

В. А. Груздев, д-р. техн. наук проф.; **В. Г. Залесский**, канд. физ.-мат. наук;
Ю. П. Голубев, канд. техн. наук; **Д. А. Антонович**
 (Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк, Беларусь)

Возможности и перспективы использования плазменных источников электронов для реализации электронно-лучевых технологий в машиностроении

Одной из важнейших задач современного этапа развития машино- и приборостроения является повышение качества, надежности и долговечности деталей, узлов и механизмов. Эта проблема может быть решена только на основе комплексного подхода, включающего как создание новых материалов, освоение новых эффективных технологий, так и разработку соответствующего оборудования, обеспечивающего реализацию таких технологий.

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. До 1940 г. уже было создано лабораторное оборудование для электронно-лучевой наплавки и сверления. 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, а также восстановления изношенных поверхностей без изменения исходной структуры деталей. Физические основы обработки материалов электронными пучками подробно рассмотрены в монографиях [2–6], а также в боль-

шом 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.

Электронно-лучевое оборудование на основе пушек с термокатадами наряду с достоинством, как высокое качество электронного пучка, имеет ряд недостатков [1–3]. Одним из основных, которые в значительной степени сдерживают расширение области применения электронно-лучевых технологий, являются относительно низкий ресурс наиболее термически напряженного и подверженного ионной эрозии элемента — термокатода (десятки-сотни ампер-часов) 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]. 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 был создан принципиально новый класс электронно-лучевых систем — источники электронов с плазменным эмиттером, функциональные и эксплуатационные характеристики которых не только обеспечивали перспективность их применения в развитых технологиях обработки материалов, но и значительно расширяли возможности использования электронных пучков [7, 8].

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, 8]. В частности, показано, что высокая эмиссионная способность обеспечивает генерацию электронных пучков, которые по яркости и плотности мощности находятся на уровне термокатодных пушек [7—10]. В настоящее время наиболее широко применение плазменных источников электронов (ПИЭЛ) в технологии электронно-лучевой сварки, где они заменяют термокатодные пушки благодаря значительно большему ресурсу работы до $(3-5) \cdot 10^3$ ч [7], т. е. от 16 000 до 80 000 сварок пушкой с плазменным эмиттером по сравнению с 2000—4000 сварками термокатодными пушками при тех же условиях [11].

Плазменные источники не утрачивают работоспособности при воздействии паров металлов, в том числе тугоплавких, и газовых выбросов из зоны сварки, 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 [2, 3, 5], но и разрабатывать на их основе новые технологии термического воздействия на материалы [10—16]. Кроме этого, мгновенная готовность плазменного эмиттера к работе и стабильность работы при повышенных давлениях, позволяют упростить вакуумное оборудование и значительно повысить производительность установок.

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 [5], в ПИЭЛ электронные пучки достаточного большого сечения можно получить в соответствующих газоразрядных структурах [10, 12].

В электронных источниках с плазменным эмиттером используются фундаментальные свойства плазмы — при определенных условиях способность эмиттировать электроны за пределы плазменного образования [7]. Плазменный эмиттер электронного источника — это, как правило, электроразрядное устройство, генерирующее 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. 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 (100 А/см^2 и выше). Высокие значения концентрации плазмы нецелесообразно обеспечивать во всем объеме разрядной камеры, поскольку снижается экономичность электронного источника, возрастают тепловые нагрузки на электроды [7—10]. В связи с этим предпочтительным является использование разрядов с большой степенью неоднородности концентрации. Для получения эмиттирующей плазмы с высокой плотностью эмиссионного тока использовались различные газоразрядные системы, однако на-

ибольшие практические результаты были достигнуты в плазменных эмиттерах на основе разрядов с полым катодом [17—20] и в скрещенных $E \times H$ полях [21].

Для возбуждения ионизационных процессов в полем катодом используются различные системы инициирования [7]. Практическое применение нашли схемы инициирования разряда с полым катодом дополнительным отражательным разрядом (рис. 1, 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 [17, 18].

В качестве плазменного эмиттера также используются газовые разряды в скрещенных $E \times H$ полях. Высокими технологическими возможностями обладает газоразрядная структура, представленная на рис. 1, б, позволяющая получать эмиттирующую плазму, отличающуюся высокой стабильностью эмиссионных свойств при повышенных рабочих давлениях [22].

