

УДК 537.533

**ПЛАЗМЕННЫЕ ЭМИССИОННЫЕ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Часть 1

*д-р физ.-мат. наук, доц. В.Г. ЗАЛЕССКИЙ,
д-р техн. наук, проф. И.Л. ПОБОЛЬ
(Физико-технический институт НАН Республики Беларусь, Минск);
д-р техн. наук, проф. В.А. ГРУЗДЕВ,
канд. техн. наук, доц. Д.А. АНТОНОВИЧ, П.Н. СОЛДАТЕНКО
(Полоцкий государственный университет)*

С целью поддержания конкурентоспособности на рынке машиностроения, предприятия вынуждены предъявлять более жесткие требования к качеству производимой продукции, в связи с чем повышаются требования к процессам сварки, обработки поверхности и др. Для достижения предъявляемых требований предлагается использовать плазменный источник электронов. Представлены основные электронно-лучевые технологии. Предложена газоразрядная структура источника, способная формировать электронные и ионные пучки с параметрами, удовлетворяющими представленным технологиям.

Ключевые слова: электронно-лучевая пушка, сварка, электронно-лучевые технологии

Введение. К настоящему времени электронно-лучевые технологии нашли достаточно широкое применение в различных отраслях. Это стимулировало разработку источников электронов, реализующих широкий спектр технологических параметров, различающихся по мощности, плотности тока, режимам работы, газодинамическим условиям работы (давление остаточного газа и расход плазмообразующего газа). Для решения конкретных задач могут формироваться как сфокусированные пучки высокой яркости, так и пучки большого сечения круговой или другой формы [1]. Многообразие требований, предъявляемых к технологическим электронным пучкам, не удается реализовать в источниках одного типа. Наибольшее распространение получили три основных типа источников пучков электронов: источники электронов с термокатодом, источники на основе высоковольтных тлеющих разрядов и плазменные источники электронов [2]. В данной работе представлены конструкции плазменных источников электронов на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях, способные формировать высоко- и низкоэнергетичные пучки заряженных частиц для реализации широкого спектра электронно-лучевых технологий.

Источник электронов для формирования высокоэнергетичных электронных пучков.

На рисунке 1 приведена конструкция (а) и электродная структура (б) плазменного источника электронов, в котором реализованы принципы формирования эмиссионного тока за счет создания условий переключения без осевой неоднородности плазмы с ограничением эффективности извлечения, как в более известных источниках электронов на основе полого катода.

Разряд возбуждается в пространстве между катодами 1 и 2 (рис. 1, а) (область I, рис. 1, б). Плазмообразующий газ подается в пространство между катодами, а перепад давлений обеспечивается геометрией эмиссионного канала. Формирующаяся в разряде между катодами плазма диффундирует в область эмиссионного канала. Этому способствуют дополнительные электроды 3 и 4 (с анодным или промежуточным потенциалом), которые выполняют роль эмиттерного. Извлечение электронов осуществляется через эмиссионный канал в эмиттерном электроде с анодным (или близким к нему) потенциалом. Присутствие магнитного поля практически во всем объеме разрядной структуры способствует эффективной ионизации газа. В такой электродной структуре исключается стадия инициирования разряда, что отражается на форме вольтамперных характеристик (см. рис. 1, в).

В области эмиссионного канала (область II, рис. 1, б) магнитное поле имеет продольное оси канала направление индукции и не препятствует эмиссии электронов. Движение электронов в область II из области I осуществляется в слабом магнитном поле с поперечной компонентой вектора индукции, что в определенной мере ограничивает движение электронов в область эмиссионного канала (замагничивая только электроны) и затрудняет переключение электронного тока из плазмы в эмиссионный канал.

При возбуждении разряда эмиттерный электрод выполняет роль вспомогательного анода и значение его потенциала не так критично для формирования газоразрядной плазмы, как потенциал эмиттерного электрода в разряде с полым катодом [3].

