

11. Руденская Н.А., Жилиев В.А., Панкратов А.А. Особенности формирования и свойства плазменных композиционных покрытий типа стеллит-нитрид титана. // Защита металлов. — 1999. — Т. 35. — №1. — С. 1–4.

12. Клинская Н.А., Жилиев В.А. Патент РФ №2103112. Плакированный порошок и способ его получения. Оpubл. 27.01.98. Бюл. №3.

13. Евтушок Т.М., Жунковский Г.Л., Ильченко Н.С. и др. Детонационные покрытия на основе тугоплавких соединений титана // Защитные покрытия на металлах. — 1987. — Вып. 21. — С. 50–53.

14. Клинская-Руденская Н.А., Копысов В.А., Вилисов В.А., Бобов А.П. Взаимодействие Ni-Cr-B-Si-покрытий со сталью в процессе оплавления // Сварочное производство. — 1991. — №4. — С. 32–34.

15. Клинская-Руденская Н.А., Копысов В.А. Особенности композиционных покрытий на основе Ni-Cr-B-Si-сплава. Иссле-

дование микроструктуры покрытий // Физика и химия обработки материалов. — 1995. — №1. — С. 69–81.

16. Клинская-Руденская Н.А., Кузьмин Б.П. О влиянии тугоплавких добавок на структуру и свойства покрытий из самофлюсующихся сплавов // Физика и химия обработки материалов. — 1996. — №1. — С. 55–61.

17. Коломыцев П.Т. Структура сплавов никель-хром-бор // Докл. АН СССР. — 1962. — Т. 144. — №1. — С. 112–114.

18. Руденская Н.А., Жилиев В.А., Копысов В.А. Патент РФ № 2136777. Оpubл. 10.09.99. Бюл. №25.

19. Попель С.И., Никитин Ю.П., Бармин Л.А. и др. Взаимодействие расплавленного металла с газом и шлаком. Свердловск: УПИ, 1975. — 180 с.

20. Клинская-Руденская Н.А., Костогоров Е.П., Курьлев М.В., Цхай Е.В. // Трение и износ. — 1999. — Т.20. — №1. — С. 74–79.

## ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ – ПЕРСПЕКТИВНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Представлен анализ проблемы применения электронно-лучевых технологий на предприятиях Беларуси. Дан обзор методов и оборудования для осуществления электронно-лучевого воздействия, определены перспективы использования плазменных источников электронов.*

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 Беларуси 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 требовани-

ям европейских и международных стандартов качества (ISO).

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 появлением 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

В.А. Труздев,

доктор  
технических наук,  
профессор,  
заведующий  
кафедрой физики,

В.Т. Залеский,

кандидат  
технических наук,  
доцент кафедры  
физики,

Д.А. Антонович,

Ю.П. Голубев,  
аспиранты.

Полоцкий  
государственный  
университет.

стоимости оборудования, на улучшение 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 предопределяют 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, таких как «Автоматическая сварка», «Сварочное производство», «Инженерно-физический журнал», «Прикладная физика», «Физика и химия обработки материалов», «Сварщик» и др.

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 таким достоинством, как высокое качество электронного пучка, обладает рядом недо-

статков [1–3]. Основными недостатками в значительной степени сдерживающими 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 и 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 лаборатор-

ных 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 16000 до 80000 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 позволяет не только 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 стойкость 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 достаточно большого сечения можно по-

лучить 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 (порядка  $100 \text{ А/см}^2$  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 наибольшие 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 полым 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 инициирующего 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 газо-

Рис. 1. Электродные системы.

а — отражательного разряда с полым катодом [17]:

1 — полый катод;  
2 — анод;  
3 — отражательный катод;

4 — эмиссионный канал;

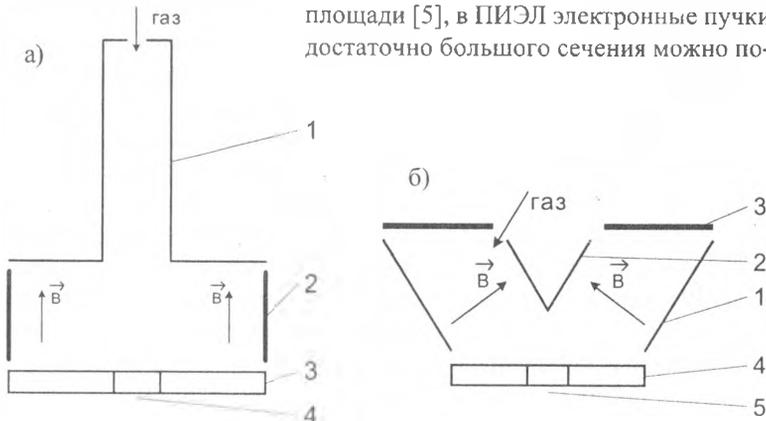
б — разряда в скрещенных  $E \times H$  полях: 1 — внешний катод;

2 — внутренний катод;

3 — анод;

4 — эмиттерный электрод;

5 — эмиссионный канал.

