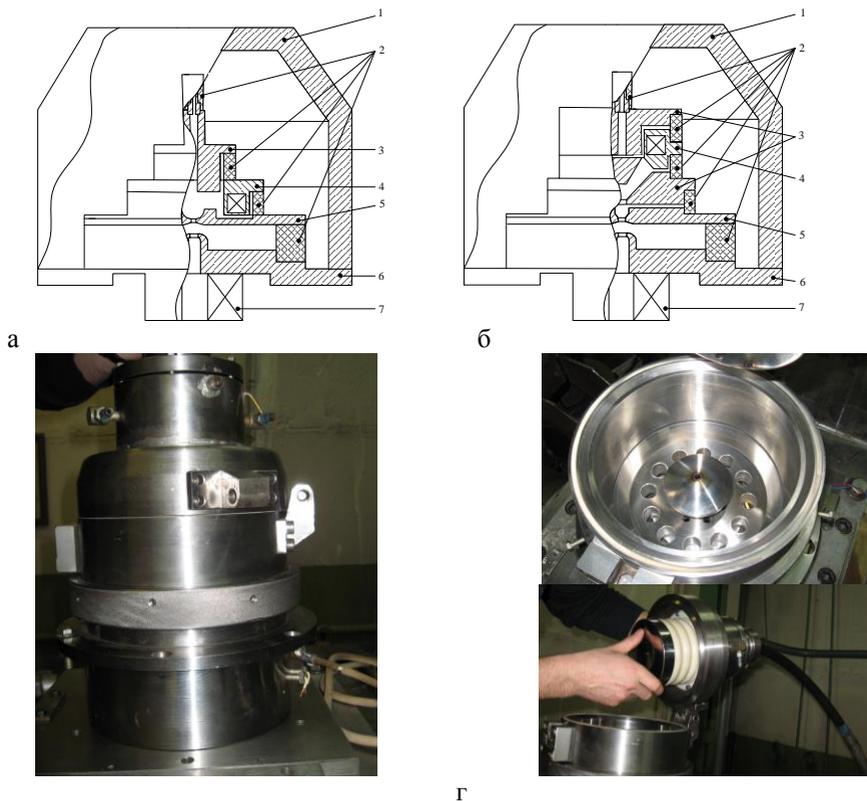
давление в газоразрядной и технологической камерах при постоянстве мощности откачных систем и неизменной геометрии отверстий, связывающих плазменный эмиттер и технологическую камеру. Можно выделить ряд факторов, влияющих на вид газовой характеристики. Во-первых, изменение давления в генераторе плазмы может влиять на плотность и потенциал формируемой плазмы и, соответственно на плотность тока и ток эмиссии. Во-вторых, изменение давления может приводить к перераспределению токов на электроды газоразрядной камеры, что отразится на эффективности эмиссии электронов из плазмы через эмиссионный канал [7]. В третьих, и этот фактор рассматривается наиболее часто, интенсивность ионизации газа в ускоряющем промежутке и пространстве дрейфа пучка пропорциональна давлению газа. Поэтому изменение давления приводит к изменению первеанса (пропускной способности) ускоряющего промежутка, формированию потока ионов в плазму, возмущающего ее эмиссионную способность и изменяющего свойства электронно-оптической системы пушки [7, 9]. Аналогично вольтамперной характеристике технологически интересной является область давлений, где крутизна газовой характеристики минимальна. Поэтому среди разработчиков плазменных источников электронов последние годы являются популярными исследования, направленные на расширение диапазона рабочих давлений в область повышенных значений до 1 Па и даже 10 Па [48], что было ранее недоступно для электронно-лучевых устройств без дополнительных сложных систем дифференциальной откачки.

8.2.3. Конструкции и основные характеристики источников электронов с плазменным эмиттером.

Электронные пушки, формирующие сфокусированные пучки

К настоящему времени создано большое количество разнообразных конструкций ПИЭЛ [7, 9, 34, 38], что обусловлено, во-первых, значительным различием требований к их электрофизическим и эксплуатационно-техническим характеристикам, а во-вторых, принципиальной невозможностью обеспечения широкого комплекса требований на основе единого комплекса физических процессов и конструктивных решений. Тем не менее, определенные группы источников обладают рядом общих физических принципов, что положено в основу известных классификаций ПИЭЛ [7]. И хотя классификации достаточно условны, лежащие в их основе обобщения позволяют определить и существенно ограничить объем исследований, направленных на создание и оптимизацию ПИЭЛ для новых конкретных целей и применений.

На основе газоразрядных структур, представленных на рис.8.4, разработан ряд конструкций электронных источников с плазменным эмиттером, обладающих широким спектром технологических возможностей (рис. 8.8) [34, 49].



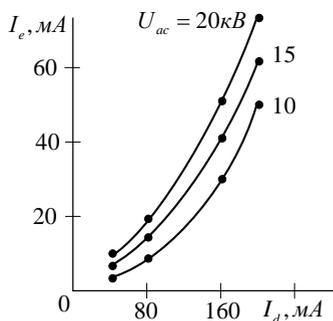
а – схема пушки на основе отражательного разряда с полым катодом, б – схема пушки на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях, в- внешний вид сварочной пушки с плазменным катодом, г - внешний вид элементов конструкции пушки: ускоряющего электрода (вверху) и высоковольтного изолятора с эмиттерным электродом (внизу), 1 – корпус, 2 – изоляторы; 3 – катоды; 4 – анод; 5 – эмиттерный электрод; 6 – ускоряющий электрод; 7 – линза

Рисунок 8.8 - Конструкции источников электронов (а,б) и внешний вид пушки и отдельных элементов конструкции (в,г)

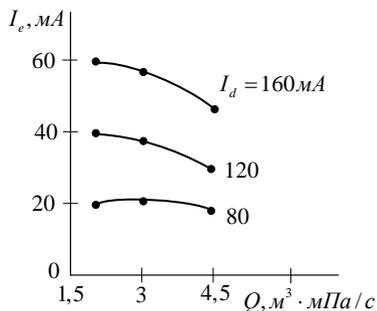
На рис. 8.8а представлена конструкция плазменного источника

электронов, на основе разряда с полым катодом, которая применяется, в том числе и в серийном производстве [49]. Эмиссия электронов осуществляется через эмиссионный канал в электроде под катодным потенциалом, поэтому данная конструкция обеспечивает получение сфокусированных электронных пучков с высокой яркостью.