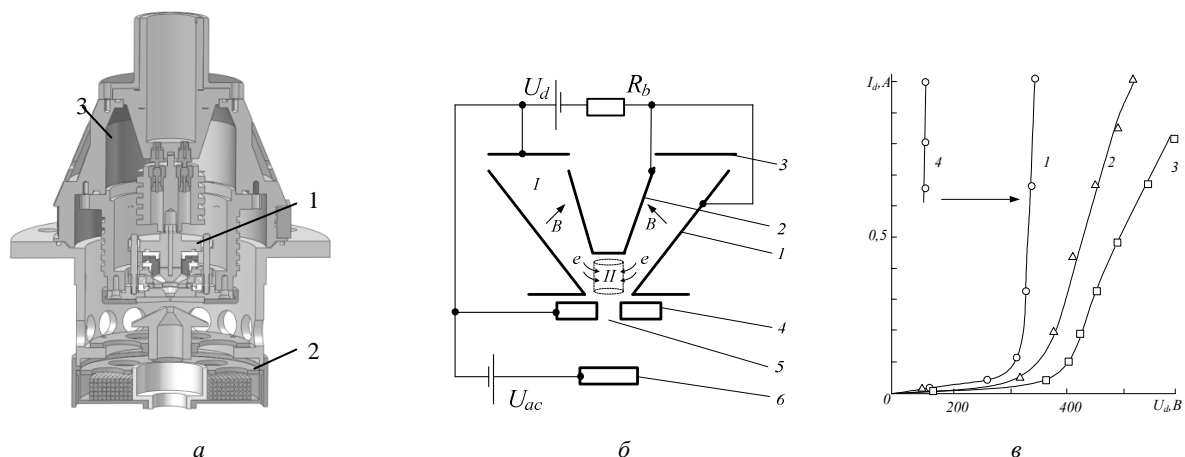


Рисунок 1. – Плазменный источник электронов:

а – конструкция (1 – генератор плазмы; 2 – магнитная линза; 3 – корпус);
б – электродная структура (1 – внешний катод; 2 – внутренний катод; 3 – анод; 4 – эмиттерный электрод;
 5 – эмиссионный канал; 6 – ускоряющий электрод; U_d – напряжение горения разряда; U_{ac} – ускоряющее напряжение; R_b – балластное сопротивление; B – индукция магнитного поля e – напуск газа);
в – вольтамперные характеристики источника электронов (мПа·м³/с: 1 – 2,8; 2, 4 – 1,7; 3 – 1,25)

Экспериментальные результаты позволили сформулировать следующие способы управления эффективностью извлечения и стабильности эмиссионного тока в плазменном эмиттере данного типа, которые не реализуемы в плазменных источниках электронов на основе полого катода. Первый способ заключается в создании условий для перераспределения токов между эмиттерным электродом и эмиссионным каналом путем изменения параметров слоя пространственного заряда вблизи эмиттерного электрода. Это может быть обеспечено как автоматическим смещением потенциала эмиттерного электрода (сопротивлением смещения в цепи соответствующего электрода), так и за счет использования вставок в эмиттерный электрод в области эмиссионного канала под плавающим потенциалом. Второй способ реализуется посредством создания в эмиттирующей плазме электрических полей, обеспечивающих формирование потоков электронов в область эмиссионного канала. Интенсивность таких потоков определяется конфигурацией магнитного и электрического полей (смещением потенциала анода относительно эмиттерного электрода) в газоразрядной структуре и давлением газа (величиной напуска газа в разрядную камеру).

На рисунке 2 представлены типичные характеристики данного источника. К основному достоинству данного источника можно отнести слабую зависимость эмиссионного тока от давления вплоть до 0,3 Па, (рис. 2, в). Эта особенность реализуется как за счет особой конфигурации электродов разрядной камеры, так и вследствие дополнительной автостабилизации параметров электронного пучка включением сопротивления R в цепь эмиттерного электрода относительно анода. На рисунке 2, г представлены также распределения плотности тока и плотности мощности электронного пучка по сечению. Анализ распределений показывает, что максимальное значение плотности мощности $q_{max} \approx 10^9$ Вт/м² и эффективный диаметр электронного пучка (который определяется на уровне 0,1 q_{max}) соответствуют типичным значениям плотности мощности электронных пучков, применяемых для электронно-лучевой сварки. Это, а также вид газовой характеристики свидетельствуют о возможности применения данного источника для сварки, в том числе и материалов с повышенным газоотделением в процессе термообработки [4].

На рисунке 3 представлены электронно-оптические характеристики пучков, формируемых в данном источнике электронов. Для сравнения на тех же рисунках приведены зависимости для аналогичного источника на основе разряда в полом катоде. Представленные зависимости расходимости (рис. 3, а), эмиттанса (рис. 3, б) и яркости (рис. 3, в) электронного пучка от приведенной напряженности поля в ускоряющем промежутке соответствуют типичным зависимостям сварочных электронных пучков [4].

Области применения. Приведенные выше характеристики свидетельствуют о возможности применения представленного плазменного источника для реализации «классических» сварных технологий. При этом традиционные применения электронно-лучевой сварки (ЭЛС) обычно предусматривают получение глубокого «кинжального» проплавления на большую глубину (до сотен миллиметров). Однако существует большое количество вариантов изделий, для которых не обязательно получение таких швов, при этом требуется очень высокое их качество. Речь идет об изделиях с высоким качеством и надежно-

стью сварных соединений, а также деталях из высокочистых и высокоактивных металлов. Ниже приведен ряд примеров возможного использования представленного источника электронов.