Однако плазменный эмиттер это не только газоразрядная структура, но и система первичного формирования электронного пучка, область ускорения и транспортировки электронов. Потому наиболее значительные результаты в конструировании ПИЭЛ были достигнуты только после принципиального изменения подхода к созданию подобного рода устройств, согласно которому ПИЭЛ рассматриваются не как газоразрядные структуры, а как электронные пушки с применением разработанных методик расчета соответствующей

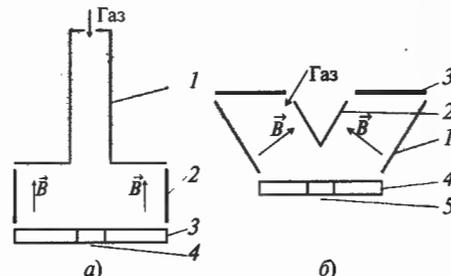


Рис. 1. Электродные системы:
а — отражательного разряда с полым катодом [17]: 1 — полый катод; 2 — анод; 3 — отражательный катод; 4 — эмиссионный канал; B — магнитная индукция; б — разряда в скрещенных $E \times H$ полях: 1 — внешний катод; 2 — внутренний катод; 3 — анод; 4 — эмиттерный электрод; 5 — эмиссионный канал

Таблица 1

Параметры	ПИЭЛ на основе отражательного разряда с полым катодом	ПИЭЛ на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях
Ускоряющие напряжение U_p , кВ	До 50	До 30
Ток пучка I_p , А	До 0,1	До 0,15
Ток разряда I_r , А	До 0,3	До 0,4
Напряжение горения разряда, В	До 400	До 450
Расход плазмообразующего газа Q , атм \cdot см ³ /ч	30—200	20—200
Диапазон давления в рабочей камере p , Па	От глубокого вакуума до $(5-7) \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$ — $2 \cdot 10^{-1}$

ших систем в термокатодных пушках [6, 23, 24] и электронных лампах [25].

На основе газоразрядных структур, представленных на рис. 1, разработан ряд конструкций электронных источников с плазменным эмиттером, обладающих широким спектром технологических возможностей (рис. 2).

На рис. 2, а представлена конструкция плазменного источника электронов, удовлетворяющая требованиям серийного производства [11]. Источники эксплуатируются в составе

модернизированной типовой аппаратуры электропитания термокатодных пушек.

Конструкция плазменного источника электронов на основе газоразрядной структуры, представленной на рис. 1, б, показана на рис. 2, б [22, 26]. Источник отличается тем, что извлечение электронов осуществляется через эмиссионный канал во вспомогательном аноде (эмиттерном электроде 5 на рис. 2, б). Предлагаемое выполнение плазменного источника электронов позволяет существенно повысить долговечность и расширить диапазон рабочих давлений, при которых параметры электронного пучка остаются устойчивыми.

Представленные электронные источники обеспечивают следующие параметры (табл. 1).

На рис. 3 представлены типичные характеристики источника на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях (R — сопротивление смещения, включенное в цепь эмиттерного электрода относительно анода). Рис. 3 иллюстрирует возможность электротехнической стабилизации технологических характеристик источника, которая обеспечивается за счет неэквипотенциальности электродов газоразрядной структуры без использования дополнительных источников питания в отличие от ряда известных структур [8, 9].

Эмиссионные характеристики (рис. 3, а) имеют участок, близкий к линейному, что используется для эффективного управления током

пучка варьированием током разряда. При реализации смещения потенциала эмиттерного электрода источника, крутизна зависимости $I_p(I_r)$ несколько уменьшается, что незначительно снижает управляемость током пучка (рис. 3, а, кривые 2, 3), однако повышает стабильность эмиссионных параметров источника. Зависимость тока пучка от ускоряющего напряжения (рис. 3, б) имеет область насыщения. Основное преимущество данного источника — слабая зависимость эмиссионного тока от давления вплоть до $p = 1,5 \cdot 10^{-1}$ Па, что иллюстрируется рис. 3, в. Эта особенность реализуется как за счет особой конфигурации электродов разрядной камеры, так и вследствие использования в системе электротехнической стабилизации параметров электронного пучка (включением сопротивления R в цепь эмиттерного электрода относительно анода).

Анализ распределения плотности мощности в пучке, которое приводится на рис. 3, г, показывает, что максимальное значение $q_{\max} \approx 10^9$ 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 [2]. Это, а также вид газовой характеристики позволяет применять данный источник для сварки, в том числе и материалов с повышенным газоотделением в процессе термообработки.

