

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ, НАПЛАВКИ, ПРОТОТИПИРОВАНИЯ — РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, К. С. ХРИПКО, В. А. МАТВЕЙЧУК

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины в течение многих десятилетий специализируется на разработке технологии и оборудования для электронно-лучевой сварки современных конструкционных сплавов. Разработанное в Институте электронно-лучевое оборудование позволяет решать задачи по соединению элементов сложных конструкций различных отраслей промышленности. Показаны примеры и технические возможности установок, наиболее востребованных промышленностью. Приведен ряд изделий, в производстве которых успешно применены как оборудование, так и новые технологические процессы, к которым относится восстановительный ремонт частей газотурбинных двигателей и технологии послыного производства изделий методом быстрого прототипирования. Библиогр. 7, рис. 15.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, оборудование, ремонт, 3D технологии

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины в течение многих десятилетий специализируется на разработке технологии и оборудования для электронно-лучевой сварки современных конструкционных сплавов. Разработанное в Институте новое поколение электронно-лучевого оборудования позволяет решать задачи по соединению элементов сложных конструкций авиационной и космической промышленности, которые занимают лидирующее место по использованию легких и прочных сплавов цветных металлов.

Изучение физических процессов плавления металлов в вакууме началось в Институте в 1958 г., когда по инициативе академика Б. Е. Патона была создана первая установка для электронно-лучевой сварки (ЭЛС). Уже через год результаты работ ИЭС им. Е.О. Патона оказались востребованными промышленностью и, в первую очередь, при производстве реактивных двигателей. С ростом количества задач, выдвигаемых промышленностью, и их сложностью потребовались установки с различным объемом вакуумных камер, систем управления, мощностью высоковольтных источников питания и сварочных пушек.

Сегодня в ИЭС им. Е.О. Патона разрабатываются и изготавливаются установки, используемые для ЭЛС всевозможных изделий различных отраслей промышленности. Все эти установки условно можно разделить на несколько типов по габаритам сварочных камер, а соответственно, и по размерам свариваемых деталей: «малые» объемом 0,26...5,70 м³ (рис. 1), «средние» объемом 19...42 м³ (рис. 2) и «большие» объемом 80...100 м³ (рис. 3). Институт разрабатывает и изготавливает сварочные камеры различных

вариантов размеров и соответствующих конфигураций вакуумной системы, а также конфигураций механизма перемещения электронно-лучевой пушки и свариваемой детали под конкретные за-



Рис. 1. Общий вид малогабаритной электронно-лучевой установки



Рис. 2. Внешний вид среднегабаритной установки с мобильной внутрикамерной сварочной пушкой и выкатным рабочим столом



Рис. 3. Электронно-лучевая установка с вакуумной камерой объемом 100 м³

дачи заказчика, а именно: размеры и форму свариваемых узлов, тип и расположение сварных соединений в узле. Более того, в последнем случае кроме самого оборудования разрабатывается и конкретная технология сварки таких узлов, т.е. заказчик приобретает сварочную установку вместе с технологией ЭЛС конкретного перечня изделий. Аналогичной технической идеологии придерживаются известные производители оборудования ЭЛС: Sciaky Inc. (USA), PTR Group (Germany) и Techmeta (France)[1].

В широко распространенных установках с объемом вакуумных камер 19...42 м³ рабочий вакуум $2 \cdot 10^4$ Торр с помощью современных средств откачки достигается за 18...20 мин. При необходимости возможна комплектация вакуумной си-

стемы, обеспечивающая за время менее 20 мин давление в камере менее $5 \cdot 10^5$ Торр.

Типичная механическая конфигурация установки предусматривает подвижную внутрикамерную электронно-лучевую сварочную пушку, закрепленную на прецизионном механизме многоосного перемещения. Этот механизм обеспечивает управляемое ЧПУ линейное движение пушки вдоль трех декартовых координатных осей (вдоль камеры — X , поперек камеры — Y и вертикально — Z), а также поворот пушки на угол $0 - 90^\circ$ в плоскости $Z-X$ (от вертикальной ориентации пушки до горизонтальной) [2].

Вращение свариваемой детали обычно обеспечивается за счет прецизионных сварочных манипуляторов с горизонтальной и вертикальной осями вращения. Наибольшую технологическую гибкость обеспечивает сварочный манипулятор с наклонной осью вращения. Он позволяет осуществлять наклон оси вращения планшайбы в диапазоне от 30° до $+90^\circ$ (от вертикали), что обеспечивает электронно-лучевую сварку сложных концентрических секций авиационных двигателей или авиационных узлов с изменяющейся геометрией (рис. 4).