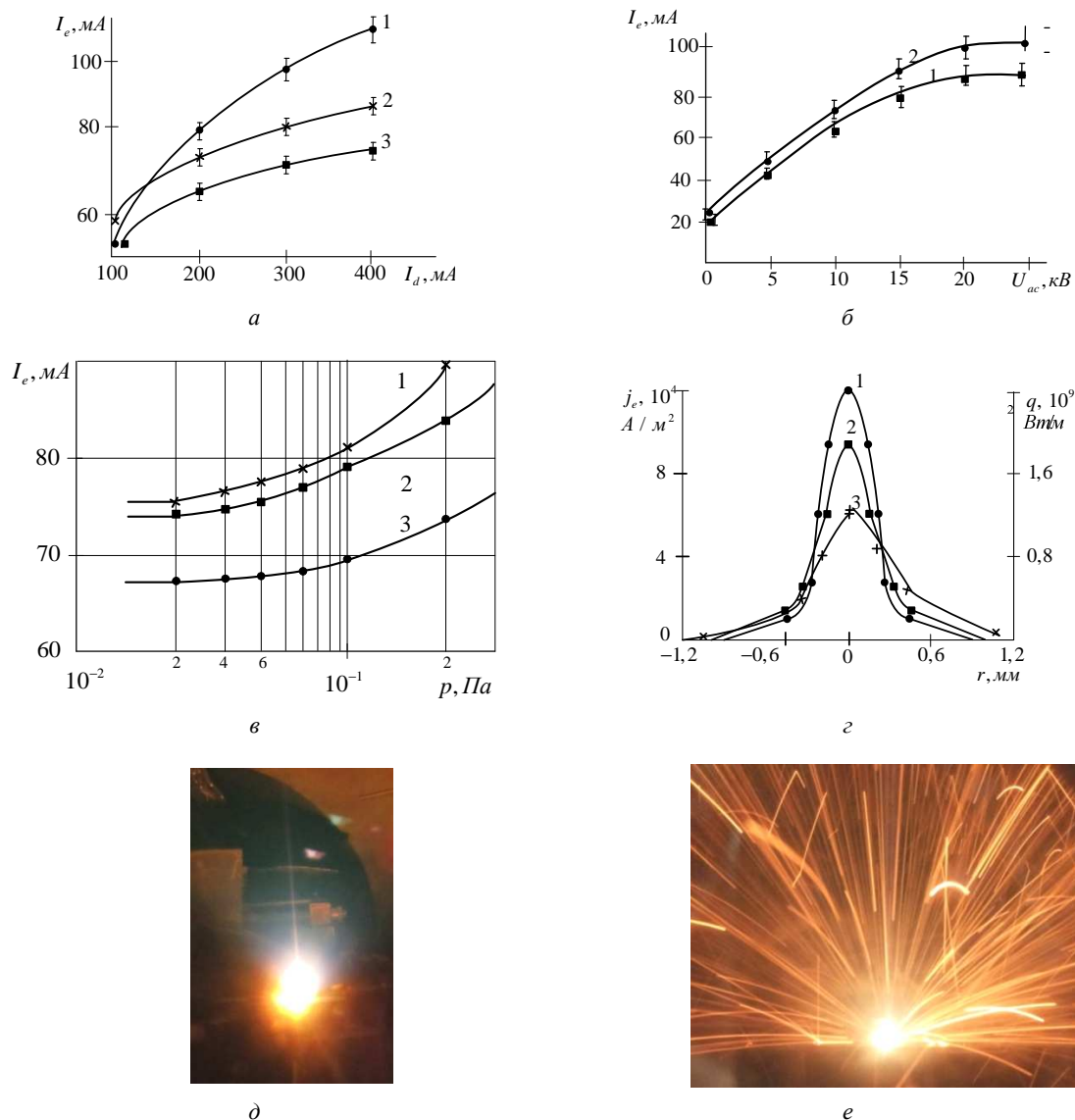


Рисунок 2. – Основные характеристики плазменного источника электронов (*a* – эмиссионная характеристика: ускоряющее напряжение 18 кВ; напуск газа $1,5 \text{ мПа}\cdot\text{м}^3/\text{с}$; давление, Па: 1, 2 – 0,04; 3 – 0,1; $R_{\text{см}2}$, кОм: 1 – 0; 2, 3 – 1; *b* – вольтамперная характеристика: напуск газа $1,5 \text{ мПа}\cdot\text{м}^3/\text{с}$; ток разряда 0,2 А; давление газа, Па: 1 – 0,04; 2 – 0,1; *в* – газовая характеристика: ускоряющее напряжение 16 кВ; напуск газа $1,5 \text{ мПа}\cdot\text{м}^3/\text{с}$; $R_{\text{см}2}$, кОм: 1 – 0; 2 – 0,5; 3 – 1; *г* – распределение плотности тока и плотности мощности по сечению пучка: ускоряющее напряжение 18 кВ; напуск газа $1,5 \text{ мПа}\cdot\text{м}^3/\text{с}$; ток разряда 0,2 А; ток эмиссии 0,08А; $R_{\text{см}2}$, кОм: 1 – 1; 2 – 0,5; 3 – 0) и фото пучка в процессе сварки различных материалов (*д*, *е*)

