



# ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ УСТАНОВКА L-8 ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЛОПАТКИ ТУРБИН

Н. И. ГРЕЧАНИЮК, П. П. КУЧЕРЕНКО, А. Г. МЕЛЬНИК, Д. В. КОВАЛЬЧУК, И. Н. ГРЕЧАНИЮК\*

ООО «НПП «Элтехмаш». Украина, г. Винница, ул. Ватутина, 25.

E-mail: eltechmach@gmail.com

Электронно-лучевые технологии находят все более широкое применение в мире при производстве и ремонте лопаток турбин. Оборудование для их осуществления производится в Германии, США, Украине и других странах. В работе рассмотрены конструктивные особенности и технологические возможности промышленной электронно-лучевой установки L-8 для нанесения теплозащитных покрытий на лопатки турбин, разработанной в научно-производственном предприятии «Элтехмаш». Отличительной особенностью установки является возможность осаждения всех современных теплозащитных покрытий на одном типе оборудования и при необходимости за один технологический цикл. Решена задача предварительного нагрева лопаток в шлюзовых камерах установки, их ионной очистки перед нанесением теплозащитного покрытия, а также формирования барьерных микрослоев между функциональными слоями теплозащитных покрытий с целью замедления диффузионных процессов на их межфазных границах и контроля толщины теплозащитных покрытий. Библиогр. 14, рис. 3.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая установка, теплозащитные покрытия, лопатки газовых турбин

В настоящее время особое внимание уделяется созданию специализированного электронно-лучевого оборудования для нанесения теплозащитных покрытий (ТЗП) на лопатки турбин. Среди ведущих мировых производителей — фирмы «ALD Vacuum Technologies», «Von Ardenne», «Pratt&Whitney», Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и др. В частности, Институтом электросварки был изготовлен и успешно эксплуатируется ряд промышленных электронно-лучевых установок для нанесения ТЗП [1–4]. Общей особенностью этих установок является применение плосколучевых электронных пушек с ресурсом работы катода не более 50 ч.

Определенные успехи в создании подобного оборудования достигнуты в научно-производственном предприятии «Элтехмаш» (г. Винница, Украина) [5–13].

Отличительной особенностью промышленной электронно-лучевой установки L-8 разработки предприятия «Элтехмаш» является применение газоразрядных пушек и возможность нанесения всех типов и конструкций защитных покрытий: металлических, керамических, композиционных, металло-керамических, однослойных, многослойных, градиентных и т. п. Сложные по своему химическому составу и конструкции ТЗП на лопатках газовых турбин на данной установке могут быть сформированы за один технологический цикл.

## Технические данные промышленной электронно-лучевой установки L-8

Размеры цилиндрической кассеты с изделиями, мм, не более:	
– диаметр .....	250
– длина .....	500
Скорость вращения изделия на горизонтальном штоке, об/мин .....	0,5...50
Количество испарителей, шт. ....	4
Внутренний диаметр тиглей, мм .....	70
Длина испаряемых слитков, мм, не более .....	500
Скорость подачи слитков, мм/мин.....	0,5...350
Расстояние от верхнего среза тиглей до оси вращения кассеты или плоскости напыления, мм .....	350
Количество и номинальная мощность (кВт) электронных пушек:	
– для испарения материалов из тиглей .....	4×100
– для нагрева изделий .....	2×60
Тип электронных пушек – аксиальные с холодным катодом (на основе высоковольтного тлеющего разряда)	
Потребляемая мощность, кВт, не более	
– высоковольтными источниками питания .....	520
– вспомогательным оборудованием .....	80
Номинальное ускоряющее напряжение, кВ .....	30
Рабочий вакуум в камерах, Па (мм рт. ст.).....	$6 \cdot 10^{-3} \dots 6 \cdot 10^{-2}$
.....	$(5 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-4})$
Габаритные размеры установки, мм, не более:	
– длина .....	10500
– ширина .....	9500
– высота .....	4300
Масса установки (с источниками питания), т, не более .....	25

\* В работе принимали участие В. И. Мельник, И. В. Мельник, Б. А. Тугай.