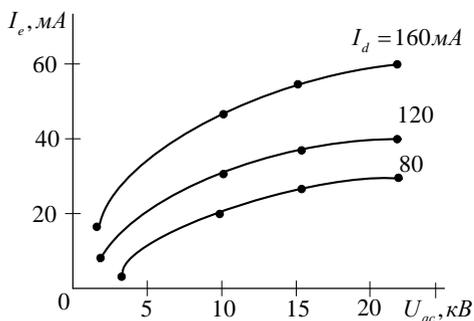
На рис. 8.9 представлены типичные характеристики источников электронов на основе разряда с полым катодом. К основным достоинствам такого типа источников следует отнести следующие: линейный вид эмиссионной характеристики (рис. 8.9а), что обеспечивает эффективное управление мощностью электронного пучка за счет изменения тока разряда и наличие области квазинасыщения на вольтамперной характеристике (рис. 8.9.б). Электронная пушка с полым катодом стабильно работает в широком диапазоне напусков газа, что иллюстрируется видом газовых характеристик на рис. 8.9 в.



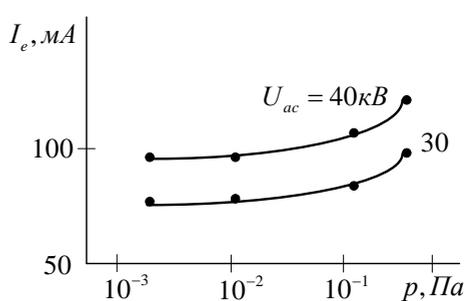
а



в



б



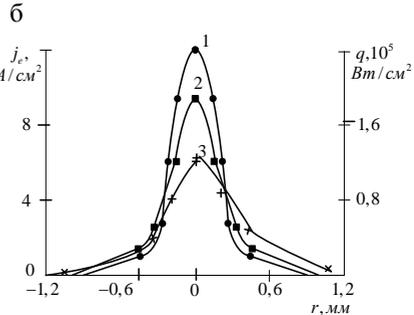
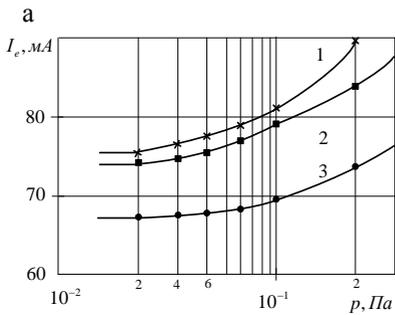
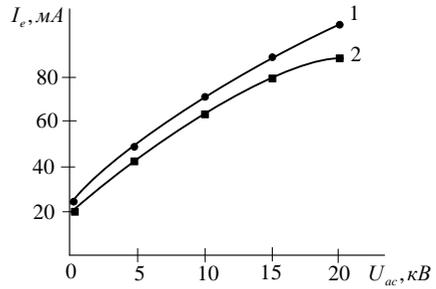
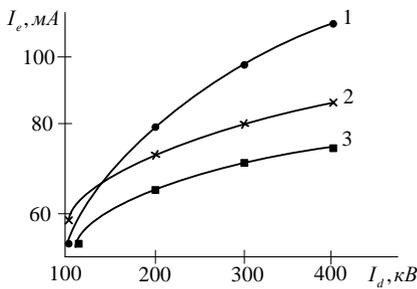
г

Рисунок 8.9 - Типичный вид характеристик плазменного источника электронов на основе разряда с полым катодом [7]: а – эмиссионная характеристика, б – вольтамперная характеристика, в и г – газовые характеристики

Конструкция плазменного источника электронов на основе разряда в скрещенных полях, представленной на рис. 8.4б, показана на рис. 8.8б [34, 35]. Источник отличается тем, что извлечение электронов осуществляется через эмиссионный канал в эмиттерном электроде с анодным или близким к нему потенциалом. Для повышения стабильности и улучшения параметров электронного пучка в конструкции реализована возможность автоматической регулировки потенциала эмиттерного электрода включением сопротивления смещения R в его цепь [50]. Данная конструкция плазменного источника электронов значительно снижает эрозию эмиттерного электрода, обусловленную его бомбардировкой ионами из ускоряющего промежутка, что позволяет существенно повысить долговечность источника и расширить диапазон рабочих давлений, при которых параметры электронного пучка остаются устойчивыми.

На рис. 8.10 представлены типичные характеристики источников на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях. Эмиссионные характеристики (рис. 8.10а) имеют участок, близкий к линейному, с крутизной существенно меньшей в сравнении с пушками на основе разряда с полым катодом. В ряде случаев, например в условия нестабильности давления, или при наличии микропробоев ускоряющего промежутка, при таком виде эмиссионной характеристики стабильность тока пучка оказывается выше, чем в пушках с термокатодом. При реализации смещения потенциала эмиттерного электрода источника, крутизна зависимости $I_e(I_d)$ несколько уменьшается, что незначительно снижает управляемость током пучка (рис. 8.10а, кривые 2, 3), однако повышает стабильность эмиссионных параметров источника. Зависимость тока пучка от ускоряющего напряжения (рис. 8.10б) имеет область квазинасыщения. Основное преимущество данного источника – слабая зависимость эмиссионного тока от давления вплоть до $p = 0.3$ Па, что иллюстрируется рис. 8.10в. Эта особенность реализуется как за счет особой конфигурации электродов разрядной камеры, так и вследствие использования в системе дополнительной (неэлектротехнической) стабилизации параметров электронного пучка (включением сопротивления R в цепь эмиттерного электрода относительно анода) [50]. На рис. 8.10 г представлены также распределения плотности тока и плотности мощности электронного пучка по сечению. Анализ распределений показывает, что максимальное значения $q_{max} \approx 10^9$ Вт/м² и эффективный диаметр электронного пучка (который определяется на уровне 0,1 q_{max}) соответствует типичным значениям плотности мощности электронных пучков, применяемых для электронно-лучевой сварки [4]. Это, а также вид газовой характеристики позволяет применять данный источник для сварки, в том числе и

материалов с повышенным газоотделением в процессе термообработки.