Электронно-лучевой переплав высокоактивных металлов. Одна из традиционных электронно-лучевых технологий – переплав высокоактивных металлов, который необходимо проводить в вакууме. При этом коэффициент использования мощности луча достигает 90% [5]. При выполнении переплава металлов и сплавов удаляемые из них загрязнения и металлические пары попадают в электронно-лучевую (ЭЛ) пушку, в случае использования накаливаемых катодов они достаточно быстро выходят из строя. Практика показала, что металлургические процессы, связанные с интенсивным испарением, целесообразно проводить пушками с плазменным источником электронов.

Из технологических отходов высокоактивных металлов (циркония, титана, ниобия и др.) переплавом можно получать однородные по структуре отливки, которые пригодны для повторного использования, например в качестве катодов-мишеней. В качестве материала для ЭЛ переплава использовали

стружку циркония ($T_{пл} = 1855^\circ\text{C}$) и титана ($T_{пл} = 1668^\circ\text{C}$). Оработаны методы изготовления ЭЛ плавкой новых и регенерации изношенных катодов – мишеней для магнетронных и дуговых систем вакуумного распыления из чистых Ti, Zr, Hf, сплавов Ti и Zr с Cr, Al, В, Мо и др., в том числе из лома и стружки. Катоды-мишени используются для получения методом конденсации с ионной бомбардировкой новых высокоэффективных покрытий.