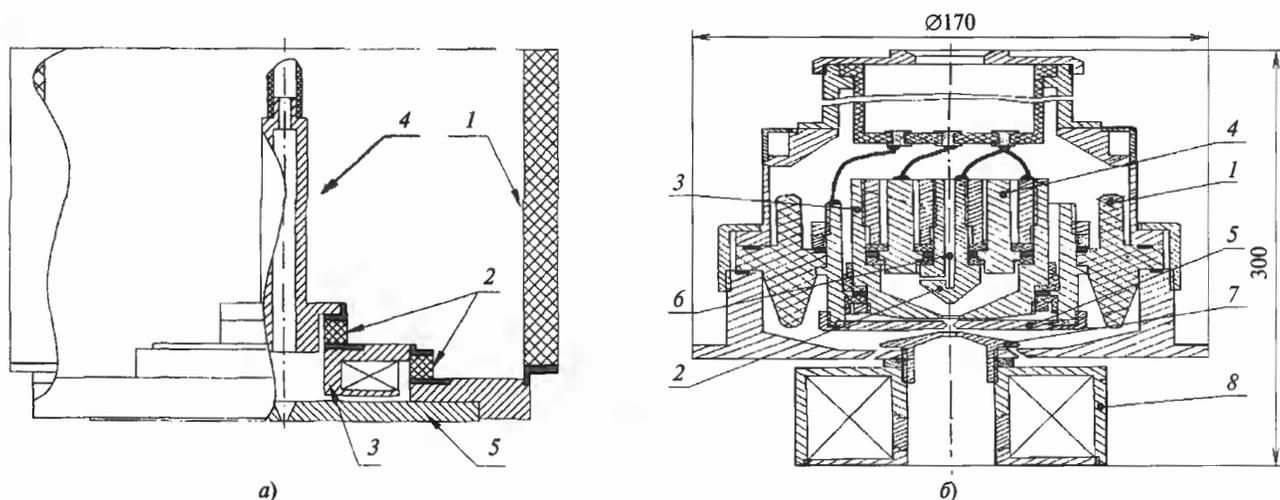


Рис. 2. Конструкции источников электронов:

а — на основе отражательного разряда с полым катодом [11, 17]: 1, 2 — металлокерамические изоляторы; 3 — анод; 4 — полый катод; 5 — эмиссионный электрод; б — на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях [26]: 1 — изоляторы; 2, 3 — катоды; 4 — анод; 5 — эмиссионный электрод; 6 — канал для напуска газа; 7 — экстрактор (ускоряющий электрод); 8 — линза

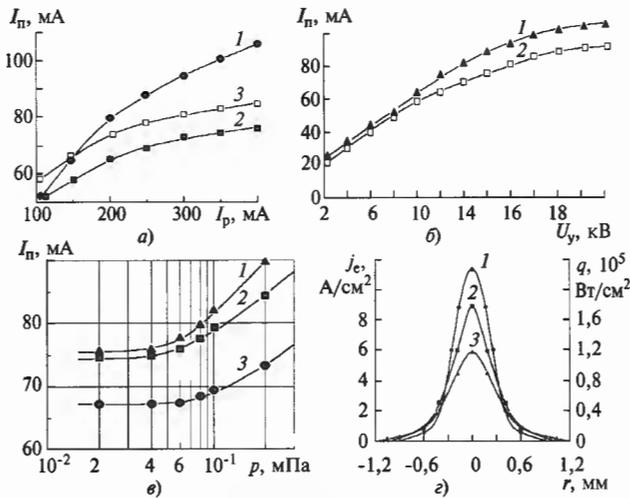


Рис. 3. Характеристики источника:
 а — эмиссионная: $U_y = 18$ кВ; $Q = 1,5 \cdot 10^{-3}$ (Па·м³)/с; 1, 2 — $p = 4 \cdot 10^{-2}$ Па; 3 — $p = 10^{-1}$ Па; 1 — $R = 0$; 2, 3 — $R = 1$ кОм; б — вольт-амперная: $Q = 1,5 \cdot 10^{-3}$ (Па·м³)/с; $I_p = 0,2$ А; 1 — $p = 4 \cdot 10^{-2}$ Па; 2 — $p = 10^{-1}$ Па; 1 — $R = 0$; 2 — $R = 1$ кОм; в — газовая характеристика: $U_y = 16$ кВ; $Q = 1,5 \cdot 10^{-3}$ (Па·м³)/с; 1 — $R = 0$; 2 — $R = 0,5$ кОм; 3 — $R = 1$ кОм; г — распределение плотности тока и плотности мощности по сечению пучка: r — радиальная координата; $U_y = 18$ кВ; $Q = 1,5 \cdot 10^{-3}$ (Па·м³)/с; $I_p = 0,2$ А; $I_n = 0,08$ А; 1 — $R = 1$ кОм; 2 — $R = 0,5$ кОм; 3 — $R = 0$

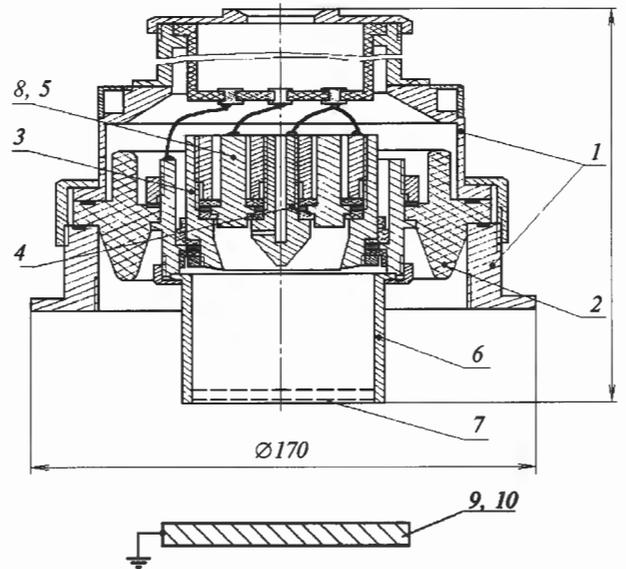


Рис. 4. Конструкция источника электронов с пучком большого сечения:
 1 — корпус; 2 — изолятор; 3 — внешний катод; 4 — внутренний катод; 5 — анод; 6 — экспандер; 7 — эмиттерный электрод; 8 — магниты; 9 — ускоряющий электрод; 10 — обрабатываемая поверхность

Без существенного изменения конструкции источник на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях, может быть использован для получения электронных пучков большого сечения (рис. 4) [27, 28].

