

УДК 621.791

СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ***И. Л. ПОБОЛЬ, В. Г. ЗАЛЕССКИЙ, А. И. ПОБОЛЬ***Физико-технический институт НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 621.791

MODERN ELECTRON-BEAM TECHNOLOGIES***I. L. POBOL, V. G. ZALESSKI, A. I. POBOL***

Аннотация. Представлены результаты создания оборудования и разработки технологий электронно-лучевой обработки материалов в ФТИ НАН Беларуси.

Ключевые слова: электронно-лучевое оборудование, плавка, сварка, пайка, нанесение покрытий, поверхностное упрочнение, аддитивные методы.

Abstract. The results of the equipment designing and development of technologies for electron beam treatment of materials at the PTI are presented.

Keywords: electron beam equipment, melting, welding, brazing, coating deposition, surface hardening, additive methods.

Электронно-лучевые (ЭЛ) технологии включают широкий спектр видов обработки материалов. Начало их развития в мире относится в конце 1950-х гг. В середине 1970-х гг. в ФТИ НАН Беларуси, в 1990-е гг. в Полоцком государственном университете были начаты исследования физических основ формирования потоков электронов и ионов в газоразрядных структурах для разработки и создания отечественных прототипов ЭЛ-оборудования и технологий [1–4].

Оборудование для выполнения ЭЛ-обработки. Основная часть ЭЛ-оборудования – энергетический комплекс, включающий в себя аппаратуру для формирования сфокусированного пучка электронов и управления его параметрами. Электронно-оптическая система (ЭОС) оснащается термокатодом, плазменным катодом или холодным катодом тлеющего разряда. Свойства источников электронов с плазменным эмиттером (ИЭП) определяются совокупным влиянием подвижности, положения и формы плазменной эмитирующей поверхности, начальных тепловых скоростей эмитированных электронов, потенциала стенок и геометрии эмиссионного канала, ионизации остаточного газа электронами пучка, формируемого в ЭОС. Разработанная физико-математическая модель ЭОС с плазменным эмиттером позволила обосновать роль плазменных электронов в формировании эмиссионного тока и эмитирующей плазмы, установить механизмы её формирования в канале с различным его потенциалом относительно плазмы, а также механизмы переключения эмиссионного тока из плазмы в пучок, объяснить причины возникновения неустойчивости эмиссионного тока и предложить способы его стабилизации, сформулировать критерий устойчивости эмиссии в плазменных эмиссионных системах с «точечным» и «широким» эмиттером [3, 4].

Созданные конструкции ИЭП на основе отражательного разряда с полым катодом и изолированным эмиттерным электродом, значение потенциала которого устанавливается автоматически в соответствии с потоками зарядов на него, а также ИЭП с анодным потенциалом эмиттерного электрода позволяют получать аксиальные и радиальные электронные пучки в широком диапазоне технологических параметров, применяемые в различных технологиях, от плазмохимии до электронно-лучевой сварки.

В ФТИ создан комплекс оборудования из нескольких ЭЛ-установок. Опытно-промышленная установка с мощностью луча до 15 кВт имеет следующие габариты вакуумной камеры: диаметр 1300 × 2500 мм (рис. 1). На этом оборудовании испытаны ИЭП, один из вариантов имеет следующие характеристики: ускоряющее напряжение – 5...30 кВ; напряжение горения разряда – 350 В; ток разряда – до 1 А; ток пучка – до 0,5 А; диаметр пучка – от 0,8 мм до 5 см. Создан и установлен в ОАО «МТЗ» энергоблок ЭЛС с плазменным источником электронов для установки типа такт-машины (рис. 2).



Рис. 1. Установка ЭЛУ-9Б/РЗ ЕВ 2,5–15

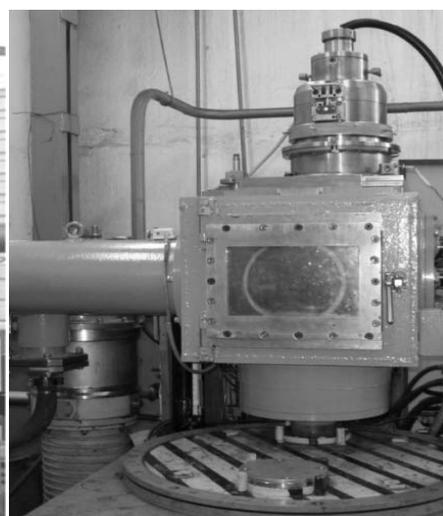


Рис. 2. Установка с ИЭП

Вид реализуемого электронно-лучевого физико-технологического процесса, интенсивность нагрева и охлаждения изделий и свойства материала после обработки определяются ускоряющим напряжением, мощностью пучка, плотностью энергии, режимом развертки электронного луча, временем воздействия или скоростью перемещения зоны нагрева. В работах авторов реализован ряд вариантов использования ЭЛ-воздействия.