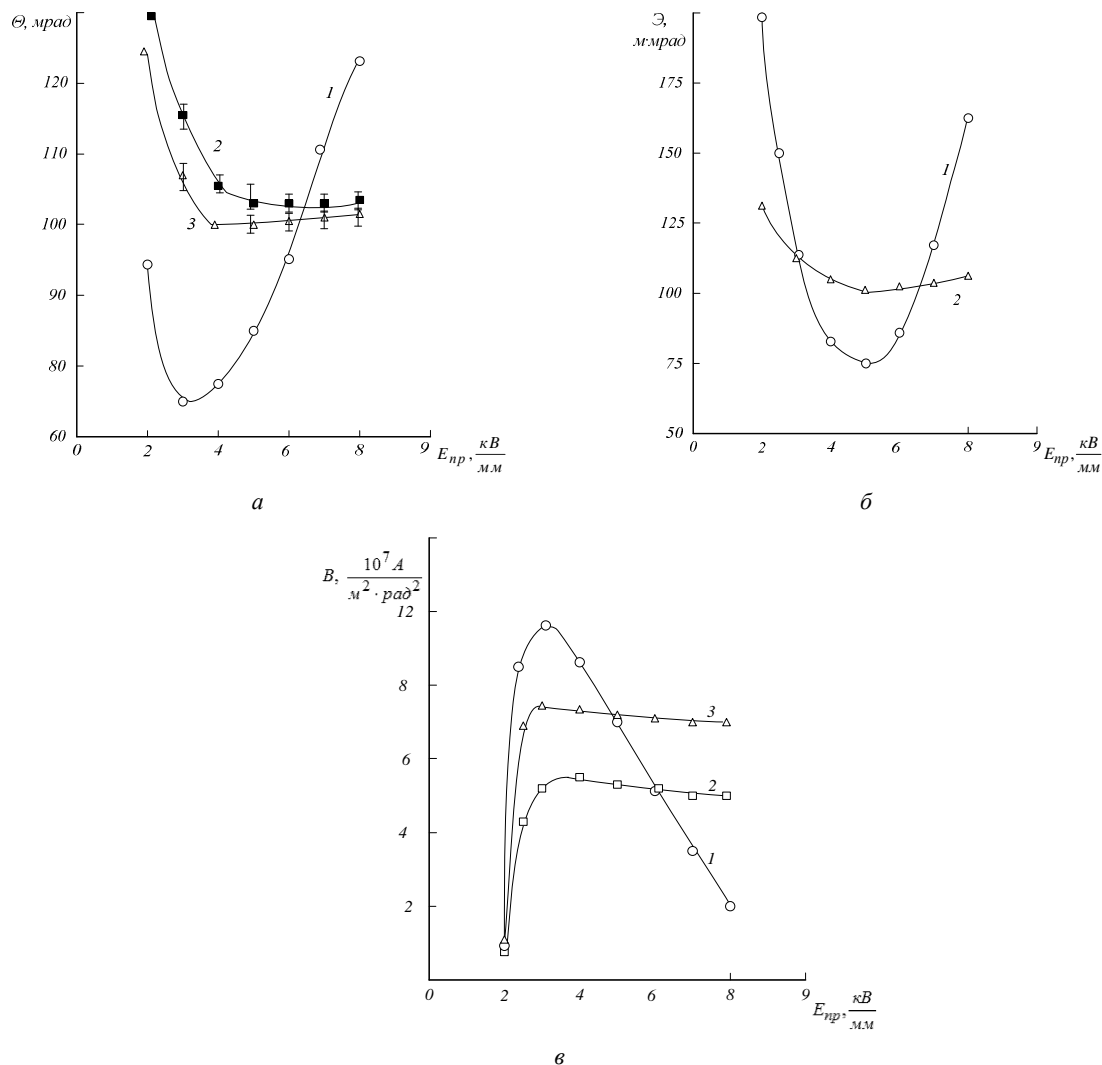


Рисунок 3. – Зависимость расходимости (а), эмиттанса (б) и яркости (в) электронного пучка от приведенной напряженности:
ток разряда 0,2 А, ток эмиссии 0,05 А, напуск газа, мПа·м³/с: 1, 2 – 2,2, 3 – 3,3;
радиус эмиссионного канала, мм: 1 – 1,1, 2, 3 – 0,9; длина канала, мм: 1 – 0,8, 2, 3 – 2;
1 – ИЭП на основе ОРПК, 2, 3 – ИЭП на основе ОРМ

Обращение с обработавшим ядерным топливом (ОЯТ). Анализ доступных данных по конструкциям стеллажей для мокрого и контейнеров для сухого пристанционного хранения ОЯТ говорит о том, что для этих целей используют длинномерные трубы из нержавеющей сталей толщиной 4,5–5,0 мм с высоким содержанием бора. Трубы изготавливают с помощью электронно-лучевой или лазерной сварки. Использование стеллажей с уплотненным шагом расположения труб позволяет разместить и безопасно хранить в бассейнах значительное количество ОЯТ.

Получены неразъемные соединения из нержавеющей высокобористых сталей аустенитного и ферритного классов, используемых для изготовления труб контейнеров для мокрого или сухого хранения ОЯТ.

Оработан метод сварки изделий из высокобористых сталей аустенитного и ферритного классов толщиной 4,2 и 6 мм (рис. 4) путем варьирования тока сварки. Полученные зависимости представлены на рисунке 5.

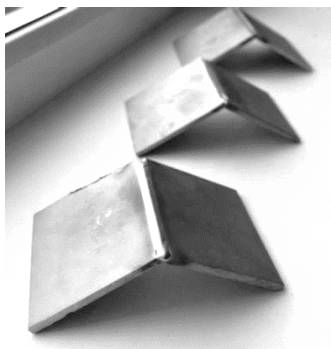


Рисунок 4. – Образцы из стали, сваренные ЭЛС

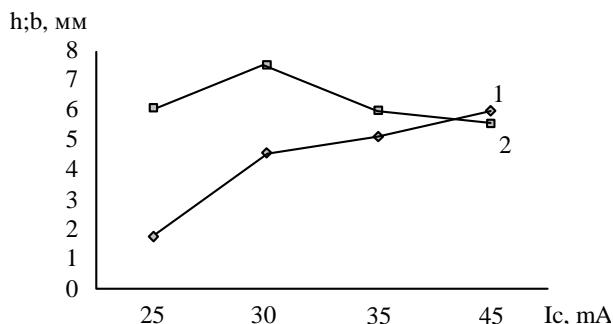
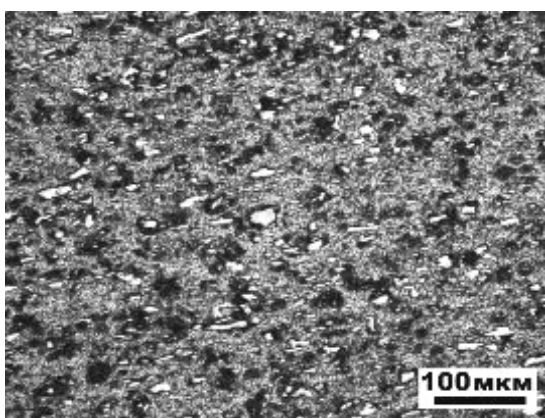
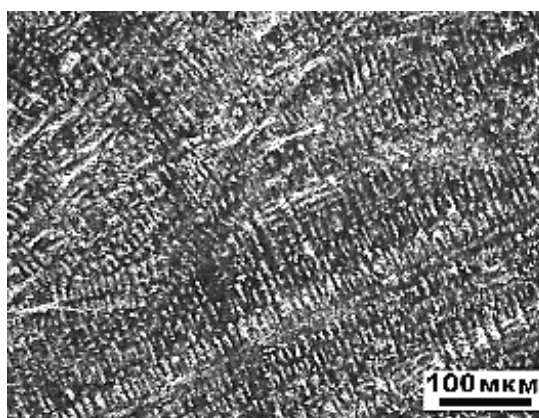