ПИЭЛ отличается тем, что эмитирующая плазма формируется в электроде-расширителе (экспандере). Поэтому площадь сечения генерируемых электронных пучков соответствует площади сечения экспандера. Для повышения стабильности эмиссионных параметров источника при сохранении максимально высокой плотности эмиссионного тока в нем реализован оригинальный способ двухсеточной стабилизации [27]. Этот способ обеспечивает возможность повышения плотности мощности электронного пучка большого сечения, что позволяет расширить его технологические возможности. Конструкция экспандера также предполагает возможность генерации электронных пучков с сечением, отличным от кругового — линейчатым, кольцевым и т. д. Особенностью данного источника является также возможность работы в импульсном режиме.

Теоретические и экспериментальные исследования теплофизических процессов при электронно-лучевом воздействии [14, 15] показывают, что в многоимпульсном режиме возможно получение модифицированного

слоя управляемой толщины с более высокой однородностью свойств по сравнению с одноимпульсным воздействием той же суммарной длительности воздействия и плотности мощности пучка. Эксперименты также показали, что в режиме многоимпульсного воздействия влияние "всплесков" давления проявляется в меньшей степени, что обусловлено, по-видимому, демпфированием "всплесков" давления объемом рабочей камеры за счет промежутков между импульсами.

На рис. 5 представлены типичные характеристики источника с пучком большого сечения (ξ — прозрачность сеточного эмиттерного электрода). Источник обеспечивает параметры, представленные в табл. 2 и 3 [28, 29].

На рис. 6 и 7 представлены фотографии электронных пучков, генерируемых разработанными источниками, внешний вид источника и экспериментального электронно-лучевого энергокомплекса.

Важной задачей, решение которой необходимо для расширения об-

Таблица 2

Параметры	ПИЭЛ на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях с пучком большого сечения
Диаметр пучка D_{\max} , мм	До 50
Площадь сечения S_n , см ²	20
Плотность эмиссионного тока (при диаметре пучка D_{\max}) j_e , А/м ²	До 10^4
Ускоряющее напряжение U_y , кВ	20
Плотность мощности (при диаметре пучка D_{\max}) q , Вт/м ²	До $2 \cdot 10^8$
Диапазон рабочих давлений p , Па	$6 \cdot 10^{-2}$ —1

Таблица 3

Профиль сечения	Размеры, мм	Плотность мощности q , Вт/м ²
Круговой Кольцевой	Диаметр 1—50	10^6 — $2 \cdot 10^9$
	Диаметр: внешний 50 внутренний 15—30	10^6 — 10^7
Линейчатый	Длина × ширина 20 × (1—2)	$(0,5$ — $1) \cdot 10^8$