Электронно-лучевая плавка металлов и сплавов – эффективный способ рафинирования и повышения качества металлов и сплавов. В ФТИ НАН Беларуси отработаны методы изготовления новых и регенерации изношенных катодов-мишеней для систем вакуумного распыления из Ti, Zr, Hf, сплавов Ti и Zr с Cr, Al, В, Мо и др. [2].

Получение неразъемных соединений пайкой. Получены теоретические и экспериментальные результаты для установления механизма получения соединения разнородных материалов с основой; разработаны математические модели, учитывающие смачиваемость соединяемых поверхностей расплавом,

напряжения, возникающие в процессе нагрева, диффузию адгезионно-активного элемента, что позволило создать метод пайки, обеспечивающий возможность получения лезвийного инструмента с высокой прочностью соединения сверхтвердых материалов (кубического нитрида бора и поликристаллического алмаза) с основой. Такой инструмент используется для лезвийной обработки высокотвердых материалов вместо их шлифования [2, 5].

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС). Это направление широко востребовано предприятиями Беларуси. Применительно к характерным изделиям машиностроения (шестерням и валам) решена задача получения сварного шва глубиной 5...35 мм (рис. 3, а; 4, а). В то же время при необходимости сварки тонколистовых, трудносвариваемых, высокоактивных материалов (ниобия, меди, титана и др.) может быть получен широкий шов с минимальными отклонениями геометрии от внутренней и наружной поверхностей детали (рис. 3, б). Примером таких изделий являются резонаторы для ускорителей частиц [6].