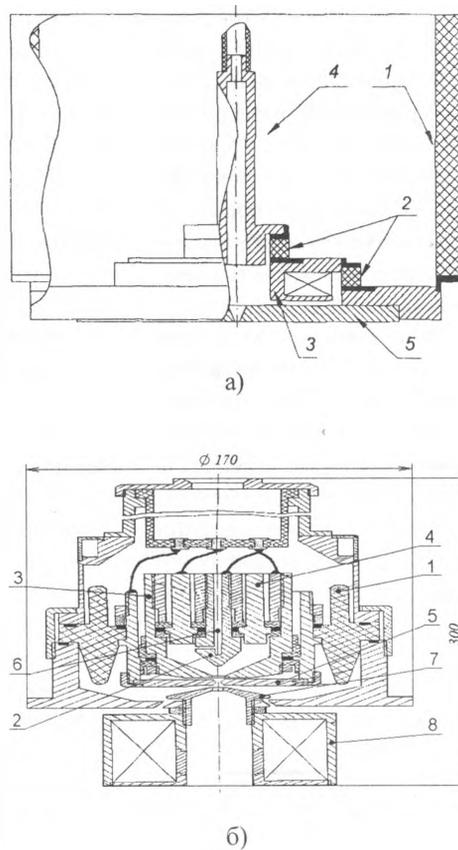


разрядная структура, представленная на рис. 1 б, позволяющая получать эмиттирующую плазму, отличающуюся высокой стабильностью эмиссионных свойств при повышенных рабочих давлениях [22].

Однако плазменный эмиттер — это не только газоразрядная структура, но и система первичного формирования электронного пучка, область ускорения и транспортировки электронов. Поэтому 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 соответствующих 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).

Рис. 2. Конструкции источников электронов.  
 а — на основе отражательного разряда с полым катодом [11, 17]:  
 1, 2 — металло-керамические изоляторы;  
 3 — анод; 4 — полый катод;  
 5 — эмиттерный электрод;  
 б — на основе разряда в скрещенных  $E \times H$  полях [26]:  
 1 — изоляторы;  
 2, 3 — катоды;  
 4 — анод;  
 5 — эмиттерный электрод; 6 — канал для выпуска газа;  
 7 — экстрактор (ускоряющий электрод);  
 8 — линза



На рис. 2, а представлена конструкция плазменного источника электронов, удов-

летворяющая 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 тока разряда. При реализации смещения потенциала эмиттерного электрода источника крутизна зависимости  $I_n(I_r)$  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  $p = 1,5 \times 10^{-4}$  мм рт.ст., 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).

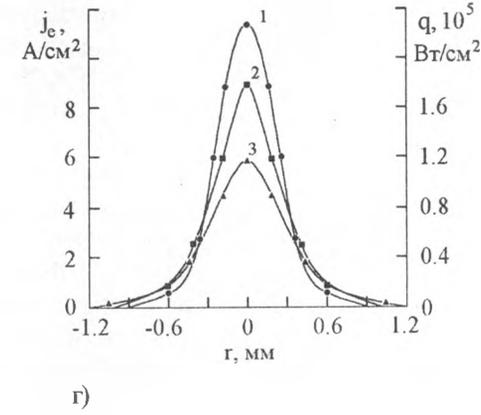
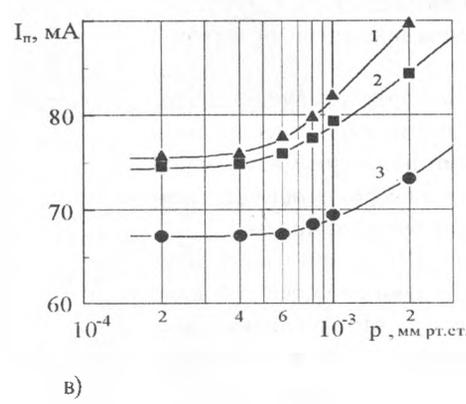
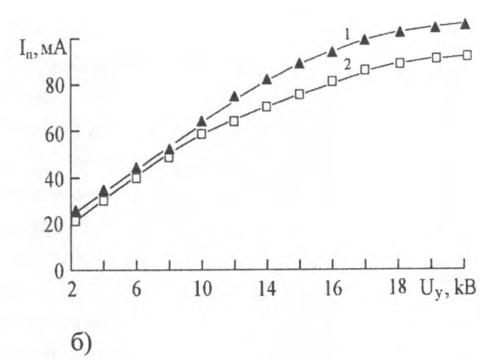
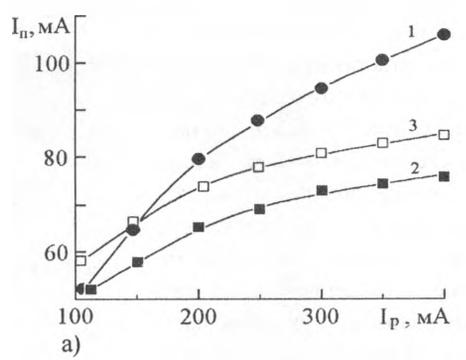
Таблица 1