в

г

а – эмиссионная характеристика $U_{ac} = 18 \text{ кВ}$; $Q = 0.15 \text{ м}^3 \text{ мПа/с}$;

1, 2 – $p = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$; 3 – $p = 10^{-1} \text{ Па}$; 1 – $R = 0$; 2, 3 – $R = 1 \text{ кОм}$;

б – вольтамперная характеристика

$Q = 0.15 \text{ м}^3 \text{ мПа/с}$; $I_d = 0,2 \text{ А}$; 1 – $p = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$; 2 – $p = 10^{-1} \text{ Па}$; 1 – $R = 0$; 2 – $R = 1 \text{ кОм}$;

в – газовая характеристика $U_{ac} = 16 \text{ кВ}$; $Q = 0.15 \text{ м}^3 \text{ мПа/с}$;

1 – $R = 0$; 2 – $R = 0,5 \text{ кОм}$, 3 – $R = 1 \text{ кОм}$;

г – распределение плотности тока и плотности мощности по сечению

сфокусированного пучка $U_y = 18 \text{ кВ}$; $Q = 60 \text{ атм} \cdot \text{см}^3/\text{ч}$;

$I_d = 0,2 \text{ А}$; $I_e = 0,08 \text{ А}$; 1 – $R = 1 \text{ кОм}$; 2 – $R = 0,5 \text{ кОм}$, 3 – $R = 0$.

Рисунок 8.10 - Основные характеристики плазменного источника электронов на основе разряда в скрещенных полях [34]:

Электронные пушки, формирующие пучки большого сечения

В наибольшей степени преимущества ПИЭЛ проявляются в технологиях, где требуется термическое воздействие на большие площади. В отличие от термокатодных пушек, использование которых в таких технологиях

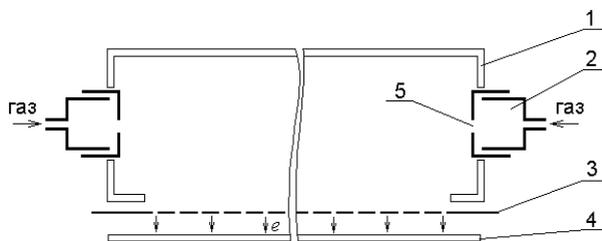
предполагает различные методы сканирования пучка по обрабатываемой площади [3,4,51], в ПИЭЛ электронные пучки достаточно большого сечения можно получить в соответствующих газоразрядных структурах [15, 33, 35, 36, 38].

Для получения электронных пучков большого сечения (ПБС) применяют специальные газоразрядные структуры, инициирующие разряд в большом основном объеме источников с ПБС. При формировании широких электронных пучков большого сечения, как правило, не удастся обеспечить значительный перепад давления между разрядной камерой и ускоряющим промежутком. Это обусловлено низким динамическим сопротивлением течению газа сеточных или перфорированных электродов с высокой геометрической прозрачностью. В результате при сохранении электрической прочности ускоряющего промежутка, формирование эмитирующей плазмы затруднено вследствие низкого давления газа. Поэтому для получения плазмы требуемой плотности используют инициирующие структуры, которые могут служить или источником плазмы или источником электронов. В обоих случаях инжекция заряженных частиц в основной объем стимулирует в нем развитие ионизационных процессов и формирование основного разряда с развитой эмитирующей поверхностью плазмы. На этом основан принцип работы *источников с инициируемым разрядом в большом объеме*, формирующих ПБС.

На рис 8.11 показана схема одного из возможных вариантов электродной структуры источника такого типа [7, 38]. Основной объем разряда образован полым катодом 1 и сеточным анодом 3, через который из плазмы разряда осуществляется эмиссия электронов в ускоряющий промежуток. Плазмогенераторы 2, инициирующие основной разряд, вследствие малости их габаритов имеют значительное сопротивление течению напускаемого газа. Поэтому давление газа в них значительно выше, чем в основном разрядном промежутке и напряжение зажигания значительно ниже, чем напряжение зажигания разряда в основном объеме без применения инициирования. Напряжение на электроды основного разряда в этом источнике подается с задержкой относительно напряжения на инициирующие плазмогенераторы, что обусловлено необходимостью заполнения объема основного разряда плазмой.

Высокая плотность эмиссионного тока при достаточной ее равномерности по всей площади сеточного электрода обеспечивается только в импульсном режиме при длительности разряда меньше времени формирования «катодных дуговых пятен» и контракции основного разряда, которое обычно не превышает единиц микросекунд. Источники такого типа могут обеспечивать электронные пучки $10^5 - 10^6$ вольт с площадью сечения до 1 м^2 . Они находят применение в основном в научно-исследовательских

лабораториях для модификации поверхности (оплавления, аморфизации).

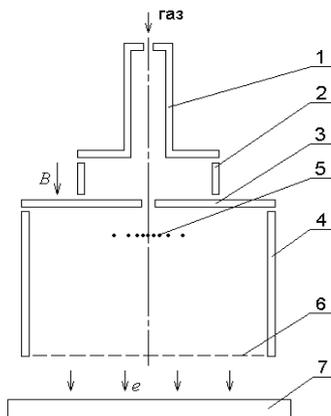


1 – полый катод; 2 – плазмогенераторы; 3 – сеточный анод основного разряда; 4 – коллектор; 5 – отверстие для выхода плазмы

Рисунок 8.11 - Электродная схема источника электронов.

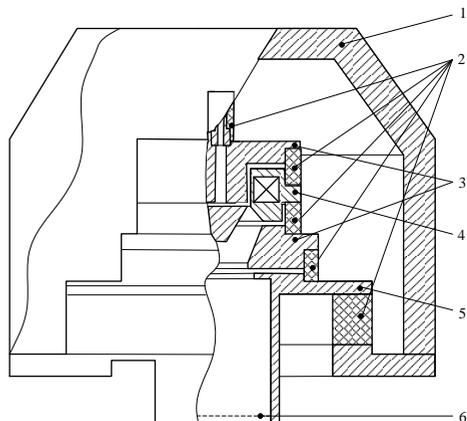
Иной принцип инициирования основного разряда реализуется в источниках с площадью сечения пучка порядка квадратного дециметра и работающих в стационарном или импульсном режиме практически с любой длительностью, большей времени установления разряда. Основное отличие заключается в том, что газоразрядная, иницирующая основной разряд, структура является одновременно и элементом основного разрядного промежутка. Один из вариантов типичной электродной структуры источника такого типа показан на рис. 8.12а [38].

Система электродов, в которой возбуждается иницирующий разряд, состоит из полого катода 1 и катода-отражателя 3, между которыми расположен цилиндрический анод 2. Вся эта система находится в продольном (осевом) магнитном поле. Такая в данном случае иницирующая система широко используется в качестве самостоятельного генератора эмитирующей плазмы в ПИЭЛ с точечным плазменным эмиттером для получения остросфокусированных электронных пучков. Ее достоинство заключается в том, что через малое отверстие в катоде отражателе 3 возможно переключение значительной доли электронного тока плазмы на электрод с положительным потенциалом за этим отверстием. Кроме этого такая система не переходит в режим дугового разряда до токов разряда 2,5–3 А в стационарном режиме, что оказывается достаточным для значительной области технологического применения электронных пучков. И, наконец, третьим важным фактором, определяющим целесообразность применения такой иницирующей системы, является обеспечиваемый в ней значительный перепад давления плазмообразующего газа.