В зависимости от конкретного назначения (свариваемый материал и его толщина) рассматриваемые установки укомплектовываются новейшими высоковольтными инверторными сварочными источниками питания мощностью 15, 30, 60 и 120 кВт, работающими при фиксированном уско-

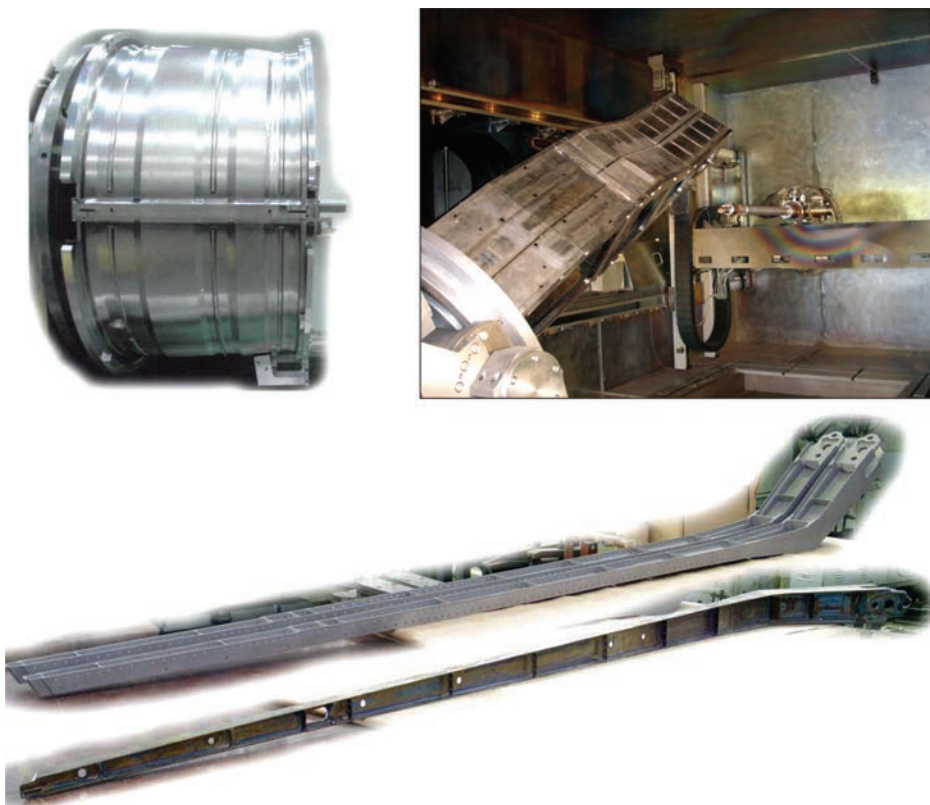


Рис. 4. Примеры авиационных узлов со сложной геометрией, изготовленных ЭЛС на установках средних и больших габаритов



Рис. 5. Внешний вид инверторного высоковольтного источника питания

ряющем напряжении 60 и 120 кВ [3]. Основой силовой части источников питания является высоковольтный инверторный энергоблок, например, отечественный фирмы «Торсион» (г. Харьков) или компаний Guth (Германия) и Technics (Франция). Сварочный источник разработан таким образом, что представляет собой фактически отдельный самодостаточный аппаратный комплекс, все взаимодействие с которым осуществляется через промышленный интерфейс (шина CAN). При этом связь с «внешним миром» осуществляют соответствующие микроконтроллерные блоки, подсоединенные к шине CAN и предназначенные для управления и диагностики всех каналов сварочного источника.

Сварочный источник достаточно компактный по габаритам и при мощности до 30 кВт обычно помещается в один силовой шкаф (рис. 5). В случае большей мощности сварочный источник разбивается на две части и занимает два шкафа.

Вместе с высоковольтным сварочным источником питания все электронно-лучевые установки Института комплектуются неразрывно интегрированной в этот источник системой вторично-эмиссионной электронной визуализации «РАСТР-6». Такая интеграция обусловлена тем, что само функционирование этой системы непосредственно связано с формированием пучка облучающих наблюдаемое изделие электронов. Блок-схема классической системы «РАСТР-6» представлена на рис. 6 [4].