Рисунок 5. – Зависимость глубины проплавления h и ширины сварного шва b для высокобористой аустенитной стали:
1 – глубина проплавления; 2 – ширина шва

Сварной шов состоит из аустенитных дендритов и боридной эвтектики в междендридном пространстве (рис. 6, б). Оси дендритов имеют тенденцию интенсивного роста в направлении передачи тепла, т.е. перпендикулярно зоне расплава (рис. 6, б). Зона термического влияния (ЗТВ) относительно небольшая (50 – 160 мкм). Наблюдается увеличение зерен аустенита и боридных частиц в ЗТВ из-за теплового воздействия при сварке. Полное растворение боридов имеет место в зоне расплава и вблизи ЗТВ. Степень растворения зависит от расстояния до зоны расплава и размера частицы. Частично растворенные бориды окружены эвтектикой (рис. 6, б).



а



б

Рисунок 6. – Высокобористая аустенитная сталь:
а – основной металл; б – сварной шов

Создание сверхпроводящих высокочастотных резонаторов. Ведутся работы по созданию сверхпроводящих высокочастотных СВЧ ниобиевых 1,3 ГГц резонаторов методом электронно-лучевой сварки (рис. 7, а). СВЧ резонаторы из особолистого ниобия для ускорителей заряженных частиц могут изготавливаться только с применением ЭЛС. Процесс ЭЛС обеспечивает сохранение исходной высокой чистоты металла сварного соединения [5], а также требуемую геометрию сварных соединений: полное проплавление с шириной шва e_1 и e_2 не менее 4 мм (рис. 7, б).

Технология изготовления СВЧ резонаторов, используемая для наиболее масштабных строящихся и проектируемых в настоящее время ускорителей заряженных частиц, включает штамповку полулунечек резонатора, их сварку между собой, а также с другими элементами конструкции [6]. Наиболее ответственной операцией является сварка двух полулунечек по экватору. При получении сварных соединений СВЧ резонаторов высокие требования предъявляются к геометрии сварных швов и химической чистоте металла соединений, которая должна быть не хуже, чем у исходного ниобия. Последнее является залогом сохранения сверхпроводящих свойств особолистого ниобия и достигается путем травления свариваемых кромок перед сваркой в смеси кислот, соблюдением чистоты при хранении и транспортировании деталей

перед сваркой. Получение требуемой геометрии сварных швов при сварке компонентов СВЧ ниобиевых резонаторов является непростой задачей и требует детального изучения взаимосвязей между параметрами режима ЭЛС и характеристиками сварных швов. Однако имеются публикации, свидетельствующие о получении дефектов при сварке экватора полуячеек, в том числе и при серийном изготовлении резонаторов с использованием отработанных режимов сварки [6].

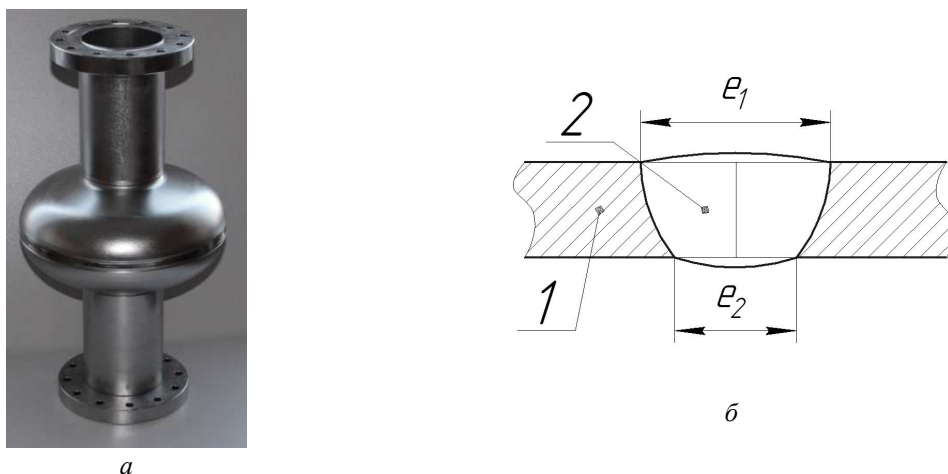


Рисунок 7. – 1,3 ГГц одноклеточный СВЧ ниобиевый резонатор (а) и изучаемая геометрия сварного шва (б); 1 – основной металл; 2 сварной шов

Наряду с традиционными областями применения электронно-лучевых технологий в последнее время, в связи с расширением области применения плазмохимических технологий, таких как электронно-лучевое диспергирование, электронно-лучевое распыление диэлектрических материалов, литография и нанесение многослойных покрытий, усилился интерес к получению низкоэнергетичных пучков заряженных частиц с энергией до 5 кэВ. Новым и перспективным направлением представляется и электронно-лучевое ассистирование ионного воздействия, которое может быть реализовано с использованием плазменных источников электронов, поскольку плазма может эмитировать как электроны, так и ионы. Далее представлен ряд возможных областей применения таких пучков.