а – плазменный эмиттер на основе разряда с полым катодом [7, 38]

- 1 – полый катод; 2 – анод;
- 3 – катод-отражатель;
- 4 – электрод-расширитель; 5 – выравнивающий электрод; 6 – эмиттерный сеточный электрод;
- 7 – коллектор электронов



б – плазменный эмиттер на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях [35]

- 1 – корпус, 2 – изоляторы;
- 3 – катоды;
- 4 – анод; 5 – электрод-расширитель;
- 6 – эмиттерный (сеточный) электрод

Рисунок 8.12 - Электродные схемы источников с ПБС:

При подаче на расширитель (экспандер) плазмы 4 потенциала анода, разрядный ток переключается с высокой эффективностью на расширитель (до 80 %). В связи с этим анод 2 переходит в режим вспомогательного анода, роль которого заключается в повторном зажигании разряда (при случайных погасаниях основного разряда). На рис. 8.13 представлена вольтамперная характеристика такого источника.

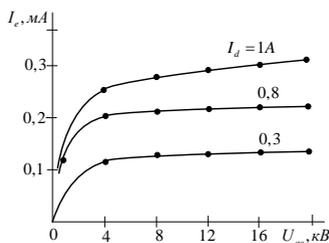


Рисунок 8.13 - Вольтамперная характеристика ПИЭЛ на основе разряда с полым катодом

На оси источника в расширителе плазмы устанавливается дополнительный сеточный (с переменной прозрачностью) электрод 5 под плавающим потенциалом, назначением которого является выравнивание плотности плазмы в области эмиссии электронов через сеточный электрод б (рис. 8.14). Необходимо отметить, что существуют и другие способы выравнивания распределения концентрации плазмы по сечению электрода расширителя [52].

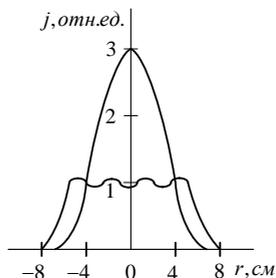


Рисунок 8.14 - Распределение плотности эмиссионного тока в отсутствии выравнивающего электрода и в его присутствии

Интересные результаты дает использование в качестве иницирующего разряда со скрещенными полями. Пример конструкции плазменного эмиттера с ПБС, в которой реализован такой способ выравнивания распределения концентрации по сечению электрода-расширителя, представлен на рис. 8.126 [35, 36]. Отличительной особенностью источника является возможность обеспечить более интенсивную диффузию плазмы в периферийные области электрода-расширителя в сравнении с диффузией на оси плазменного эмиттера. В результате высокую однородность по сечению эмиттирующей плазмы можно добиться без использования дополнительных электродов в объеме плазмы, ресурс которых конечно ограничен.

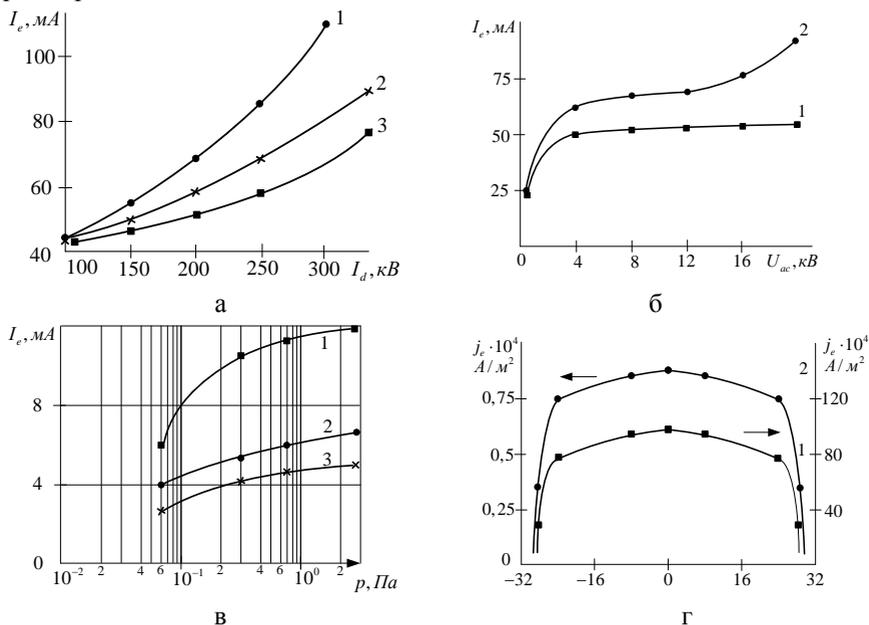
Экспериментально установлено, что при относительно низких давлениях значительную долю эмитированных в ускоряющий промежуток электронов составляют электроны, выходящие в электрод-расширитель (экспандер) из иницирующей системы через отверстие связи иницирующей системы с расширителем плазмы. Это означает, что ионизационные процессы в экспандере недостаточно развиты и пространство электрода-расширителя заполняется плазмой, диффундирующей из основного разряда, т.е. этот электрод выполняет пассивную роль. Однако при работе источника электронов при повышенных давлениях или в нестабильных условиях, связанных с интенсивным газоотделением с обрабатываемой поверхности, роль ионизационных процессов в электрод-расширителе может стать определяющей для

параметров плазменного эмиттера, т.е электрод-расширитель переходит в «активный» режим работы [37].

Для увеличения интенсивности ионизационных процессов в объеме электрода-расширителя может формироваться продольное магнитное поле, что приводит к значительному повышению тока разряда и плотности плазмы в экспандере. Особенностью источников с ПБС такого типа является также возможность использования в качестве иницирующего дуговых разрядов с мигрирующим катодным пятном [53]. Так как положение отверстия связи иницирующей системы и электрода-расширителя фиксировано и находится вне области катодных процессов в иницирующем разряде, миграция катодного пятна дугового разряда слабо влияет на параметры плазмы, инжектируемой в расширитель через отверстие связи, и на пространственное распределение плазмы по сечению электрода-расширителя [7, 38]. Источники такого типа обеспечивают высокую плотность эмиссионного тока, но общими недостатками дуговых формирователей объемной плазмы являются сильная неравномерность распределения плотности тока по сечению и относительно небольшой ресурс из-за высокой эрозии катода, что ограничивает их применение, но позволяет достигать рекордных значений плотности тока эмиссии.