Приблизительно 3 раза в секунду по специальному командному импульсу блоки задания и усиления системы «РАСТР-6» формируют на заданное краткое время соответственно строчный и кадровый сигналы растровой развертки, подаваемые в отклоняющую катушку сварочной пушки. Далее на основании генерируемого системой «РАСТР-6» модуляционного сигнала микроконтроллер канала тока сварки сварочного источника питания, действуя согласно специальному алгоритму, выключает текущий ток сварки и формирует кратковременный маломощный импульс тока. В результате подобного взаимодействия двух подсистем установки (ее сварочного источника питания и системы «РАСТР-6») лицевая поверхность свариваемой детали облучается сфокусированным электронным растром. При проходе вдоль строк раstra «зондирующего» электронного пучка в месте точечной бомбардировки поверхности детали его электронами («первичными») эмитируются вторичные электроны. Мощность электронного пучка выбирается достаточной в данных конкретных условиях, например, в зависимости от расстояния сварочной пушки до детали для формирования необходимого уровня такого вторично-эмиссионного излучения. Этот кратковременный импульс вторичных электронов улавливается специальным пассивным датчиком (рис. 7, а), обычно расположенным в торце сварочной пушки, и который может иметь различное конструктивное исполнение. Непосредственно вблизи от

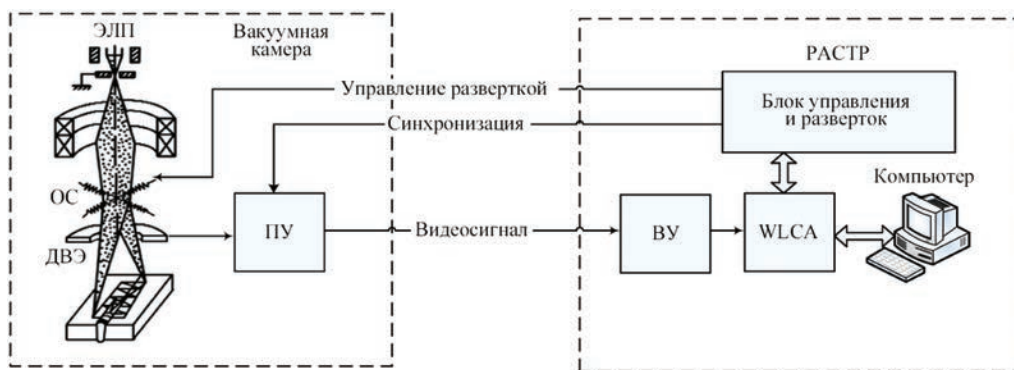


Рис. 6. Блок-схема классической системы «РАСТР-6»: ЭЛП — электронно-лучевая (сварочная) пушка; ОС — отклоняющая система пушки; ДВЭ — датчик вторичных электронов; ПУ — предварительный усилитель; ВУ — видеоусилитель; WLCA — специализированная компьютерная плата визуализации

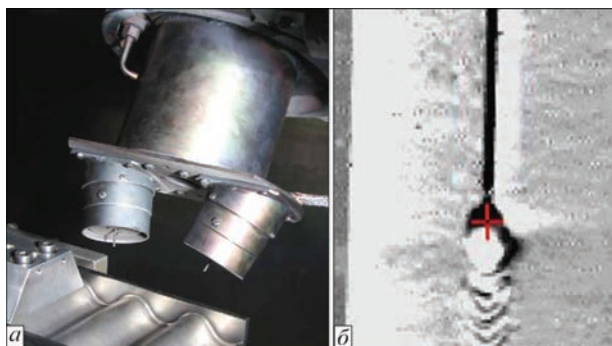


Рис. 7. Датчик вторичных электронов системы «РАСТР-6» (а) и формируемое ею изображение зоны сварки (б)

этого датчика расположен компактный блок предварительного усилителя, который формирует и усиливает полезный сигнал, напряжение которого пропорционально снимаемому с датчика токовому сигналу. Этот уже усиленный сигнал по экранированной коаксиальной линии выводится из сварочной камеры и поступает в основной видеосигнальный усилитель системы. В итоге сигнал оцифровывается специализированной компьютерной платой WLCA и выдается на интерфейс оператора в виде изображения (рис. 7, б), используемого как для визуального наблюдения и ручного наведения на свариваемый стык, так и для работы специальных программных алгоритмов, помогающих пользователю (оператору-сварщику) в составлении новых программ сварки и воспроизведении уже существующих программ при сварке повторяющихся типовых деталей. Система позволяет формировать достаточно устойчивое изображение зоны сварки как перед началом сварки и после ее завершения, так и непосредственно во время выполнения самой сварки.

Установки для ЭЛС, разрабатываемые и выпускаемые нашим Институтом, имеют современную систему управления. Часть оборудования, от которой непосредственно зависит процесс сварки, находится под непрерывным программным управлением.