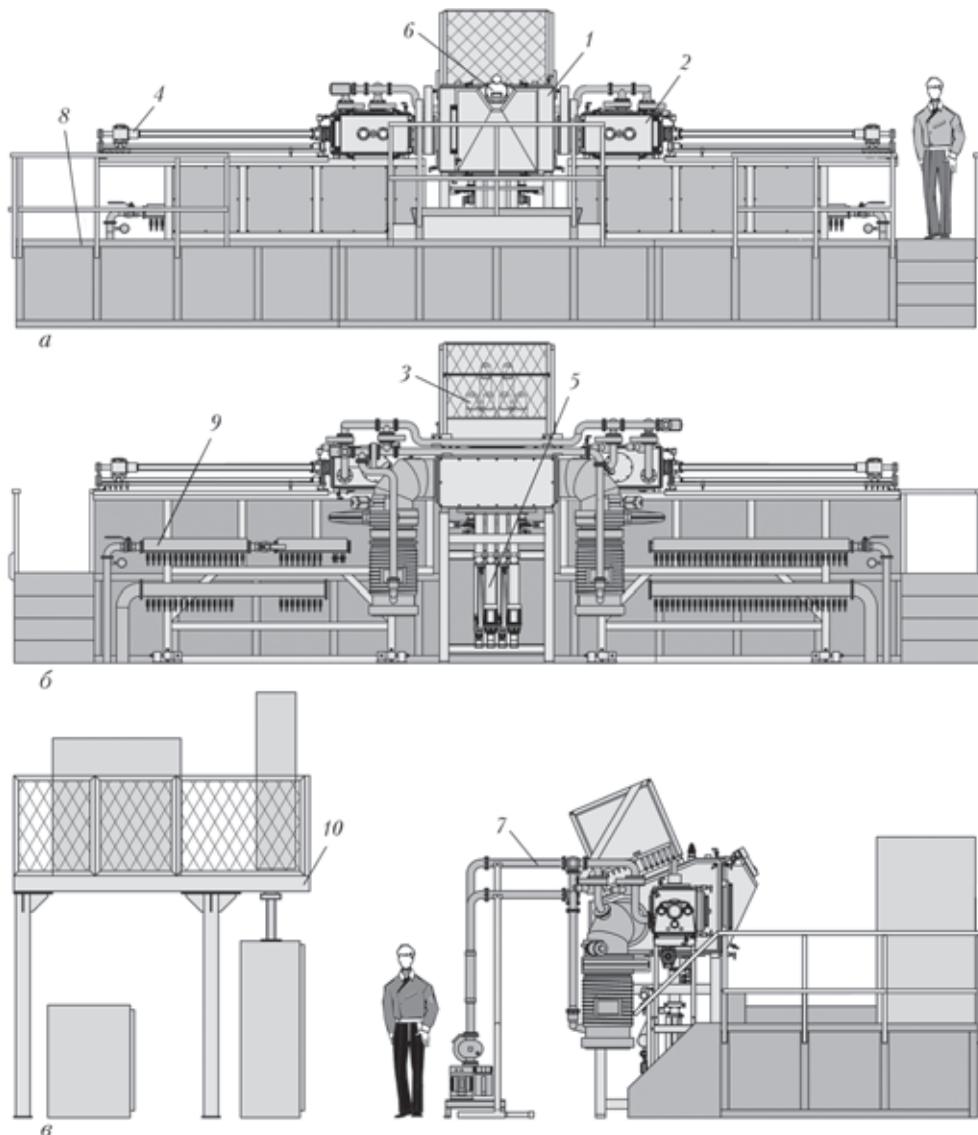


Рис. 1. Общий вид установки L-8: *а* — вид спереди; *б* — сзади; *в* — слева (1 — камера технологическая; 2 — камера шлюзовая; 3 — электронные пушки; 4 — механизм подачи кассеты (изделий); 5 — механизм подачи слитка; 6 — смотровая система; 7 — вакуумная система; 8 — площадка обслуживания; 9 — система охлаждения; 10 — платформа высоковольтных источников питания)

Общий вид установки приведен на рис. 1.

Установка представляет собой блок вакуумных камер с механизмами, устройствами и системами, обеспечивающими проведение технологического процесса нанесения покрытий в вакууме. Схема камеры осаждения покрытий приведена на рис. 2. Внешний вид установки представлен на рис. 3.