Параметры	ПИЭЛ на основе отражательного разряда с полым катодом	ПИЭЛ на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях
Ускоряющее напряжение $U_y$ , кВ	до 50	до 30
Ток луча $I_n$ , А	до 0,1	до 0,15
Ток разряда $I_p$ , А	до 0,3	до 0,4
Напряжение горения разряда, В	до 400	до 450
Расход плазмообразующего газа $Q$ , атм·см <sup>3</sup> /ч	30–200	20–100
Диапазон давления в рабочей камере $p$ , мм рт.ст.	от глубокого вакуума до $(5-7) \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-3}$

Анализ распределения плотности мощности в пучке, которое приводится на рис 3, г, показывает, что максимальное значение  $q_{max} = 10^9$  Вт/м<sup>2</sup> и эффективный диаметр электронного пучка (который определяется на уровне  $0,1q_{max}$ ) соответствуют типичным значениям плотности мощности электронных пучков, применяемых для электронно-лучевой сварки [2]. Это, а также вид газовой характеристики, позволяют применять данный источник для сварки, в том числе и материалов с повышенным газоотделением в процессе термообработки.

ПИЭЛ отличается тем, что эмиттирующая плазма формируется в электродерасширителе (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 техноло-

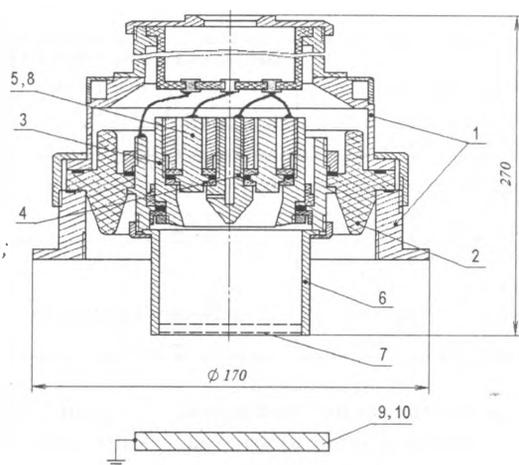
Рис. 3. Характеристики источника  
 а – эмиссионная:  
 $U_y = 18$  кВ;  $Q = 60$  атм·см<sup>3</sup>/ч;  
 1, 2 –  $p = 4 \cdot 10^{-4}$  мм рт.ст.;  
 3 –  $p = 10^{-3}$  мм рт.ст.;  
 1 –  $R = 0$ ;  
 2, 3 –  $R = 1$  кОм;  
 б – вольтамперная:  
 $Q = 60$  атм·см<sup>3</sup>/ч;  $I_p = 0,2$  А; 1 –  $p = 4 \cdot 10^{-4}$  мм рт.ст.;  
 2 –  $p = 10^{-3}$  мм рт.ст.;  
 1 –  $R = 0$ ;  
 2 –  $R = 1$  кОм;  
 в – газовая характеристика:  
 $U_y = 16$  кВ;  $Q = 60$  атм·см<sup>3</sup>/ч; 1 –  $R = 0$ ;  
 2 –  $R = 0,5$  кОм,  
 3 –  $R = 1$  кОм;  
 г – распределение плотности тока и плотности мощности по сечению пучка:  
 $U_y = 18$  кВ;  $Q = 60$  атм·см<sup>3</sup>/ч;  $I_p = 0,2$  А;  
 1 –  $R = 0,08$  А;  
 1 –  $R = 1$  кОм;  
 2 –  $R = 0,5$  кОм,  
 3 –  $R = 0$ .