Используется концепция высокоуровневого программного управления, при которой взаимодействие пользователя с оборудованием осуществляется исключительно через Windows-ориентированный графический интерфейс (GUI). Работа с интерфейсом осуществляется с помощью стандартных средств: клавиатуры и манипулятора типа мышки. Интерфейс интуитивно понятен и не требует специальной квалификации, как при «низкоуровневом» машинном программировании. Каждую из подсистем установки обслуживает соответствующий оконный графический инструментальный с проверками вводимых данных и блокировками для обеспечения безопасности пользователя и оборудования.

Иерархически система управления разбита на два программно-аппаратных уровня: верхний и нижний. К верхнему уровню относятся все средства общения с пользователем, включая графический интерфейс, средства составления и хранения программ сварки, сбора и хранения диагностических данных, администрирования и т.д. Нижний уровень занимается непосредственным исполнением всех процедур по командам с верхнего уровня.

В настоящее время мы используем две базовые конфигурации системы программного управления установками для ЭЛС. Первая предусматривает использование полной промышленной системы Sinumeric 840D фирмы Siemens, а вторая – «урезанной» промышленной системы Synamics S120 той же фирмы.

В случае использования системы Sinumeric 840 основная программа установлена на штатном промышленном компьютере верхнего уровня Sinumerik PCU-50. Верхний уровень напрямую взаимодействует с элементами нижнего уровня: станочным пультом MCP, основным модулем NCU и соединительным модулем Basic PN, к которому подключен пульт управления ручным перемещением пушки или детали.

Кроме того, верхний уровень взаимодействует с компьютером системы «РАСТР». В результате программа верхнего уровня (на PCU-50) может отображать вторично-эмиссионное изображение поверхности свариваемой детали, формируемое системой «РАСТР».

Сварочное перемещение находится под полным контролем ЧПУ как в режиме ручного перемещения, так и при автоматической сварке. В последнем случае текстовый скрипт подготовленной программы сварки транслируется с верхнего уровня в NCU, где ЧПУ по собственным алгоритмам производит расчет траектории, интерполяции, скоростей и ускорений по каждой из участвующих осей. При автоматической сварке ЧПУ обеспечивает полную синхронизацию всех осей как механических, так и виртуальных, в качестве которых используются каналы токов сварки и фокусировки, а также технологической развертки электронного пучка.

Использование средств числового программного управления для технологического процесса ЭЛС позволило решать сложные задачи по соединению различных конструкций ответственного назначения. Существующие возможности прецизионного управления траекторией движения электронного пучка при сварке за счет его механического перемещения или за счет его электромагнитного отклонения, а также возможности управления мощностью электронного пучка

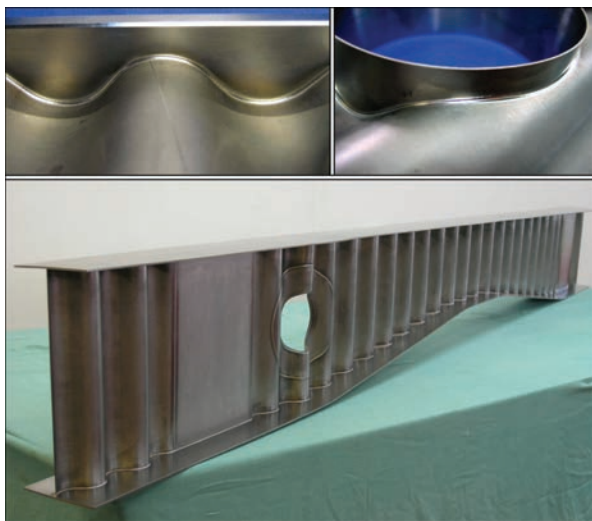


Рис. 8. Внешний вид сварных тонколистовых авиационных конструкций из титановых сплавов

и формой распределения этой мощности в пространстве привели к существенному расширению технологических возможностей ЭЛС и к кардинальному улучшению повторяемости процесса сварки серийных деталей на предварительно запрограммированном сварочном режиме. На рис. 8, 9 приведены примеры реализации разработанной системы управления при выполнении ЭЛС сложных изделий.

На наших установках успешно выполняется восстановительный ремонт дорогостоящих частей газотурбинных двигателей [5].