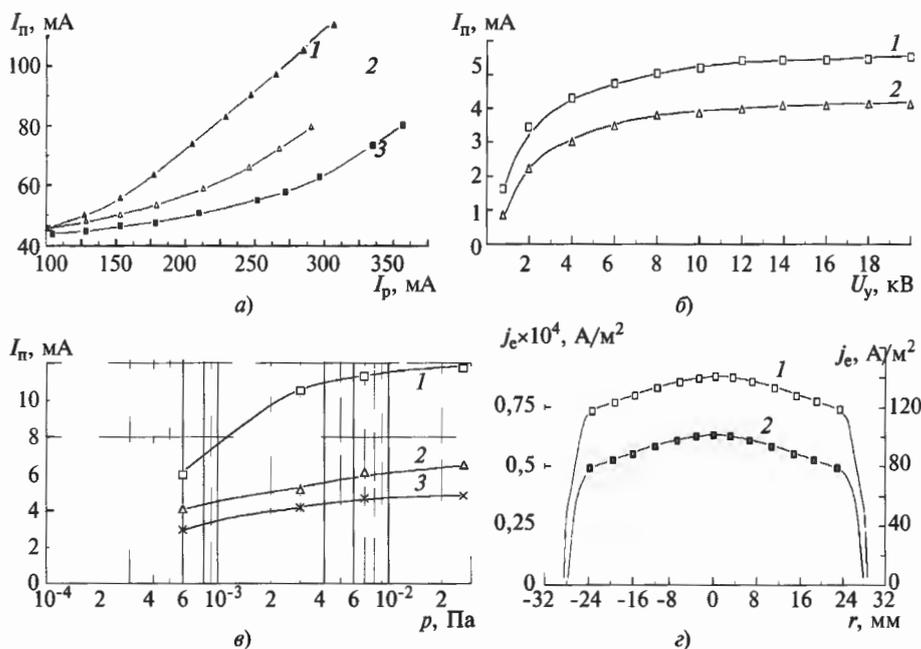


Рис. 5. Характеристики источника с пучком большого сечения:
 а — эмиссионная: $\xi = 0,472$; $U_y = 10$ кВ; 1 — $Q = 30 \cdot 10^{-3}$ (Па \cdot м³)/с; 2 — $Q = 25 \cdot 10^{-3}$ (Па \cdot м³)/с; 3 — $Q = 22 \cdot 10^{-3}$ (Па \cdot м³)/с; б — вольтамперная в импульсном режиме: $p = 10^{-1}$ Па; $Q = 17,5 \cdot 10^{-3}$ (Па \cdot м³)/с; 1 — $I_p = 11$ А; 2 — $I_p = 7$ А; в — газовая характеристика в импульсном режиме: $\xi = 0,472$; $U_y = 8$ кВ; 1 — $I_p = 20$ А; 2 — $I_p = 11$ А; 3 — $I_p = 7$ А; г — распределение плотности тока по сечению пучка: r — радиальная координата; 1 — импульсный режим; 2 — стационарный режим

ласти применения в электронно-лучевых технологиях пушек с плазменным эмиттером, является создание соответствующих систем электропитания и управления, обеспечивающих за счет реализации обратных связей в этих системах технологические требования по стабильности параметров, устойчивости систем к различным факторам и возможности автоматизации. Решение такой задачи возможно либо за счет создания соответствующего энергокомплекса, либо в результате модернизации систем электропитания электронно-лучевых установок на базе термокатодных пушек или установок близкого

профиля (например, ионного напыления). Последнее представляется наиболее перспективным в настоящее время, поскольку требует значительно меньших временных и материальных затрат.

Важным отличием ПИЭЛ от традиционных термокатодных пушек является то, что пушки с плазменным эмиттером могут быть использованы для генерации как сфокуси-

рованных, так и широких пучков при незначительном изменении системы первичного формирования пучка и электронно-оптической системы. Это означает, что структура энергокомплекса для электронно-лучевой обработки (ЭЛО) материалов должна обеспечивать работу в различных режимах для достаточно широкого спектра возможных технологий и предполагает использование универсальной системы электропитания, обеспечивающей функционирование энергокомплекса в различных режимах (например, стационарном и импульсном, со сфокусированным и широким пучками и т. д.).

Однако использование плазменного источника электронов в качестве генератора технологических электронных пучков вносит ряд особенностей при построении систем электропитания в отличие от энергокомплексов на базе традиционных термокатодных пушек. С одной стороны, энергокомплекс на базе плазменного источника электронов включает наряду со стандартными блоками, такими как источник ускоряющего напряжения, системы фокусировки и отклонения пучка и ряд специфических устройств — ПИЭЛ, блок питания разряда (БПР), систему управления током пучка и др. С другой стороны, к стандартным блокам предъявляются иные требования. Так, при использовании в энергокомплексе термокатодных пушек стабильность тока пучка определяется стабильностью ускоря-

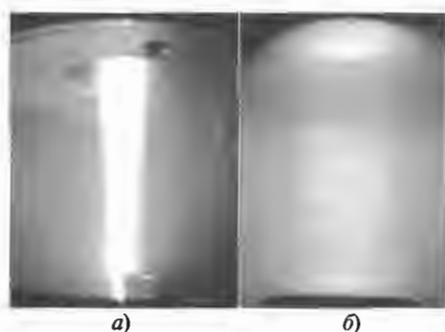


Рис. 6. Электронные пучки, генерируемые ПИЭЛ на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях:
 а — диаметр пучка 8 мм; б — 50 мм

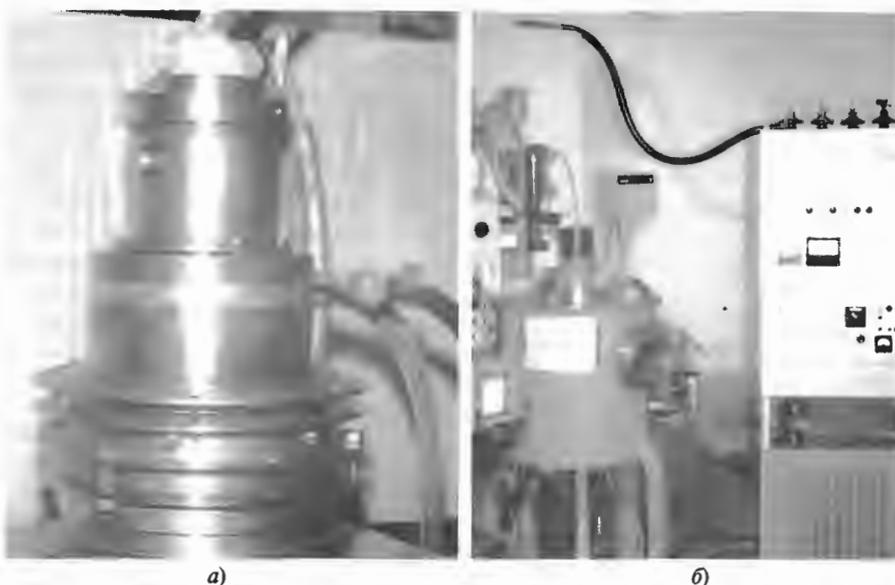


Рис. 7. Внешний вид электронной пушки (а) и электронно-лучевого энергокомплекса (б)