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].

гические возможности. Конструкция экспандера также предполагает возможность генерации электронных пучков с сечением, отличным от кругового, — линейчатых, кольцевых и т.д. Особенностью данно-

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



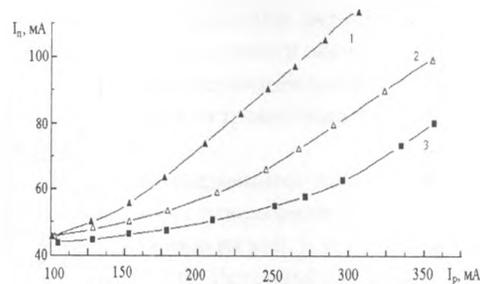
го источника является также возможность работы в импульсном режиме.

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.

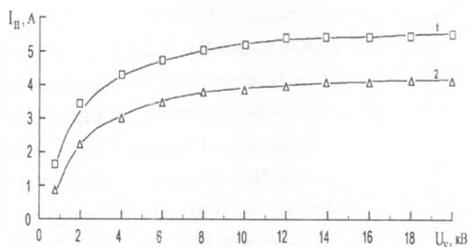
На рис. 5 представлены типичные характеристики источника с пучком большого сечения ( $\xi$  – прозрачность сеточного эмиттерного электрода). Источник обеспечивает параметры, представленные табл. 2 и 3 [28, 29].

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

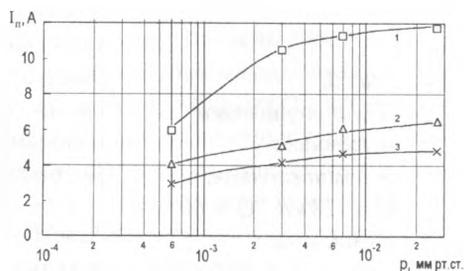
Испытания ПИЭЛ при электронно-лучевом воздействии на борсодержащие материалы показали, что электронно-лучевой энергокомплекс, оснащенный разработанным ПИЭЛ, позволяет реализовать требуемые режимы электронно-лучевой обработки. Обработанные покрытия обладают высокой твердостью до 1000–1100 НВ, износостойкостью при удовлетворительной сопротивляемости хрупкому разрушению [29, 30].



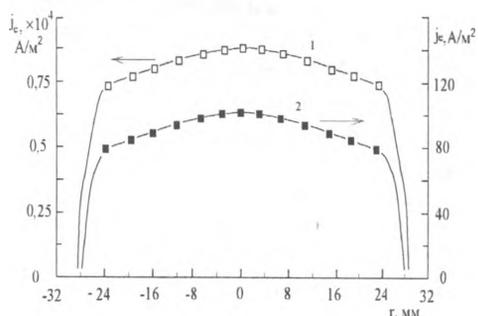
б)



б)



в)



г)

Рис. 5. Характеристики источника с пучком большого сечения  
 а – эмиссионная:  $\xi = 0,472$ ;  $U_y = 10$  кВ;  
 1 –  $Q = 1000$  атм·см<sup>3</sup>/ч;  
 2 –  $Q = 890$  атм·см<sup>3</sup>/ч;  
 3 –  $Q = 800$  атм·см<sup>3</sup>/ч;  
 б – вольтамперная в импульсном режиме:  $p = 10^{-3}$  мм рт.ст.;  
 $Q = 630$  атм·см<sup>3</sup>/ч; 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: 1 – импульсный режим; 2 – стационарный режим

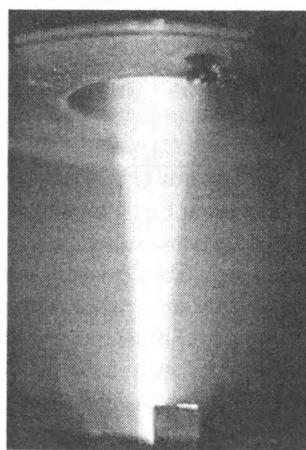
Таблица 2

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 <sup>2</sup>	20
Плотность эмиссионного тока (при диаметре пучка $D_{max}$ ) $j_e$ , А/м <sup>2</sup>	до $10^4$
Ускоряющее напряжение $U_y$ , кВ	20
Плотность мощности (при диаметре пучка $D_{max}$ ) $q$ , Вт/м <sup>2</sup>	до $2 \cdot 10^8$
Диапазон рабочих давлений $p$ , мм рт.ст.	$6 \cdot 10^{-4} - 10^{-2}$