Так, при эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей одной из основных причин их досрочной замены является повреждение титановых лопаток вентилятора и компрессора в результате попадания в двигатель посторонних предметов. Обычно эксплуатация двигателя допускается при незначительных дефектах входной и выходной кромок пера лопатки без надрывов. Часть дефектов допускается ремонтировать непосредственно на двигателе. Так, например, зачищают приподнятости материала у забоин, погнутости лопаток устраняют правкой. Исправленные места затем полируют. Иногда допускается устранение забоин за счет плавного скругления кромки радиусом 10...12 мм. Исправление местных поврежденных лопаток, превышающих допустимые нормы, уже требует демонтажа поврежденной лопатки и ремонта в производственных условиях. Обычно ремонт заключается в механическом удалении дефектной области до границ заведомо неповрежденного металла лопатки с последующим прикреплением (сварка, пайка) вместо нее вкладыша из того же металла соответствующего размера и с технологическим припуском по толщине для получения нужного профиля лопатки последующей механической обработкой. Для реализации технологии ремонта с помощью электронно-луче-



Рис. 9. Внешний вид сварных толстолистовых авиационных конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов

вой сварки была разработана схема сварного соединения ремонтного вкладыша и пера лопатки, независимо от того, точечный это или протяженный дефект. Соединение выполняется однопроводной ЭЛС, а плавный переход от поверхности вкладыша к основному металлу обеспечивается как за счет умеренной концентрации электронного пучка, так и за счет достаточного количества дополнительного металла — благодаря примененной конструкции сварного соединения с нависающим буртиком. Это позволяет получить плавный переход металла от вставки к поверхностям пера лопатки как в местах с достаточно большой толщиной пера, так и в самых тонких местах, прилегающих к самой кромке пера.

Отработана технология ремонта трех типов дефектов пера лопатки: «точечного» повреждения угла лопатки, «точечного» повреждения кромки основной части пера лопатки и протяженных локальных дефектов кромки, начинающихся от угла лопатки.

Ремонт обоих типов «точечных» дефектов осуществляется с использованием цилиндрических вкладышей различных диаметров, зависящих от размеров дефекта кромки пера. Работы проводились вначале на образцах, имитирующих реальные изделия. Затем технология была успешно опробована на опытных партиях дефектных лопаток, предоставленных ГП ЛРЗ «Мотор» и ГП «Ивченко-Прогресс» (рис. 10, 11).

Кроме ремонта локальных дефектов лопаток, не менее важной задачей является замена отдельных элементов неразъемно собранных узлов газотурбинного двигателя. Направляющие аппараты с 3-й по 8-ю ступень статора компрессора высокого давления газотурбинного двигателя состоят из полуколец с набором впаянных в них консольных лопаток. Лопатки с 3-й по 6-ю ступень изготовлены из сплава ЭП-866 (15X16K5H2MФАБ-ш), а лопатки 7-й, 8-й ступеней — из сплава ЭП-718-ИД



Рис. 10. Примеры отремонтированных электронным пучком вентиляторных лопаток

(ХН45МВТЮБР-ИД); рабочая температура узлов составляет 300...500 °С.

При эксплуатации таких двигателей также имеют место случаи появления забоин и трещин на лопатках, а также их отрыва по причине локального непропая их со стенкой полукольца. Для этого случая предложена следующая схема ремонта. Дефектную лопатку удаляют фрезерованием из полукольца до самой его стенки, включая и весь удерживающий ранее лопатку припой, а на ее место подбирают неповрежденную лопатку-донор. Иными словами в полукольце делается полностью очищенная площадка для установки лопатки-донора. Очевидно, что повторить исходный процесс пайки невозможно, не затронув соседние, еще годные лопатки. Поэтому необходим способ крепления с локальным и концентрированным температурным воздействием на весь собранный узел.

Способ ЭЛС идеально подходит в данном случае, позволяя получить надежное сварное соединение достаточной глубины при сравнительно небольшом тепловложении в свариваемое изделие.

Была разработана схема сварного соединения лопатки-донора со стенкой полукольца направля-



Рис. 11. Общий вид сварного соединения ремонтного участка лопатки

ющего аппарата. Соединение лопатки со стенкой выполняется двусторонней ЭЛС с промежуточным переворотом изделия на 180°. Конструктивной прочности двух подобных швов вполне достаточно для надежного крепления лопатки, не уступающего соседним — паянным.

Для улучшения формирования шва и уменьшения общего тепловложения применен импульсный режим ЭЛС, что позволило получать качественные соединения деталей при локальных зазорах в стыке до 0,1 мм. Затем подобранные режимы ЭЛС были скорректированы уже на реальных соединениях лопаток с полукольцом направляющего аппарата. На рис. 12 приведена схема сборки лопатки-донора с полукольцом и макрошлиф получаемых соединений.

Технология успешно опробована при ремонте партии реальных полуколец направляющих аппаратов различных ступеней статора компрессора высокого давления.

Разрабатываемое в Институте электронно-лучевое оборудование и технологии открывают новые возможности для изготовления методом быстрого прототипирования деталей заданной формы и структуры с заранее прогнозируемыми свойствами [6].