Поскольку в источниках с ПБС электроны эмитирует развитая плазменная поверхность, то важной задачей является стабилизация тока эмиссии, что напрямую зависит от устойчивости положения эмиттирующей плазменной поверхности. С этой целью в источниках с ПБС функцию стабилизации эмиттирующей плазменной поверхности выполняет сеточный или перфорированный эмиттерный электрод, который можно рассматривать как систему эмиссионных каналов. Размеры ячеек подбираются таким образом, чтобы плазма не могла прорваться через сетку в ускоряющий промежуток. Это достигается при условии, что размеры ячеек сравнимы или меньше толщины слоя объемного заряда, существующего между плазмой и эмиттерным электродом (сеткой). В то же время размеры ячеек таковы, что поле ускоряющего электрода может проникать сквозь сетку и, обеспечивая тем самым эффективную эмиссию электронов из плазмы в режиме насыщения, т.е. когда плотность тока эмиссии соответствует плотности теплового тока электронов в плазме. На этом основан принцип сеточной (слоевой) стабилизации плазменной поверхности [54]. Однако с увеличением давления электрическая прозрачность сеточного электрода за счет снижения протяженности пристеночного слоя у сетки возрастает, что приводит к неконтролируемому росту тока эмиссии. Для обеспечения стабильности эмиссионных параметров источника при сохранении максимально высокой плотности эмиссионного тока может быть использован способ двухсеточной стабилизации плазменной поверхности

[35,37]. В этом случае эмиттерный электрод представляет собой двойную сетку с высокой геометрической прозрачностью. Сетки эквипотенциальны и отстоят друг от друга на расстоянии, сравнимом с размерами ячеек. Одна из сеток, обращенная к разрядной структуре, как и ранее, выполняет функцию элемента конструкции, стабилизирующего плазменную поверхность. Другая сетка препятствует значительному проникновению поля ускоряющего электрода в пространство за сетку при повышенных давлениях за счет существующего между сетками квазиэквипотенциального пространства. Этот способ обеспечивает возможность повышения плотности мощности электронного пучка большого сечения, что позволяет расширить его технологические возможности.



(ξ – прозрачность сеточного эмиттерного электрода)

а – эмиссионная: $\xi = 0,472$; $U_{ac} = 10$ кВ; 1 – $Q = 1000$ атм·см³/ч; 2 – $Q = 890$ атм·см³/ч; 3 – $Q = 800$ атм·см³/ч; б – Вольтамперные характеристики: 1 – сеточная стабилизация с использованием двух сеток; 2 – сеточная стабилизация; $\xi = 0,615$; $Q = 850$ атм·см³/ч; $p = 3 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.; 1 – $I_d^0 = 0,15$ А; 2 – $I_d^0 = 0,2$ А. в – газовая характеристика в импульсном режиме: $\xi = 0,472$, $U_{ac} = 8$ кВ, 1 – $I_d = 20$ А; 2 – $I_d = 11$ А; 3 – $I_d = 7$ А; г – распределение плотности тока по сечению пучка: 1 – импульсный режим; 2 – стационарный режим.

Рисунок 8.15 - Характеристики источника с пучком большого сечения

На рис. 8.15 представлены типичные характеристики источника с пучком большого сечения, конструкция которого показана на рис. 8.12.б, в стационарном и импульсном режимах, а на рис. 8.16 представлены фотографии электронных пучков, генерируемых этим источником.

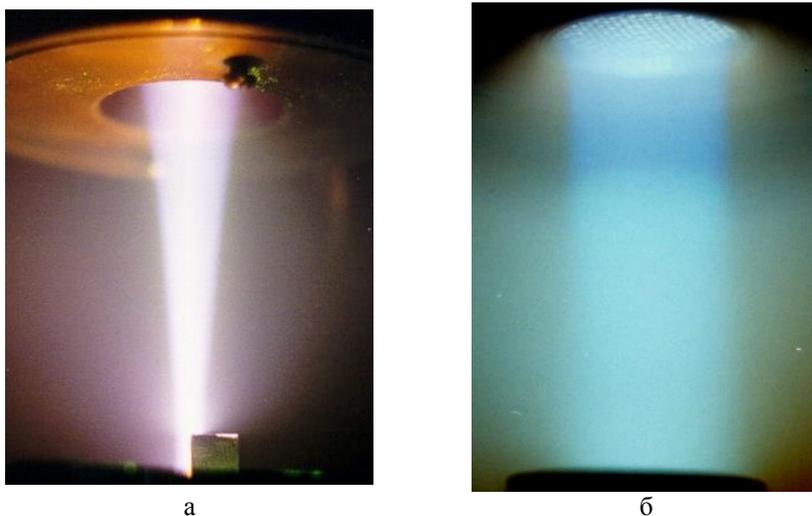
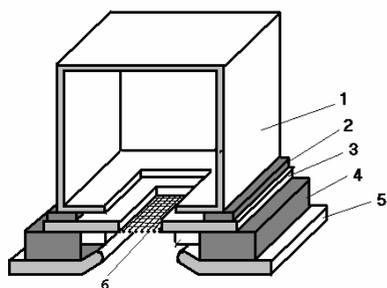


Рисунок 8.16 - Электронные пучки, генерируемые ПИЭЛ на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях: диаметр пучка 8 мм (а), 50 мм (б).

В последнее время значительно возрос интерес к электронным пучкам с сечением отличным от кругового – линейным, квадратным и т.д. Это обусловлено необходимостью разработки новых эффективных методов равномерного воздействия на большие площади в электронике, материаловедении и других областях и связано с интенсивным развитием плазмохимии. Линейные электронные пучки могут быть получены с помощью электродной структуры, представленной на рис. 8.12.б за счет использования вставок в область сеточного эмиттерного электрода и эффективного переключения в ускоряющий промежуток.

Для получения ленточных электронных пучков могут быть использованы также полые катоды соответствующей конфигурации. На рис. 8.17 представлена конструкция и фотография разрядной камеры плазменного источника электронов, формирующего ленточный пучок с размерами $250 \times 10 \text{ мм}^2$ [38].



а. Электродная структура
 1 – полый катод, 2 и 4 – изоляторы,
 3 анод 5 – ускоряющий электрод,
 6 – эмиссионная сетка.



б Фотография разрядной
 камеры плазменного источника
 электронов.

Рисунок 8.17 - Плазменный источник ленточного пучка электронов [38]

8.3 Технологии с использованием источников электронов с плазменным эмиттером.