Получение неразъемных соединений пайкой. Электронно-лучевой пайкой изготовлены соединения из кубического нитрида бора (КНБ) с твердыми сплавами, примененными для изготовления лезвийного инструмента.

Для высокотвердых материалов вместо шлифования может успешно применяться лезвийная обработка инструментом из сверхтвердых материалов (СТМ), полученным методом пайки. Выполнены исследования по проведению ЭЛ пайки КНБ и поликристаллического алмаза (ПКА) и использованию такого инструмента.

Основным условием получения соединения керамики СТМ с металлом является смачивание материалов сплавом, для чего в его состав должен быть введен адгезионно-активный элемент, например Ti. Пайка с нагревом лучом небольшой интенсивности дает возможность применения адгезионно-активных припоев на основе Cu и Ag при содержании до 5 мас. % Ti, обеспечивающих смачивание соединяемых материалов, снижает опасность графитизации СТМ и обеспечивает его высокопрочное соединение с основой. В случае соединения «КНБ – припой Ag-Cu-In-Ti – твердый сплав ВК8» происходит взаимная диффузия элементов, входящих в состав КНБ, припоя и основы, в результате чего в КНБ формируется переходный слой толщиной от 4–6 до 10–14 мкм, состоящий из соединений TiN, TiB₂, Ti₃B₄, Ti₂B₅.

Разработаны новые конструкции инструмента (рис. 8), оснащенного КНБ и ПКА, с повышенной прочностью удержания СТМ, что существенно улучшает производительность и качество обработки деталей [6]. Это обусловлено высокой скоростью резания, сокращением времени на переналадку оборудования и возможностью получения низкой шероховатости поверхности. По сравнению с твердосплавным инструментом стойкость инструмента из ПКА больше до 50 раз (при точении сплава АЛ25). Изделия после лезвийной обработки инструментами, оснащенными СТМ, имеют шероховатость поверхности до 0,05–0,63 мкм, сравнимую с поверхностью после шлифовки.

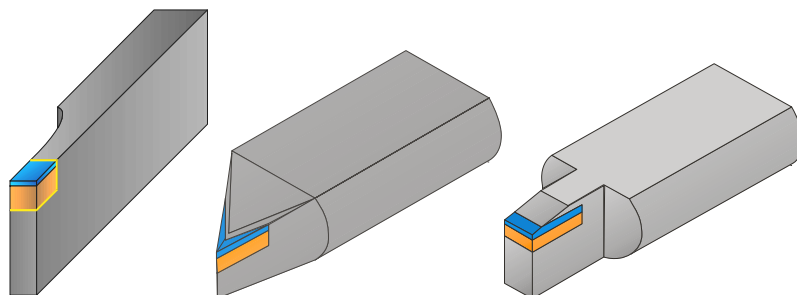


Рисунок 8. – Некоторые типы изготавливаемых инструментов, оснащенных ПКА и КНБ

Электронно-лучевое ассистирование ионного воздействия. Применение ЭЛ нагрева в процессах нанесения покрытий позволяет получать бездефектные слои с более высокими пластическими характеристиками, чем при методах наплавки на воздухе. Это обусловлено рафинирующим действием высокого вакуума.

Электронно-лучевой нагрев позволяет существенно улучшить эксплуатационные свойства деталей с плазменными, газоплазменными, электродуговыми покрытиями. В результате ЭЛ нагрева в покрытии и основе происходят структурные и фазовые превращения, ведущие к значительному увеличению адгезии и одновременному возрастанию твердости и износостойкости. Последовательное использование различных методов для формирования требуемой структуры поверхностного слоя металла получило название – инженерия поверхности второго поколения [7].

Электронно-лучевая обработка может обеспечить оплавление только покрытия, расплавление только слоя у поверхности основы, а также оплавление и покрытия, и основы. Первый вариант целесообразен, когда предварительно нанесенное покрытие имеет достаточно хорошую адгезию к основе, а оплавление проводится для устранения пористости. Второй вариант позволяет улучшить низкую адгезию нанесенного покрытия к основе, а само покрытие обладает приемлемой для эксплуатации пористостью и необходимыми физико-механическими характеристиками. Третий вариант применяется, когда покрытие должно иметь близкую к 100% плотность и максимально возможную адгезию к основе. Для реализации оптимальных вариантов обработки требуется тонкая регулировка параметров нагрева – плотности энергии и времени воздействия.