ющего напряжения, а при использовании ПИЭЛ — стабильностью тока разряда [9]. Это объясняется тем, что ток пушки с термокатодом при ограничении тока пространственным зарядом связан с напряжением законом "степени трех вторых". При этом эмиссия катода превышает ток пучка, изменение которого осуществляется соответствующим изменением потенциала управляющего электрода при постоянной эмиссионной способности термокатада. В связи с этим в качестве исполнительного элемента, обеспечивающего необходимый потенциал управляющего электрода, в схеме управления током пучка и его стабилизации используются управляемые источники напряжения. В ПИЭЛ ток пучка хотя и связан с ускоряющим напряжением законом, близким к закону "степени трех вторых", но он не ограничен пространственным зарядом (как в случае термокатодных пушек), а всегда равен току эмиссии, т.е. ПИЭЛ работает в режиме квазинасыщения тока [9]. Изменение тока пучка при этом достигается изменением эмиссионной способности плазмы. Это, а также возможность быстрого изменения тока разряда и линейный вид эмиссионной характеристики, делают целесообразным использование источника тока в качестве исполнительного элемента в схеме управления током пучка и его стабилизации. При этом возможно использование ускоряющих напряжений с более высоким коэффициентом пульсаций (до 5%), так как вольтамперная характеристика ускоряющего промежутка обычно имеет участок квазинасыщения, т.е. приближается к тетродной.

Вместе с тем, во многих случаях, для модернизации существующих электронно-лучевых энергокомплексов, как правило, достаточно заменить термокатодную пушку на пушку с плазменным эмиттером и блоки нагрева термокатада и управления током пучка — на блок питания разряда и управления. При этом все остальные устройства (вакуумная система, блок ускоряющего напряжения, система фокусировки, блок защиты и т.д.) могут быть оставлены без существенных изменений.

Как отмечалось, использование плазменного эмиттера налагает ряд требований на систему электропитания, которые реализуются, главным образом в системе электропитания плазменного эмиттера — блоке пита-

ния разряда. Во-первых, поскольку для газовых разрядов характерно превышение напряжения зажигания над напряжением горения разряда, а также вследствие возможности кратковременного погасания разряда, особенно в условиях кратковременного пробоя ускоряющего промежутка или при пониженном рабочем давлении, блок питания разряда должен осуществлять гарантированный поджиг разряда в любой момент времени технологического цикла. При этом должны быть выполнены требования по стабильности тока разряда с учетом реализации обратной связи по току пучка [8, 9, 30]. Во-вторых, реализация импульсного режима требует возможности формировать заданное количество импульсов тока разряда с регулируемой скважностью и длительностью (в диапазоне десятков — сотен микросекунд) с амплитудой до нескольких десятков ампер.

Известен ряд схем электропитания плазменных эмиттеров [9, 31, 32], при этом, как правило, используются ламповые схемы для стационарных режимов и искусственные формирующие линии для импульсных режимов, что вызывает ряд трудностей, в частности по повышению КПД, реализации обратных связей, автоматической регулировки параметров. При существующих тенденциях к максимальной автоматизации производственных процессов, внедрению ресурсо- и энергосберегающих технологий использование таких схем нецелесообразно.

Наиболее перспективными схемотехническими решениями, на наш взгляд, являются использование транзисторов в качестве регулирующих элементов в силовой части БПР и тиристоров в качестве электронных ключевых элементов при реализации импульсных режимов работы. При этом использование транзисторов в БПР позволяет ввести автоматическую регулировку тока разряда по току пучка, упростить стабилизацию тока разряда и позволяет внедрить процессорное управление током пучка, снизить массогабаритные характеристики блока и повысить его КПД. Применение тиристоров позволяет реализовать импульсный режим БПР, т.е. формировать требуемое количество импульсов тока разряда регулируемой длительности и частоты, без использования искусственной формирующей линии.

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 [19, 33]. 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. 4) [11].