К настоящему времени накоплен опыт эксплуатации электронных источников с плазменным эмиттером в лабораторных и производственных условиях, который позволил выявить их технологические возможности и наиболее целесообразные области применения [7, 38]. В частности, показано, что высокая эмиссионная способность обеспечивает генерацию электронных пучков, которые по яркости и плотности мощности соответствуют термокатодным пушкам. Плазменные источники не утрачивают работоспособности при воздействии паров металлов, в том числе тугоплавких, и при газовых выбросах из зоны воздействия, имеют большой ресурс, удобны в эксплуатации не содержат редких и дорогостоящих материалов. Совокупность этих свойств не только позволяет использовать источники с плазменным эмиттером в традиционных электронно-лучевых технологиях [1, 2, 4], но и разрабатывать на их основе новые технологии термического воздействия на материалы [49, 55, 56]. Кроме этого, практически мгновенная готовность плазменного эмиттера к работе и работоспособность при повышенных давлениях, позволяет упростить вакуумное оборудование и значительно повысить производительность установок.

В настоящее время наиболее широкое применение ПИЭЛ нашли в основном в технологии *электронно-лучевой сварки*, где они с успехом заменяют термокатодные источники электронов, благодаря значительно большому ресурсу работы (до $(3-5) \cdot 10^3$ ч [49], т.е. от 16000 до 80000 сварок пушкой с плазменным эмиттером по сравнению с 4000 сварками термокатодной пушкой при тех же условиях), меньшей

критичности к газовым условиям в рабочей камере и воздействию паров свариваемых металлов, и т.д.

Способность сварочных источников с плазменным эмиттером работать без применения специальных мер защиты катодов в широком диапазоне давлений, в условиях интенсивных газовых выбросов из зоны расплава, а также их высокий ресурс позволили эффективно использовать эти источники для создания различных покрытий путем наплавки порошковых материалов [57]. Процесс наплавки, как правило, всегда сопровождается существенным всплеском давления из-за большого газоотделения из зоны расплава, интенсивным распылением порошкового материала и ионными процессами, защита термокатада от которых требует применения специальных мер. Использование источников с плазменным эмиттером позволяет упростить электронно-лучевое и вакуумное оборудование, увеличить время эксплуатации источника между обязательными профилактическими работами и в итоге значительно повысить экономическую эффективность работ по созданию износостойких покрытий [14, 29, 33].

Технология *электронно-лучевой наплавки* основана на явлении «вмораживания» металлического порошка в жидкометаллическую ванну расплава, создаваемую электронным пучком. Электронно-лучевая наплавка обеспечивает необходимые защитные свойства покрытия, практически не меняя исходной структуры наплавляемой детали и может быть использована для восстановления изношенных и упрочнения новых деталей машин и инструмента широкой номенклатуры (табл. 8.1) [11].

Известно использование плазменных источников электронов для реализации электронно-лучевых технологий упрочнения поверхностей деталей машин и инструментов [49, 55, 58]. В частности, проводилось упрочнение борсодержащих наплавленных покрытий и образцов деталей тракторов, выпускаемых Минским тракторным заводом [56, 58].

Обработка борсодержащих покрытий [56 – 58] на режущем инструменте электронным пучком диаметром до 10 мм с плотностью мощности 10^7 Вт/м², показала, что при ЭЛВ большинства анализируемых покрытий различных химических составов при плотности мощности около 10^7 Вт/м² формируются структуры с высокой твердостью (до 1000–1100 НВ для покрытия на основе Р6М5) и удовлетворительной сопротивляемостью образованию трещин. Повышение плотности мощности до 10^8 Вт/м² приводит к резкому снижению трещиностойкости покрытий. Одним из основных факторов, влияющих на структуру и свойства модифицированных слоев, является вид и параметры термообработки, а именно воздействие с образованием жидкой фазы (закалка из жидкого состояния) и без ее образования (закалка из твердого состояния). Использование закалки из жидкого состояния оказывается более

перспективной, в том числе и для борсодержащих инструментальных сталей. Установлено, что после электронно-лучевого переплава легированных сталей повышается плотность, теплопроводность и снижается их склонность к горячему трещинообразованию, увеличивается также их пластичность и ударная вязкость. Вместе с тем, при рафинировании происходят и нежелательные потери легирующих элементов и металла основы, особенно значительные для элементов с высоким давлением пара (железа, хрома, марганца, меди и др.) от 4% для Fe до 80% для Mn. Так покрытия, полученные закалкой из жидкого состояния в режиме с плотностью мощности $q = (1-5) \cdot 10^9$ Вт/м², отличаются высокой твердостью 1122±56 HV и весьма низкой трещиностойкостью. Глубина упрочненной зоны составляет 100 – 800 мкм. Покрытия, полученные электронно-лучевой обработкой с плотностью мощности $q = (1-2) \cdot 10^7$ Вт/м² имеет также достаточно высокую твердость 1000±85 HV, однако их трещиностойкость выше. Глубина модифицированной зоны воздействия достигает 1 мм. Проведенный отпуск образцов, подвергнутых электронно-лучевому воздействию, повышает трещиностойкость материала в 1,5–2 раза при незначительном снижении твердости на 50–100 HV.

Поверхностная закалка. Электронно-лучевому упрочнению подвергались цилиндрические образцы деталей тракторов (сталь 45, сталь 40X, исходная твердость 200–220 HV, параметры воздействия: ширина воздействия – 8...12 мм, плотность мощности – $(1-5) \cdot 10^7$ Вт/м², ускоряющее напряжение 16...20 кВ, ток пучка 40...90 мА). Вращение образцов осуществлялось вокруг горизонтальной оси с угловой скоростью 0,63 с⁻¹ (линейная скорость 3,8 мм/с). Варьирование этих параметров позволяло проводить закалку поверхностного слоя из твердого и жидкого состояний.

Проведенные дюрOMETрические и металлографические исследования показали, что на обработанных деталях сформированы приповерхностные слои со следующими характеристиками: при закалке из твердого состояния – толщиной 250–300 мкм и с микротвердостью 350–500 HV; при закалке из жидкого состояния – толщиной 700–750 мкм и с микротвердостью 350–450 HV. Поверхностная твердость по ширине упрочненной зоны составила 40–45 HRC₂. Установлено, что ЭЛВ повышает твердость в 1,8–2,5 раза по сравнению с исходной.

Отличительной особенностью закалки из жидкого состояния (с оплавлением) является наличие максимума твердости, приходящегося на глубину 0,3–0,5 мм. Это позволяет проводить окончательную размерную механическую обработку поверхностей с сохранением свойств упрочненного слоя.

Некоторые из технологий, для реализации которых используются плазменные источники электронов, показаны в таблице 8.1 [49, 58].