В технологической (рабочей) камере установки (рис. 2) происходит процесс осаждения парового потока на покрываемые заготовки. В рабочей камере с помощью вакуумной системы поддерживается вакуум  $5 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. Снизу камеры пристыкован блок испарителей, в состав которого входят четыре медных водоохлаждаемых тигля и четыре механизма подачи испаряемых слитков. Загрузка слитков испаряемых материалов в механизмы производится сверху через тигли. Электронные пушки установлены на верхней крышке рабочей камеры.

Две синхронно работающие заслонки предназначены для экранирования покрываемых деталей во время разогрева испаряемых материалов и деталей до установления стабильного технологического режима испарения. Две другие заслонки, установленные в рабочей камере, служат для защиты затворов, разделяющих шлюзовые и рабочую камеры от запыления и высокой температуры при проведении технологического процесса.

На верхней стенке камеры установлен датчик контроля толщины осаждаемых покрытий, на задней стенке — шаровый ввод с визирной трубкой и смотровым окном для осуществления возможности бесконтактного измерения температуры. Измерение температуры изделий в установке осуществляется с помощью высокотехнологичного инфракрасного пирометра и специального программного обеспечения. На технологическую

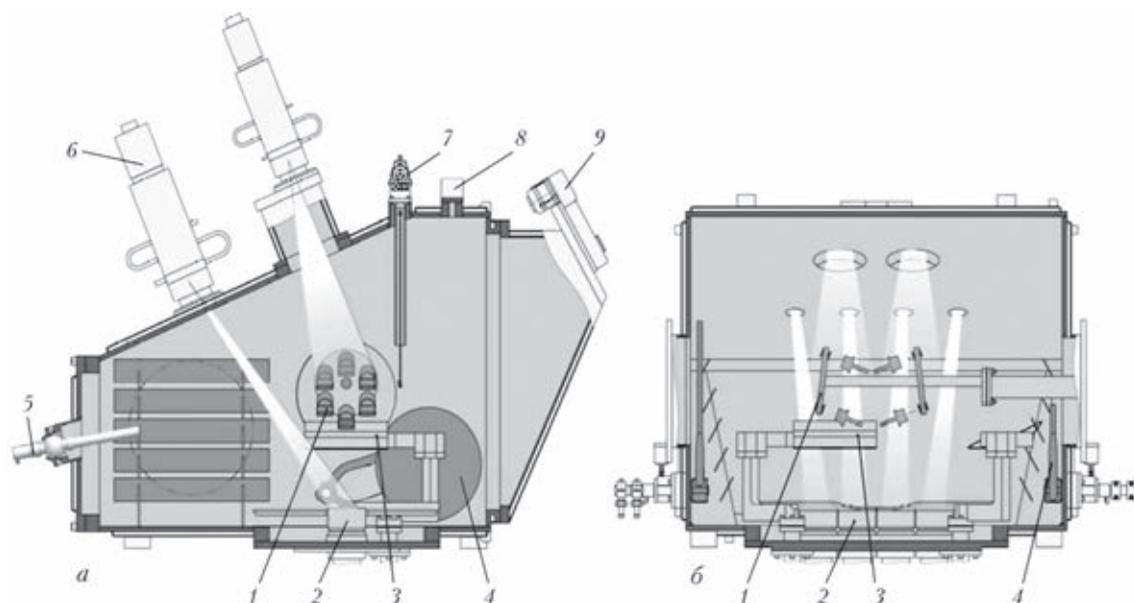


Рис. 2. Схема технологической камеры установки: *а* — поперечный разрез; *б* — продольный (1 — кассета с лопатками; 2 — тигли; 3 — заслонки испарителей; 4 — заслонки затворов; 5 — шаровый ввод для установки пирометра; 6 — электронная пушка; 7 — весовой датчик; 8 — натекаль технологического газа; 9 — смотровая система)

и загрузочные камеры установлены электромагнитные натекатели газа с системой стабилизации потока, которые позволяют производить дозируемый напуск технологических газов.

Введение небольшого количества газа (аргона) в процессе испарения приводит к рассеиванию парового потока, что позволяет осуществлять более равномерное осаждение материала на открытые и затененные участки изделий [3].

В установке также предусмотрена возможность осуществлять частичную ионизацию технологического газа и металлического пара путем подачи на изделия отрицательного потенциала (до 2 кВ). Ионизация способствует получению покрытия с благоприятной структурой, лишенной кристаллографических дефектов, которые возникают в конденсированном слое при напуске газа [14].