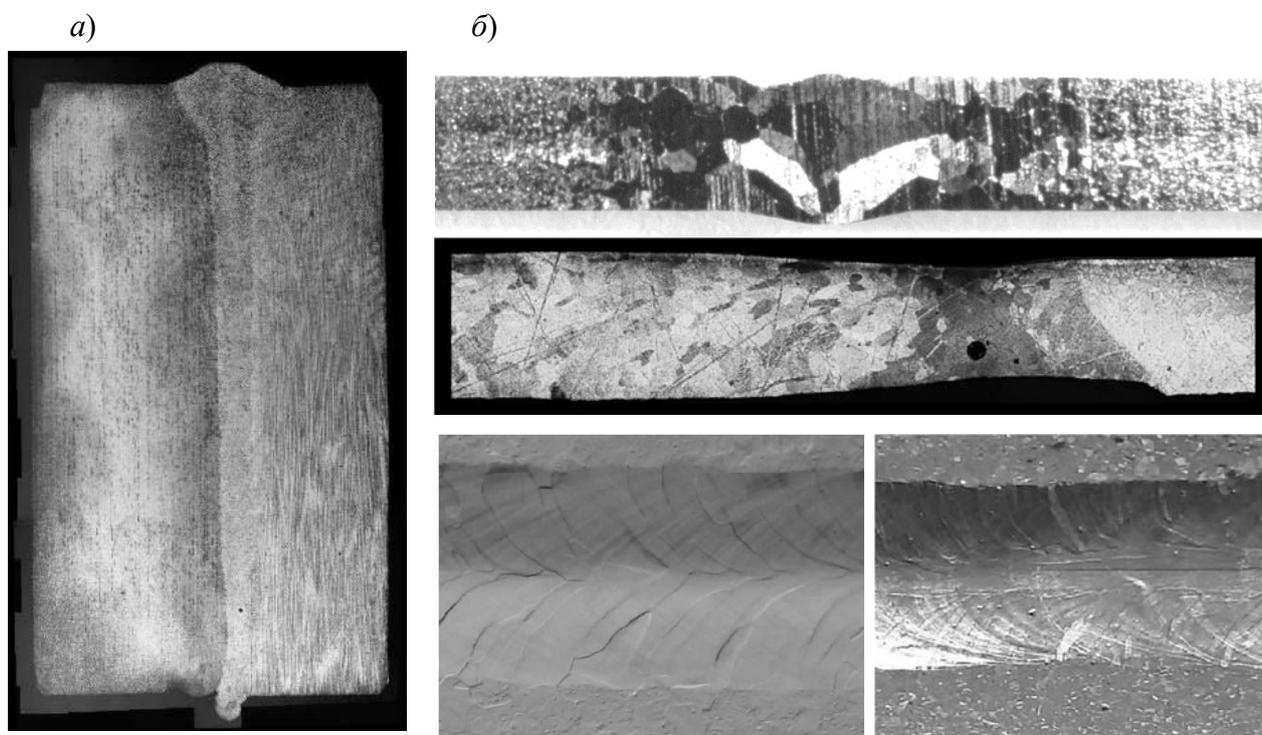


Рис. 3. Сварной шов ЭЛС глубиной 32 мм из сталей 25ХГТ и 40Х (а), соединения из тонколистовых материалов – особо чистого ниобия и меди: поперечные сечения и лицевая поверхность (б)

При изготовлении деталей сложной конфигурации использование ЭЛС позволяет выполнять их из нескольких заготовок вместо получения изделий из одной поковки, что снижает энергозатраты и материалоемкость изделий до 50 %. Совместно со специалистами ОАО «МАЗ» показано, что при замене технологии дуговой сварки на ЭЛС масса оси и полуоси прицепов может быть снижена на 40...50 кг. На примере детали «поворотный кулак – суппорт» (из сталей 40Х и 10ХСНД) в результате ЭЛС прочностные и особенно пластические характеристики металла сварного шва значительно превышают свойства металла, полученного с использованием дуговой сварки (деформация при растяжении повышена в 2 раза).

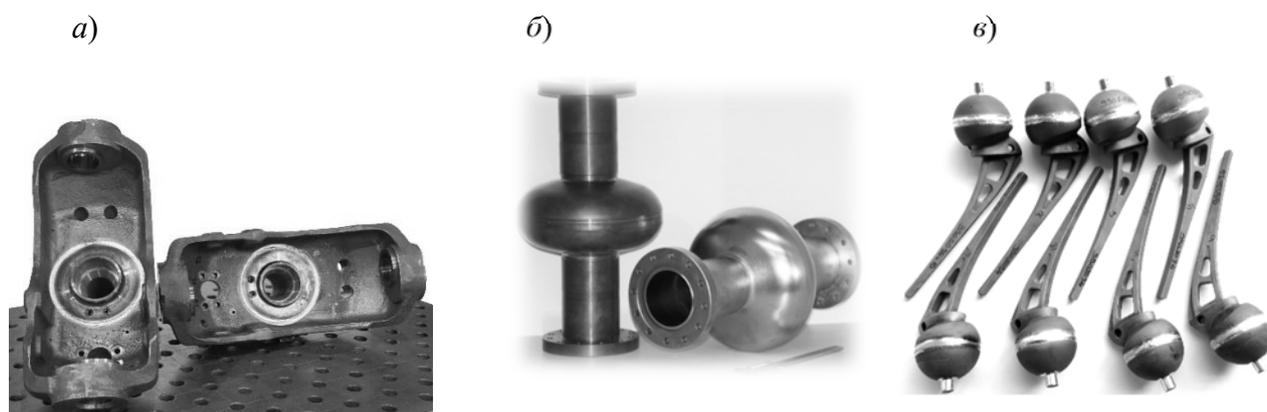


Рис. 4. Изделия, полученные с применением ЭЛС: картеры ОАО «МЗКТ» (а), сверхпроводящие СВЧ-резонаторы из меди и ниобия для ускорителей частиц (б), заготовки ножек имплантатов из сплава Co–Cr–Mo (в)

ФТИ выполняет НИР по созданию для ОИЯИ (Дубна) наукоемких СВЧ-сверхпроводящих резонаторов из особо чистого ниобия для ускорителей класса мегасайенс, что невозможно без использования ЭЛС. Разработан комплекс технологий и изготовлена партия сверхпроводящих эллиптических СВЧ-резонаторов на 1,3 ГГц (рис. 4, б) [6]. В настоящее время изготавливаются резонаторы для строящегося в ОИЯИ ускорительного комплекса NICA.