Известно использование плазменных источников электронов для реализации электронно-лучевых технологий упрочнения поверхностей деталей машин и инструментов [11, 13, 29, 33]. В частности, нами проводилось упрочнение борсодержащих наплавленных покрытий и образцов деталей тракторов, выпускаемых Минским тракторным заводом [14, 15]. Для реализации электронно-лучевой поверхностной закалки использовался электронно-лучевой энергокомплекс, оснащенный плазменным источником электронов с экспандером (см. рис. 4). Плотность мощности регулировали изменением ускоряющего напряжения, тока пучка и диаметра электрон-

Восстанавливаемые детали	Достижимый эффект
Прокатные валки металлургических производств, воздушные и кислородные фурмы, кристаллизаторы непрерывной разливки стали Лопатки паровых и газовых турбин	Повышение стойкости за счет наплавки жаропрочного и износостойкого покрытия Замена напаянных на лопатки турбин дорогостоящих твердосплавных пластин, упрочнение новых деталей с увеличением ресурса работы в 1,5–2 раза Увеличение ресурса работы в 1,5–3 раза
Детали запорно-регулирующей трубопроводной арматуры в энергетике, нефтегазовой и нефтехимической промышленности Коленчатые валы двигателей, насосов, компрессоров, крестовины карданных передач	Увеличение ресурса работы в 2–5 раза
Детали, работающие в высокотемпературном газовом потоке с абразивными частицами Тяжело нагруженные подшипники, опоры	Увеличение ресурса работы до 10 раз по сравнению с жаростойкими сталями и сплавами Увеличение ресурса работы до 3 раз по сравнению со спеченными подшипниковыми материалами
Поршни из силумина для мощных дизельных двигателей Электрические контакты для высоковольтных выключателей	Восстановление изношенных поршней наплавкой разрушенных канавок под поршневые кольца Восстановление изношенных контактов. Изготовление контактов для вакуумных дугогасительных камер с двукратным удешевлением и новыми свойствами
Металло- и дереворежущий инструмент	Замена некоторых марок твердого сплава с одновременным удешевлением инструмента

ного пучка с помощью магнитной линзы.

Обработка борсодержащих покрытий. Покрытия на режущем инструменте подвергались воздействию электронным пучком диаметром до 10 мм, что обусловлено требуемой площадью воздействия, с оптимальной плотностью мощности $10^7 \dots 10^9 \text{ Вт/м}^2$. В результате обработки данных по твердости и трещиностойкости, установлено, что при электронно-лучевом воздействии (ЭЛВ) большинства анализируемых покрытий различных химических составов при плотности мощности около 10^7 Вт/м^2 формируются структуры с высокой твердостью (до HV 1000–1100 для покрытия на основе Р6М5) и удовлетворительной сопротивляемостью образованию трещин. Повышение плотности мощности приводит к резкому снижению трещиностойкости покрытий [13]. 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). Использо-

вание закалки из жидкого состояния оказывается более перспективным, в том числе и для борсодержащих инструментальных сталей. Установлено, что после электронно-лучевого перепада легированных сталей повышается плотность, теплопроводность и снижается их склонность к горячему трещинообразованию, увеличивается также их пластичность и ударная вязкость [5]. 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 [5]. Так покрытия, полученные закалкой из жидкого состояния в режиме с плотностью мощности $q = (1-5) \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$, отличаются высокой твердостью HV 1122 \pm 56 и весьма низкой трещиностойкостью. Глубина упрочненной зоны составляет 100...800 мкм. Покрытия, полученные электронно-лучевой обработкой с плотностью мощности $q = (1-2) \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$ имеют также достаточно высокую твердость 1000 \pm 85 HV, однако их трещиностойкость выше. Глубина модифицированной зоны воздействия достигает

1 мм [14]. Проведенный отпуск образцов, подвергнутых электронно-лучевому воздействию, повышает трещиностойкость материала в 1,5–2 раза при незначительном снижении твердости на HV 50...100.

Поверхностная закалка. Электронно-лучевому упрочнению подвергались цилиндрические образцы деталей тракторов (сталь 45, сталь 40X, исходная твердость HV 200...220, параметры воздействия: ширина воздействия — 8...12 мм, плотность мощности — $(1...5) \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$, 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 дюрметрические 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 HV 350...500; при закалке из жидкого состояния — толщиной 700...750 мкм и с микротвердостью HV 350...450. Поверхностная твердость по ширине упрочненной зоны составила HRC₃ 40...45. Распределение микротвердости по

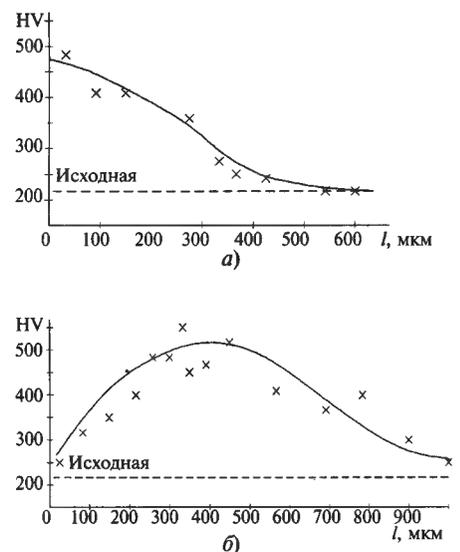


Рис. 8. Микротвердость поверхностного слоя стали, подвергнутого электронно-лучевому воздействию: а — закалка из твердого состояния; б — закалка из жидкого состояния

глубине упрочненного слоя представлено на рис. 8. 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 (рис. 8, б). Это позволяет проводить окончательную размерную механическую обработку поверхностей с сохранением свойств упрочненного слоя.