Создаваемые технологии и оборудование изначально ориентированы на потребности отечественных предприятий. Для производства предпо-

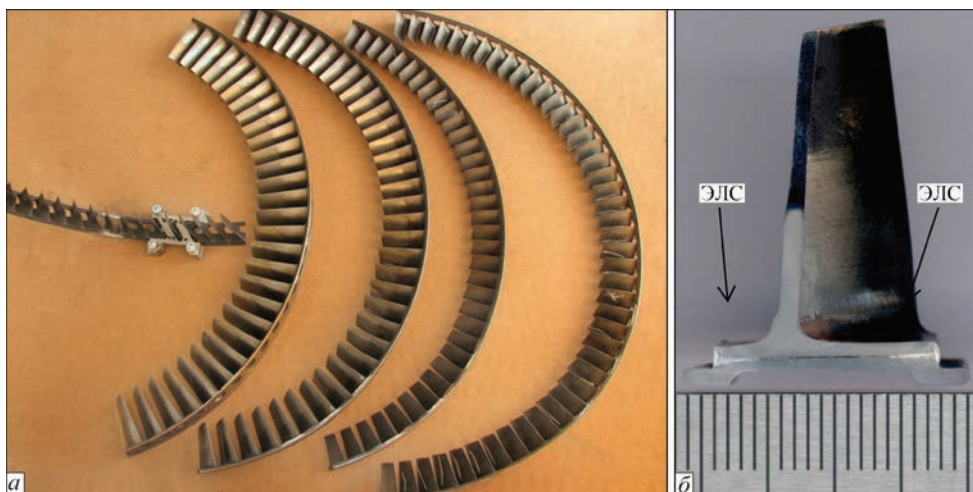


Рис. 12. Схема сборки лопатки-донора с полукольцом (а) и макрошлиф сварного соединения (б) направляющего аппарата статора компрессора высокого давления

лагается применять необходимое производителю недорогое отечественное сырье. Этот подход обеспечит возможность изготовления деталей и узлов методом быстрого прототипирования, исходя из нужд потребителя и в тесном контакте с ним. Разрабатываемые технологии позволяют снизить сроки внедрения новых видов продукции, расширить ее ассортимент, а также создавать принципиально новые виды изделий с заранее прогнозируемыми свойствами, производство которых невозможно без применения методов 3D печати.

Поскольку установок отечественной разработки для 3D печати пока не существует, в Институте стартовал проект по созданию уникального для Украины оборудования и программного обеспечения к нему для реализации аддитивного электронно-лучевого производства, свободного от импортного сырья, ориентированного на внедрение на предприятиях авиакосмической промышленности и турбиностроения: ГП НПКГ «Зоря»-Машпроект», ЛРЗ «Мотор», АО «Мотор-Сич» и ГП КБ «Южное» [7].

Оборудование создается на основе установки для электронно-лучевой сварки типа СВ-212М. Предусматривается модернизация вакуумной камеры, разработка систем управления приводами перемещения стола по вертикали и узла распределения порошка в камере, а также разработка соответствующего программного обеспечения для осуществления аддитивного производства.

Схема установки и ее промышленный образец представлены на рис. 13. Процесс электронно-лучевой наплавки проходит в вакуумной камере 1 при вакууме менее $1 \cdot 10^{-4}$ Торр. Металлический порошок насыпью подается на рабочий стол 4 из бункеров 3. Рейка 5, перемещаясь вдоль стола 4, формирует на поверхности паллеты 7 слой порошка заданной толщины. В начальном положении паллета находится вверху шахты 6. Сфокусированный пучок электронов, сформированный электронно-лучевой пушкой 2, оплавляет поверхность порошка по заданной траектории. Таким образом, в соответствии с алгоритмом, формируются контуры изделия 8 и его слой. Далее паллета 6 опускается на заданную величину и наносится следующий слой порошка. Процесс повторяется и изделие наращивается слой за слоем. В конце производственного цикла деталь извлекается из вакуумной камеры, очищается от нерасплавленного порошка 9 и механически обрабатывается.

Технология послойного электронно-лучевого сплавления металлов в вакууме с применением порошковых материалов позволяет создавать плотные металлические изделия заданной формы с высокой геометрической точностью. Габаритные размеры изделий составляют $250 \times 250 \times 250$ мм, а производительность электронно-лучевой наплав-

ки по технологии ЕВМ не превышает 0,3 кг металлического порошка в час.