Совместно с ЗАО «Алтимед» выполняются заказы по обеспечению пациентов, нуждающихся в оперативном лечении в связи с переломами тазобедренного сустава. С использованием ЭЛС изготавливаются ножки цементной фиксации 11 типоразмеров из сплава Co–Cr–Mo в количестве нескольких тысяч изделий в год (рис. 4, в). Применение ЭЛС позволяет снизить массу имплантатов и их стоимость.

Нанесение покрытий ЭЛ-испарением и осаждением из паровой фазы многократно повышает эксплуатационный ресурс многих изделий (например, лопаток турбин). В ФТИ НАН Беларуси получил широкое развитие ЭЛ-метод нанесения на стеклянные и полимерные материалы одно- и многослойных покрытий из непроводящих и тугоплавких материалов с получением тонких слоев равномерной толщины, экранирующих электромагнитные излучения. Обеспечивается эффективность экранирования на 25...50 дБ электромагнитного поля в радиочастотном диапазоне длин волн (0,7...17 ГГц) [7].

Поверхностное упрочнение в режиме закалки сталей, чугунов и титановых сплавов приводит к дифференцированному упрочнению материала. Толщина модифицированного слоя при упрочнении в режиме закалки из твердого состояния изделий составляет 0,1...2 мм. Твердость конструкционных, инструментальных и подшипниковых сталей достигает 65...68 HRC, микротвердость – 10...11 ГПа [1, 2].

Аддитивные методы выращивания заготовок из металлов и сплавов реализуются путем ЭЛ-послойного выращивания 3D-структур на основе железа, никеля, титана, алюминия, меди с использованием исходных материалов в виде проволоки или порошка [8, 9]. Основной задачей является получение заготовки, свойства материала которой максимально близки к свойствам деформированного металла. Большое влияние на формирование микроструктуры приграничных зон

смежных слоев наплавки оказывает температура закристаллизовавшегося металла в момент наплавки на него следующего слоя и ЭЛ-постобработка наплавленных слоев.

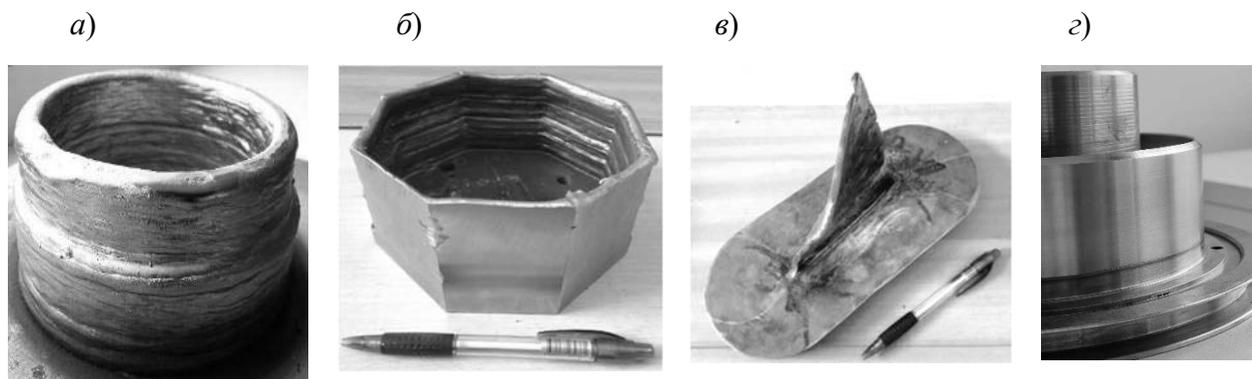


Рис. 5. Образцы, полученные методом ЭЛ-послойного формообразования, из стали LNM 304LSI (а, б) и титана ВТ1-0 (в). Деталь авиационного назначения из сплава ВТ9, восстановленная с использованием ЭЛ наплавки (з)

Комбинированные и совмещенные методы инженерии поверхности с ЭЛ-воздействием обеспечивают получение комплекса характеристик упрочненного изделия, которые невозможно достичь с применением традиционных методов упрочнения. Они реализованы наплавкой на стали и титановые сплавы износостойких материалов толщиной до 5 мм; получением на стали борсодержащих слоев с твердостью до HV 1100; нанесением TiO_2 и Ni-Ti, электролитических Cr и Ni, детонационных WC-Ni и WC-Co-покрытий на титановых сплавах с адгезионной прочностью до 210...220 МПа, Cr-, Ni-, Cu-Cr- и Ni-Cr-электролитических покрытий на титановых сплавах с коэффициентом трения до 0,07 и несущими нагрузками до 20 МПа; реализацией варианта ХТО+ЭЛ-нагрев сталей, повышающего твердость и толщину упрочненного слоя в 1,5–2,5 раза [1,8,9].