Таким образом, изложенное в статье, на наш взгляд, показывает перспективы и возможности использования плазменных источников электронов для реализации широкого спектра электронно-лучевых технологий в машиностроении.

Список литературы

1. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевые технологии. — М.: Энергия, 1980. — 528 с.

2. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др.; Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наукова думка, 1987. — 256 с.

3. Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1978. — 240 с.

4. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, П. В. Зуев, А. Н. Кокора — М.: Машиностроение, 1985. — 496 с.

5. Шипко А. А., Поболь И. Л., Урбан И. Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева. — Минск: Наука і тэхніса, 1995. — 280 с.

6. Алямовский И. В. Электронные пучки и электронные пушки. — М.: Советское Радио, 1966. — 454 с.

7. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М. А. Завьялов, Ю. Е. Крейндел, А. А. Новиков, Л. П. Шантурин — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 212 с.

8. Крейндел Ю. Е. Плазменные источники электронов. — М.: Атомиздат, 1977. — 145 с.

9. Источники электронов с плазменным эмиттером / Под ред. Ю. Е. Крейндела. — Новосибирск: Наука, 1983. — С. 80–91.

10. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / В. А. Бурдовин, В. Л. Галанский, В. А. Груздев

и др. — Екатеринбург: Наука, 1993. — 149 с.

11. 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.

12. Бугаев С. П., Крейндел Ю. Е., Шанин П. М. Электронные пучки большого сечения. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 112 с.

13. Пантелеенко Ф. И., Снарский А. С. Исследование влияния электронно-лучевой обработки на эксплуатационные свойства борсодержащего материала лезвийного металлорежущего инструмента // Вісник ЖІТІ. — 2001 / Технічні науки. — С. 242–243.

14. Изучение влияния электронно-лучевого воздействия на структуру и свойства боридостали / Ф. И. Пантелеенко, В. Г. Залесский, А. С. Снарский, В. И. Сороговец // 6-я Межд. конф. "Пленки и покрытия 2001": Труды конф. / Под ред. В. С. Клубника. — С.-Пб.: 2001. — С. 582–586.

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

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

17. 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.

18. 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. Rempe // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1994. — Vol. 27. — P. 953–961.

19. Семенов А. П., Семенова И. А. Газоразрядные источники с эмиссией заряженных частиц из плазмы тлеющего разряда с полым катодом // Изв. ВУЗов. Физика. — 2001. — Т. 44. — № 9. — С. 69–76.

20. Москалев Б. И. Разряд с полым катодом. — М.: Энергия, 1969. — 184 с.

21. Окс Е. М., Чагин А. А. Эмиссионные свойства плазмы сверхплотного

тлеющего разряда, возбуждаемого в скрещенных $E \times H$ полях // ЖТФ. — 1991. — Т. 61. Вып. 6. — С. 204–206.

22. 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. — Минск: 1997. — Т. 1. — С. 44–47.

23. Дж. Лоусон. Физика пучков заряженных частиц / Пер. с англ. А. В. Агафонова; Под ред. А. А. Коломенского. — М.: Мир, 1980. — 438 с.

24. Кирштейн П. Т., Кайно Г. С., Уотерс У. Е. Формирование электронных пучков / Пер. с англ. Э. Я. Пастрона и др.; Под ред. Л. В. Шубина. — М.: Мир, 1970. — 360 с.

25. Царев Б. М. Расчет и конструирование электронных ламп. — М.: Энергия, 1967. — 671 с.

26. Пат. ВУ 220 У, МПК Н 01 J 3/04 Плазменный источник электронов / Груздев В. А., Залесский В. Г. — № 20000085; Заявл. 1.06.2000.

27. Пат. ВУ 469 У, МПК Н 01 J 3/04, выдан 8.11.2001. Плазменный источник электронов с пучком большого сечения / Груздев В. А., Залесский В. Г., Голубев Ю. П. — № u20010194; Заявл. 31.07.2001; Опубл. 30.03.2002.

28. 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.

29. 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. — Минск: Технопринт; Новополоцк: ПГУ, 2001. — С. 369–372.

30. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др.; Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наукова думка, 1987. — 256 с.

31. Коваль Н. Н., Нигоф М. Б. Источник питания плазменного эмиттера // ПТЭ. — 1980. — № 6. — С. 121–123.

32. Мельников В. Б. Источник питания плазменного эмиттера с регулируемыми параметрами // ПТЭ. — 1987. — № 3. — С. 137–138.

33. Electron beam facing of powdered materials / V. E. Panin, S. I. Belyuk, V. G. Durakov et al. // Proc III Intern. Symp. SIB-CONVERS'99. — Tomsk, 1999. — Vol. 2. — P. 548–550.