Вторым исследуемым процессом электронно-лучевого плавления металлов является процесс плавления металлической проволоки в вакууме с образованием последовательных слоев (DM). Для разогрева и плавления проволоки используется электронный пучок требуемой мощности. Схема процесса DM приведена на рис. 14.

Наплавка проходит в вакуумной камере. Присадочная проволока подается в зону действия пучка электронов, где нагревается и расплавляется. Электронно-лучевая пушка и/или подложка, на которой формируется изделие, перемещаются, формируя слой наплавленного металла. Изделие строится по цифровой модели. Данные САД-программы преобразуются в код ЧПУ. Деталь формируется послойно — каждый последующий слой металла наплавляется на предыдущий, и так слой за слоем, пока изделие не достигнет заданной

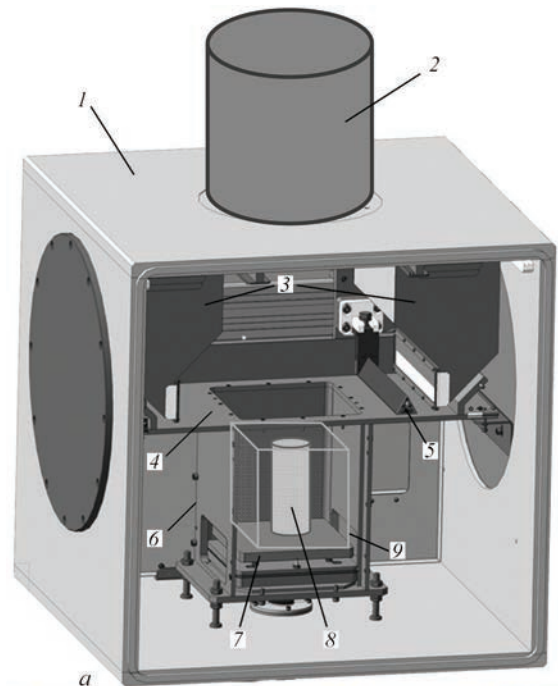


Рис. 13. Схема (а) и промышленный образец (б) установки для аддитивного производства с применением металлических порошковых материалов (обозначения см. в тексте)

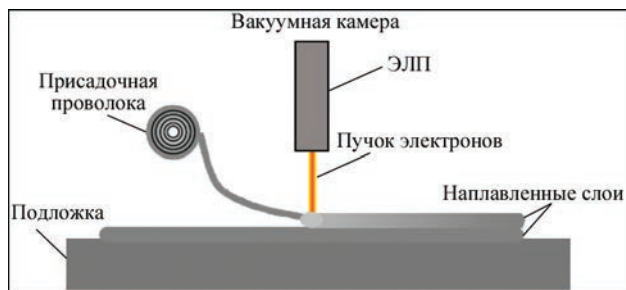


Рис.14. Схема послыонного электронно-лучевого плавления присадочной проволоки



Рис.15. Расположение оборудования для наплавки проволокой в вакуумной камере: 1 — вращатель; 2 — электронно-лучевая пушка (ЭЛП) типа ЭЛА-60, 3 — катушка со сварочной проволокой; 4 — многокоординатный модуль перемещения ЭЛП; 5 — механизм подачи присадочной проволоки; 6 — изделие

формы. После чего оно подвергается термической и механической обработке.

Производительность электронно-лучевой наплавки по технологии DM варьируется от 3 до 9 кг металла в час в зависимости от выбранного материала и характеристик изделия, что делает его самым быстрым процессом аддитивного производства.

На базе оборудования для электронно-лучевой сварки типа KL-209 создана лабораторная установка для реализации аддитивного процесса DM. Вакуумная камера установки приведена на рис. 15. На вращателе находится изделие, полученное по технологии DM.

На лабораторном оборудовании получено удовлетворительное формирование круглых и прямоугольных образцов, из которых есть возможность составлять сложные геометрические формы в виде комбинации тел вращения и прямоугольников. Толщина стенок образцов варьировалась от 6 до 10 мм при использовании четырех типов проволоки.

Наш Институт находится в процессе непрерывного совершенствования как системы управления

оборудованием для ЭЛС, так и функциональности разрабатываемого оборудования, с учетом эволюции аппаратной и элементной базы, а также накопленного многолетнего опыта разработки технологии и оборудования для ЭЛС разнообразных материалов с различными толщинами.

В заключение можно сказать, что представленная выше информация по изготовлению установок для электронно-лучевой сварки узлов и деталей по разработанным в ИЭС им. Е.О. Патона технологиям, а также сами установки нашли применение как в отечественной промышленности, так и за рубежом и являются значимым достижением специалистов Института.