Таблица 9.1.

Параметры электронно-лучевого воздействия

Метод воздействия	Ускоряющее напряжение U_{ac} , кВ	Плотность мощности q , Вт/м ²	Время воздействия τ , с	Толщина упрочненного слоя h , твердость (микротвердость)	Обрабатываемые материалы
Закалка из твердого состояния	10–150	10^7	0,1–10	$h=30$ мкм–200 мкм HRC 57...68 (стали), HRC 50 (Ti-сплавы)	Конструкционные и инструментальные стали, чугуны, Ti-сплавы
Закалка из жидкого состояния	10–500	10^7 – 10^{10}	10^{-5} –10	$h=10$ мкм – 10 мм HV 1100, HRC 69 (стали, чугуны), HV 470 (сплавы), $H_{\square}=6$ ГПа (сплавы)	Стали, чугуны, Ti-, Al-, Cu-сплавы

Оплавление в режиме рафинирова ния	10–60	$5 \cdot 10^6 - 2,5 \cdot 10^7$	$1 - 10^2$	$h = 1 - 10$ мм	Стали
Наплавка и поверхностное легирование	10–1000	$10^7 - 5 \cdot 10^{13}$	$10^{-8} - 10$	$h = 0,01 - 10$ мм	Основа – углеродистые и легированные стали, Ti-, Al-, Cu- сплавы
Обработка металлов и сплавов с предварительно нанесенными покрытиями	10–500	$10^7 - 10^9$	$10^{-3} - 10$	h соответствует толщине покрытий (10 мкм–2 мм и более), износостойкость возрастает в 5 раз, адгезионная прочность – на порядок	Основа – стали, Ti-сплавы
Аморфизация поверхности	25–80	$10^9 - 10^{13}$	$10^{-3} - 10^{-8}$	$h = 10$ нм – 400 мкм	Стали, сплавы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 8

1. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевые технологии. – М.: Энергия, 1980. – 528 с.
2. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Под ред. Дж. М. Поута и др.; Пер. с англ. Н.К. Мышкина и др.; Под ред. А.А. Углова. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
3. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, П.В. Зуев, А.Н. Кокора – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
4. Электронно-лучевая сварка / О.К. Назаренко, А.А. Кайдалов, С.Н. Ковбасенко и др.; Под ред. Б.Е. Патона. – К.: Наукова думка, 1987. – 256 с.
5. Шипко А.А., Поболь И.Л., Урбан И.Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 280 с.
6. Использование электроннолучевого сварочного оборудования для поверхностной обработки / В.Я. Браверман, Д.А. Скурихин, В.Ф. Шабанов и др. // Свароч. производство. – 1996. – №12. – С. 31–33.
7. Крейндель Ю.Е. Плазменные источники электронов. – М.: Атомиздат, 1977. – 145 с.
8. Новиков А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 96 с.
9. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндель, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 212 с.
10. Компенсация объемного заряда в плоском газонаполненном диоде / В.А. Гордин, Я.И. Лондер, И.О. Сибиряк, К.Н. Ульянов // РТ и Э. – 1984. – Т. 29, вып. 4. – С. 774–780.
11. Экспериментальное исследование электронно-оптической системы с плазменным анодом / М.А. Завьялов, Л.А. Неганова, П.Ф. Тезиков, В.Н. Цхай // РТ и Э. – 1984. – Т. 29, вып. 4. – С. 757–764.
12. Биполярный диод с плазменным анодом / О.Н. Азарова, М.А. Завьялов, Л.А. Неганова, В.Н. Цхай // РТ и Э. – 1987. – Т. 32, вып. 10. – С. 2200–2207.
13. Пучково-плазменные процессы в электронно-лучевой аппаратуре промышленного применения//Сб. науч. тр. ВЭИ/ Под ред. В. И. Переводчикова. – М.: ВЭИ, 1994.
14. Проблемы электронно-оптических систем для перспективных пучково-плазменных приборов СВЧ/ М. А. Завьялов, В. И. Переводчиков, В. А. Сыровой // Прикладная физика, – 2000, – № 2, – С.

15. Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М. Электронные пучки большого сечения. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.

16. Плазменный электронно-ионный источник для термической модификации поверхностей материалов / Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев, В.Г. Залесский, А.Г. Маняк // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. трудов / Под ред С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Мн.: Технопринт; Новополоцк: ПГУ, 2001. – С.369–372.

17. Исследование многосторонней накачки мощных газовых лазеров электронными пучками / В. В. Рыжов, И. Ю. Турчановский, С. Б. Шемякина, Томск, ТНЦ СО АН СССР 1991.

18. Газовые лазеры/ Хьюстис Д. Л., Чантри П. Дж., Виганд В. Дж., [и др.]. - М.: Мир, 1986. - 548 с.

19. Теория и расчет электронных пучков/ Дж. Р. Пирс. Под ред. М.В. Цехановича - М.: Сов. радио, 1956. - 217 с.

20. Месяц Г.А. Этоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. – М.: Наука, 2000. – 240 с.

21. Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. – Новосибирск: Наука, 1984. – 256 с.

22. Озур Г.Е., Проскуровский Д.И. Формирование субмикросекундных низкоэнергетичных сильноточных электронных пучков в пушке с плазменным анодом // Письма в ЖТФ. – 1988. – Т. 14, вып. 5. – С. 413–416.

23. Абдуллин Э.Н., Заславский В.М., Логинов С.В. Формирование микросекундных электронных пучков с плотностью тока 10–50 А/см² в вакуумном диоде // ЖТФ. – 1991. – Т. 61, вып. 6. – С. 207–209.

24. Самойлов В.Н., Корнев С.А., Самошкин А.М. Информационное обеспечение технологического процесса разложения токсичных соединений // Сообщения объедин. ин-та ядерных иссл., Р10-2000-313. – Дубна, 2000. – 27 с.

25. Мельник В.И., Новиков А.А. Холодные катоды источников электронов высоковольтного тлеющего разряда // Плазменная эмиссионная электроника: Материалы I Всесоюз. совещ. / АН СССР. Сиб. отд. – Улан-Удэ, 1991. – С. 117–122.

26. Новиков А.А. Управление плотностью тока электронных пучков большого сечения в источниках электронов высоковольтного тлеющего разряда // Плазменная эмиссионная электроника: Материалы I Всесоюз. совещ. / АН СССР. Сиб. отд. – Улан-Удэ, 1991. – С. 123–124.

27. Груздев В.А., Залесский В.Г. Газоразрядная структура и ее характеристики для плазменного источника электронов с высокой яркостью пучка // Физика плазмы и плазменные технологии: Материалы

2-й Междунар. науч. конф., Минск, 15-19 сент. 1997 г. – Мн., 1997. – Т. 1. – С. 44–47.

28. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / Под ред. П.М. Щанина. – Екатеринбург: Наука, 1993. – 149 с.

29. Источники электронов с плазменным эмиттером на основе отражательного разряда с полым катодом / В.Л. Галанский, В.А. Груздев, И.В. Осипов, Н.Г. Ремпе // Изв. ВУЗов. Физика. – 1992. – Т.35, № 5. – С. 5–23.

30. Physical processes in plasma electron emitters based on a hollow-cathode reflected discharge / V L Galansky, V A Gruzdev, I V Osipov and N G Rempе // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1994. – Vol. 27. – P. 953 – 961.

31. Формирование эмиссионного тока в плазменных эмиттерах электронов/ Груздев В.А., Залесский В.Г.// Прикладная физика 2009, – № 5 – С.87-92.

32. Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М. Техника получения высокоэнергетических электронных пучков с большим поперечным сечением (обзор) // ПТЭ. – 1980. – № 1. – С. 7–24.

33. Электронная пушка непрерывного действия с плазменным катодом большой площади / Ю.Е. Крейнделъ, В.Я. Мартенс, В.Я. Съедин, С.В. Гавринцев // ПТЭ. – 1982. – №4. – С. 178–180.

34. Плазменный источник электронов: патент №7573 Респ. Беларусь, МПК 7 Н 01J 37/077, 3/00 / В.А. Груздев, В.Г. Залесский// Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 4 (47). Ч1 – С. 240.

35. Плазменный источник электронов с пучком большого сечения / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев // ИФЖ. – 2002. – Т. 75, № 3. – С. 166–170.

36. Universal plasma electron sources/ Grusdev V.A., Zalesski V.G., Antonovich D.A., Golubev Yu. P. //Vacuum. – 2005. – V. 77. P. 399–405.

37. Москалев Б.И. Разряд с полым катодом. – М.: Энергия, 1969. – 184 с

38. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005.– 216 с.

39. Peculiarities of plasma electron sources operation at high pressures/ Zalesski V. G., Antonovich D.A. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. –40. 7771-7777.

40. Блок питания разряда плазменного источника электронов / Д.А. Антонович [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – №5 – С 130 – 132.

41. Метель А. С. Плазменный источник электронов с секционированным холодным полым катодом // ПТЭ. 1987. Вып. 1. С. 164 – 167.

42. Разработка и применение источников интенсивных электронных

пучков: Сб. науч. тр. / Под ред. Г.А. Месяца – Новосибирск. – Наука, 1976. – 191 с

43. Царев Б.М. Расчет и конструирование электронных ламп. – М.: Энергия, 1967. – 671 с.

44. Zalesski V.G., Rusetski I.S. Ways of the plasma electron sources operation // Proc. VI Intern. Conf. on Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk (Belarus), 2009. – Vol. I. – P. 173–176.

45. Stanley Humphries, Jr. Charged Particle Beams. – John Wiley and Sons, New York, 2002. – 819 p.

46. Программно-аппаратный комплекс для диагностики электронно-оптических систем и пучков заряженных частиц / Груздев В.А. [и др.] // Приборы и техника эксперимента (Россия). – 2009. – №2 – с 177 – 178

47. Способ и устройство для диагностики электронно-оптических систем плазменных источников электронов / Груздев В.А. [и др.] // Минск: Доклады БГУИР. – 2009. – №1 (39). – С. 71-77

48. Жирков И.С., Бурдовицин В.А, Оке Е.М. О влияния продольного магнитного поля в ускоряющем промежутке на предельные параметры плазменного источника электронов в форвакуумной области давлений. // Журнал технической физики, 2007, том 77, выпуск 9, С. 115-119

49. Белюк С.И., Осипов И.В., Ремпе Н.Г. Промышленное применение электронных источников с плазменным эмиттером // Изв. ВУЗов. Физика. – 2001. – Т. 44, № 9. – С. 77–84.

50. Антонович, Д.А. Эмиссионные свойства плазменного эмиттера электронов / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Вестн. Полоц. гос.ун-та. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2008. – № 9. – С.114 – 123.

51. Бондарев А.А., Скрябинский В.В. Влияние параметров развертки электронного пучка на характеристики сварных соединений алюминиевых сплавов // Автоматич. сварка. – 1987. – № 12. – С. 57–62.

52. Управление распределением плотности мощности электронного пучка по его сечению / Ю.Н. Ланкин, А.А. Бондарев, Е.Н. Байштрук, В.В. Скрябинский //Автоматич. сварка. – 1985. – № 6. – С. 12–15.

53. Параметры плазмы в экспандере электронного эмиттера с дуговым контрагированным разрядом / А.Ф. Злобина, Г.С. Казьмин, Н.Н. Коваль, Ю.Е. Крейндель // ЖТФ. – 1980. – Т. 50, вып. 6. – С. 1203–1207.

54. Плазменный эмиттер электронов с сеточной стабилизацией. II / А.В. Жаринов, Ю.А. Коваленко, И.С. Роганов, П.М. Тюрюканов // ЖТФ. – 1986. – Т. 56, вып. 4. – С. 687–693.

55. Электронно-лучевая наплавка в вакууме: оборудование, технология, свойства покрытий / В.Е. Панин, С.И. Белюк, В.Г. Дураков и др. // Сварочное производство. – 2000. – № 2. – С. 34–38

56. Пантелеенко Ф.И., Снарский А.С. Исследование влияния электронно-лучевой обработки на эксплуатационные свойства

боросодержащего материала лезвийного металлорежущего инструмента // Вісник ЖІТІ. – 2001 / Технічні науки. – С. 242–243.

57. Залесский В.Г., Снарский А.С., Сороговец В.И. Особенности электронно-лучевого воздействия на боросодержащие износостойкие наплавленные покрытия // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. трудов / Под ред С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Мн.: Технопринт; Новополоцк: ПГУ, 2001. – С.378–381.

58. Возможности и перспективы использования плазменных источников электронов для реализации электронно-лучевых технологий в машиностроении / Груздев В.А., Залесский В.Г., Голубев Ю.П., Антонович Д.А. // Тяжелое машиностроение (Россия) № 9. – 2004г. – С. 25–32.

59. Закономерностей электронно-лучевого воздействия на боросодержащие материалы и принципов оптимизации электронно-лучевого оборудования для технологии упрочнения и восстановления. Пантелеенко ф.И., Груздев В.А. и др. М Технопринт: 2005. – 120 с.