Методы инженерии поверхности второго поколения связаны с изменением химического состава материала – ЭЛ наплавкой на основу износо-, коррозионностойкого и/или антифрикционного материала, нанесением покрытий, позволяющих значительно повысить эксплуатационные характеристики изделий. Применение комбинированного ЭЛ воздействия обеспечивает получение комплекса характеристик упрочненного изделия, которые невозможно получить с применением традиционных методов упрочнения. Проведены исследования по теоретическому и экспериментальному моделированию методов нанесения многофункциональных слоев на основу из сталей и титановых сплавов, изучению структурно-фазовых превращений в них. Используются различные методы предварительного осаждения традиционных покрытий, которым в исходном состоянии присущи высокая пористость, малые прочность самого слоя, его адгезия к основе и износостойкость. Электронно-лучевая обработка таких покрытий приводит к благоприятным структурным и фазовым превращениям в покрытии и в основе, изменениям в свойствах осажденных слоев, релаксационным процессам в дефектном материале покрытия, формированию переходной диффузионной зоны. При оплавлении покрытия материал перекристаллизуется, устраняются поры, дефекты структуры, уменьшается шероховатость, происходит «скругление» выступающих микронеровностей. В результате повышается прочность сцепления и плотность покрытий, что обуславливает увеличение износо-, жаростойкости и других характеристик.

Электронно-лучевая обработка предварительно нанесенных на титановые сплавы **плазменных покрытий** TiO_2 и Ni-Ti, **электролитических** Cr и Ni и **детонационных** WC-Ni и WC-Co приводит к образованию между основой и покрытием диффузионной зоны, повышению твердости, адгезионной прочности до 210–220 МПа, предела выносливости, износостойкости поверхностных слоев по сравнению со сплавами без покрытий и слоями без ЭЛ обработки.

Электронно-лучевой нагрев сталей, предварительно подвергнутых **ХТО**, существенно повышает твердость и увеличивает толщину упрочненного слоя в 1,5–2,5 раза. Выполняется комплекс работ по разработке технологий и созданию оборудования ионного азотирования (ИА) в тлеющем разряде [7]. Твердость поверхности стали 40X после ИПА с ЭЛ нагревом повышается с 4,5 до 8–6,5 ГПа (рис. 9). Комби-

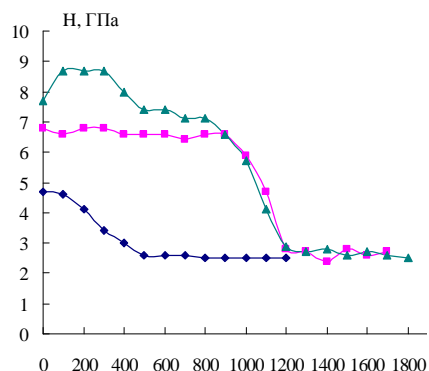


Рисунок 9. – Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя стали 40Х:
1 – после ИА, 2 – после ЭЛ закалки,
3 – после ИА и ЭЛ закалки

Закключение. Рассмотренный в данной части статьи вариант газоразрядной структуры позволяет формировать электронные и ионные пучки с параметрами, удовлетворяющими широкому спектру электронно-лучевых технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Окс, Е. М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения / Е. М. Окс. – Томск : Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.
2. Источники электронов с плазменным эмиттером / Ю. Е. Крейндель [и др.] ; под общ. ред. Ю. Е. Крейнделя. – Новосибирск : Наука, 1983. – 120 с.
3. Залесский, В. Г. Эмиссионные и электронно-оптические системы плазменных источников электронов : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.04 / В. Г. Залесский. – Минск, 2015. – 316 л.
4. Плазменный эмиттер электронов с сеточной стабилизацией : в 2 ч. / А. В. Жаринов [и др.] // ЖТФ. – 1986. – Т. 56, Вып. 1. – Ч. I. – С. 66–70.
5. Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков : сб. науч. тр. / науч. ред. Г. А. Месяц. – Новосибирск : Наука, 1976. – 191 с.
6. Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые / А. П. Достанко [и др.] ; под общ. ред. А. П. Достанко. – Минск : Бестпринт, 2009. – 199 с.
7. Ионно-плазменные технологии в электронном производстве / В. Т. Барченко [и др.] ; под общ. ред. Ю. А. Быстрова. – СПб. : Энергоатомиздат, 2001. – 332 с.

Поступила 20.09.2016

PLASMA-EMISSION SYSTEMS FOR ELECTRON-BEAM TECHNOLOGIES

Part 1

V. ZALESSKI, V. GRUZDEV, I. POBOL, D. ANTONOVICH, P. SOLDATENKO

Order to maintain competitiveness in the mechanical engineering market, enterprises are forced to impose more strict requirements for the quality of manufactured products, and therefore the increased requirements for welding processes, surface treatment, etc. To achieve entry requirements are encouraged to use a plasma electron source. The main electron beam technologies are shown. Presented the gas-discharge structure that can forming electron and ion beams, with parameters that satisfying to represented technologies.

Keywords: electron-beam source, welding, electron-beam technologies.