Литература

1. Hamm R. W. (2008) Reviews of Accelerator Science and Technology. *Industrial Accelerators*, 1, 163-184.
2. Патон Б. Е., Назаренко О. К., Нестеренков В. М. и др. (2004) Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия. *Автоматическая сварка*, 5, 3-7.
3. Назаренко О. К., Кайдалов А. А., Ковбасенко С. Н., Бондарев А. А. (1987) *Электронно-лучевая сварка*; Б. Е. Патон (ред.). Киев, Наукова думка.
4. Матвейчук В. А. (2016) Системы визуализации процессов сварки в режиме реального времени с помехозащитным каналом передачи сигнала вторичной электронной эмиссии. *Автоматическая сварка*, 5-6, 64-68.
5. Нестеренков В. М., Орса Ю. В., Хрипко К. С., Гусев Ю. В. (2017) Восстановительный ремонт элементов и узлов газотурбинных двигателей. *Там же*, 11, 19-24.
6. Нестеренков В. М., Матвейчук В. А., Русыник М. О. (2018) Получение промышленных изделий с применением электронно-лучевых технологий для 3D печати. *Там же*, 1, 34-39.
7. Нестеренков В. М., Матвейчук В. А., Русыник М. О., Овчинников А. В. (2017) Применение аддитивных электронно-лучевых технологий для изготовления деталей из порошков титанового сплава ВТ1-0. *Там же*, 3, 5-10.

References

1. Hamm, R.W. (2008) Reviews of accelerator science and technology. *Industrial Accelerators*, 1, 163-184.
2. Paton, B.E., Nazarenko, O.K., Nesterenkov, V.M. et al. (2004) Computer control of electron beam welding with multi-coordinate displacements of the gun and workpiece. *The Paton Welding J.*, 5, 2-5.
3. Nazarenko, O.K., Kaydalov, A.A., Kovbasenko, S.N., Bondarev, A.A. (1987) *Electron beam welding*. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Matvejchuk, V.A. (2016) Systems for visualization of welding processes in real-time mode using noise-proof channel for transfer of secondary electron emission signal. *The Paton Welding J.*, 5-6, 59-62.
5. Nesterenkov, V.M., Orsa, Yu.V., Khripko, K.S., Gusev, Yu.V. (2017) Restoration repair of elements and units of gas turbine engines. *Ibid.*, 11, 13-17.
6. Nesterenkov, V.M., Matvejchuk, V.A., Rusynik, M.O. (2018) Manufacture of industrial products using electron beam technologies for 3D-printing. *Ibid.*, 1, 24-28.
7. Nesterenkov, V.M., Matvejchuk, V.A., Rusynik, M.O., Ovchinnikov, A.V. (2017) Application of additive electron beam technologies for manufacture of parts of VT1-0 titanium alloy powders. *Ibid.*, 3, 2-6.

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ, НАПЛАВЛЕННЯ, ПРОТОТИПУВАННЯ — РЕЗУЛЬТАТИ І ПЕРСПЕКТИВИ

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, К. С. ХРИПКО, В. А. МАТВІЙЧУК

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України протягом багатьох десятиліть спеціалізується на розробці технологій та обладнання для електронно-променевого зварювання сучасних конструкційних сплавів. Розроблене в Інституті електронно-променево обладнання дозволяє вирішувати завдання по з'єднанню елементів складних конструкцій різних галузей промисловості. Показано приклади і технічні можливості установок, найбільш затребуваних промисловістю. Наведено ряд виробів, у виробництві яких успішно застосовано як обладнання, так і нові технологічні процеси, до яких відноситься відновлювальний ремонт частин газотурбінних двигунів і технології пошарового виробництва виробів методом швидкого прототипування. Бібл. 7, рис. 15.

Ключові слова: електронно-променево зварювання, обладнання, ремонт, 3D технології

ELECTRON BEAM TECHNOLOGIES OF WELDING, SURFACING, PROTOTYPING. RESULTS AND PROSPECTS

V.M. NESTERENKOV, K.S. KHRIPKO, V.A. MATVICHUK

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11, Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

For many decades the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine has been specializing in the development of technology and equipment for electron beam welding of modern structural alloys. The electron beam equipment developed at the Institute allows solving problems of joining the elements of complex structures of different branches of industry. The examples and technical capabilities of the installations, mostly demanded by industry, are shown. A number of products are given, in the production of which both equipment and new technological processes were successfully applied, which include restoration repair of parts of gas turbine engines and the technologies of layer-by-layer manufacturing of products using the method of rapid prototyping.

Keywords: electron beam welding, equipment, repair, 3D technologies

Поступила в редакцію 10.09.2018