Апробация и внедрение разработанных технологий. Получены сертификат соответствия требованиям ГОСТ Р ИСО 9001–2015 (ISO 9001:2015) на систему менеджмента качества «Разработка технологической документации, производство и ремонт оборудования для обработки материалов при пониженном давлении с использованием электронно-ионно-плазменного воздействия», а также лицензия № 33134/576-4 Департамента по ядерной и радиационной безопасности МЧС на право выполнения монтажных, диагностических и ремонтно-восстановительных работ установок с источниками неиспользуемого рентгеновского излучения, включая установки ЭЛС с ускоряющим напряжением до 100 кВ.

Выполняются услуги по ЭЛ-обработке изделий десятков наименований. Создание в 2017 г. в институте Отраслевой лаборатории электронно-лучевых и аддитивных технологий способствовало активизации сотрудничества института с предприятиями Министерства промышленности и других отраслей. Совместно с ОАО «МТЗ», ОАО «МЗШ», ОАО «МАЗ», ОАО «БЕЛАЗ», ОАО «Амкордор», ОАО «СтанкоГомель», ЗАО «Алтимед», ОАО «МЗКТ», ОАО «ВЗЭП»

разрабатываются новые конструкции узлов, изготавливаемых из сталей, сплавов цветных металлов с использованием ЭЛ-обработки. Отработаны методы изготовления и ремонта валов, шестерен, зубчатых колес металлообрабатывающих станков, задних мостов, узлов коробок передач погрузчиков и автомобилей, разрабатываются новые технологии.

Заключение. В ФТИ НАН Беларуси создан научно-инжиниринговый центр, в котором решается широкий спектр задач по получению неразъемных соединений сваркой и пайкой, упрочнению, модифицированию поверхности металлических материалов на основе железа, титана, алюминия, меди. Во многих случаях успешное решение этих задач обеспечивается вследствие активного взаимодействия разработчиков и предприятий – потребителей услуг, технологий и оборудования института.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шипко, А. А.** Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева / А. А. Шипко, И. Л. Поболь, И. Г. Урбан. – Минск: Навука і тэхніка, 1995. – 280 с.
2. Электронно-лучевая обработка материалов / В. Н. Алехнович [и др.]. – Минск: Беларус. наука, 2006. – 319 с.
3. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В. Т. Барченко [и др.]. – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.
4. Plasma emission systems for electron- and ion-beam technologies / D. Antonovich [et al.] // High Temperature Material Processes. – 2017. – Vol. 21, № 2. – P. 143–159.
5. Electron beam activated brazing of cubic boron nitride to tungsten carbide cutting tools / J. Felba [et al.] // Vacuum. – 2001. – Vol. 62, № 2–3. – P. 171–180.
6. **Поболь, И. Л.** Создание сверхпроводящих ниобиевых резонаторов для ускорителей частиц / И. Л. Поболь, С. В. Юревич // Вес. НАН Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук. – 2015. – № 2. – С. 44–50.
7. Выбор материалов для прозрачных в видимом свете многослойных экранирующих покрытий / Г. В. Марков [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. – Минск: ФТИ НАН Беларусі, 2019. – С. 239–245.
8. **Поболь, А. И.** Нанесение покрытий с использованием электронно-лучевого воздействия / А. И. Поболь, Г. Г. Горанский // Композиционные материалы и защитные покрытия: материалы Междунар. науч.-техн. семинара. – Минск: ОИМ НАН Беларусі, 2012. – С. 133–138.
9. Formation of a porous titanium part under directed energy deposition: theory and experiment / M. A. Anisimova [et al.] // High Temperature Material Processes. – 2019. – Vol. 23, № 1. – P. 1–23.

E-mail: pobol.igor@gmail.com.