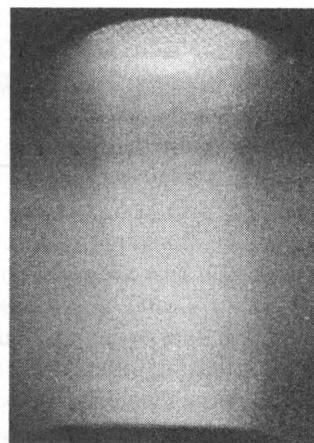
Таблица 3

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

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

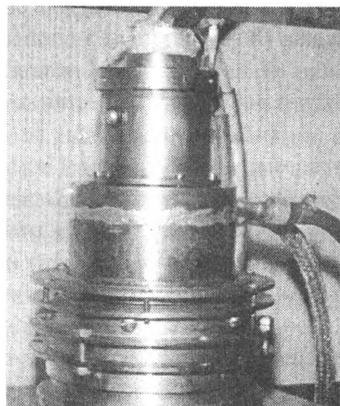


а)

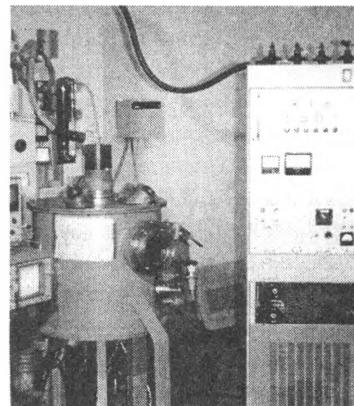


б)

Рис. 7. Внешний вид электронной пушки и электронно-лучевого энергокомплекса



а)



б)

Таблица 4

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

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, 30]. 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, 30].

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].

Несмотря на перспективность электронно-лучевых технологий, область применения их на предприятиях Беларуси остается крайне ограниченной. Это сопряжено с рядом проблем. Предприятия, которые по требованиям стандартов качества обязаны применять эти технологии, вынуж-

дены их реализовывать на зарубежных предприятиях, как правило, России и Украины. Это ставит отечественных производителей в жесткую зависимость, снижает конкурентоспособность продукции на внутреннем и внешнем рынках. Однако даже те предприятия, которые владеют электронно-лучевыми технологиями, испытывают значительные трудности по поддержанию работоспособности соответствующего оборудования. Это обусловлено рядом причин. Во-первых, действующие установки являются термокатодными, что требует значительных затрат по их обслуживанию (замена термокатодов – тантал, ванадий и т.д.). Во-вторых, эти установки, как правило, выработали свой ресурс. За этот период большинство предприятий-изготовителей уже прекратили свое существование или изменили вид деятельности, что создает проблемы по ремонту и замене комплектующих действующих электронных установок.

Выходом из сложившейся ситуации может быть создание отечественного электронно-лучевого энергокомплекса на базе разработанных в ПГУ пучков с плазменным эмиттером, адаптированного к нуждам предприятия-потребителя. Это позволило бы снизить расходы, повысить качество и конкурентоспособность изделий, в том числе в области импортозамещения и экспорта.

### Литература

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. – К.: 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. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 280 с.
6. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. – М.: Сов. радио, 1966. – 454 с.
7. Плазменные процессы в технологических электронных пучках / М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндель, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 212 с.
8. Крейндель Ю.Е. Плазменные источники электронов. – М.: Атомиздат, 1977. — 145 с.
9. Мощные сварочные электронные пушки с плазменным катодом / С.И. Белюк, А.А. Каплан, Ю.Е. Крейндель, Н.Г. Ремпе // Источники электронов с плазменным эмиттером / Под ред. Ю.Е. Крейнделя. — Новосибирск: Наука, 1983. — С. 80–91.
10. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / В.А. Бурдовицин, 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., Крейндель Ю.Е., Щанин 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 боросодержащего 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. – СПб, 2001. – С. 582–586.
15. 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.
16. 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.
17. Источники электронов с плазменным эмиттером на основе отражательно-го 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 ЕХН 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. — Мн., 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. Кириштейн П.Т., Кайно Г.С., Уотерс У.Е. Формирование электронных пучков / Пер. с англ. Э.Я. Пастроны 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 U, МПК H01J 3/04. Плазменный источник электронов / Груздев В.А., Залесский В.Г. — № 20000085; Заявл. 1.06.2000.

27. Пат. ВУ 469 U, МПК H 01J 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. — Мн.: Технопринт; Новополоцк: ПГУ, 2001. — С.369–372.

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