Также предусмотрена возможность подачи в камеру кислорода при осаждении керамики для обеспечения ее стехиометрического состава.

Шлюзовые камеры предназначены для пере-

загрузки покрываемых изделий. Разобшение объемов перечисленных выше камер производится двумя вакуумными затворами  $d = 320$  мм. Наличие двух вспомогательных камер увеличивает производительность установки. Нанесение покрытий на изделия, подаваемые поочередно из шлюзовых камер, происходит без развакуумирования технологической камеры.

В шлюзовых камерах установки предусмотрена возможность производить ионную очистку изделий перед нанесением покрытий, что позволяет улучшить сцепление осажденного слоя с деталью, а также наносить барьерные микрослои между функциональными слоями ТЗП с целью замедления диффузионных процессов на их границах. Для этого установка оборудована дуговыми испарителями, которые установлены на каждую загрузочную камеру, и системой управления ионной очисткой. В шкафу управления размещены источники питания дуговых испарителей и два регулируемых источника напряжения смещения,

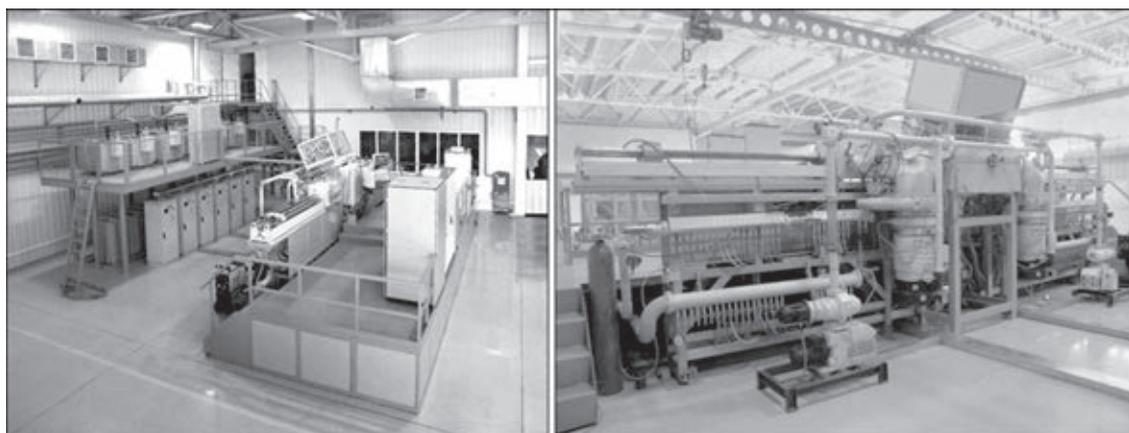


Рис. 3. Внешний вид электронно-лучевой установки L-8

которое подается на оснастку с изделиями в процессе очистки. Таким образом, очистка может осуществляться в двух режимах: предварительная дегазация и очистка изделий тлеющим разрядом в аргоне путем подачи на оснастку с изделиями отрицательного потенциала до 2 кВ относительно корпуса камеры; очистка путем бомбардировки деталей ионами металла с использованием дугового испарителя и подачей напряжения смещения на оснастку.

В качестве катода в испарителе используется сплав CrLaFe. В результате горения дугового разряда в вакууме происходит ионизация и распыление материала катода. При этом регулирование напряжения смещения на изделиях позволяет изменять скорость нанесения подслоя и температуру нагрева деталей в результате бомбардировки.

Механизмы горизонтальной подачи изделий служат для перемещения напыляемых изделий из форкамер в рабочую камеру и обратно, а также для вращения оснастки с изделиями. Для компенсации возможного прогиба штока в крайнем выдвинутом положении передняя опора штока выполнена на цапфах.

Ввод горизонтального штока в камеру выполнен таким образом, что уплотнение поступательного и вращательного движения штока осуществляется разными уплотнительными устройствами. Такая развязка предотвращает быстрый выход из строя манжетного уплотнения поступательного перемещения штока. Штоки снабжены токосъемниками для подачи напряжения смещения через полый вал на оснастку с изделиями. Напряжение смещения до 2 кВ необходимо для осуществления ионной очистки изделий.

Вакуумная система установки построена на комплектующих Oerlicon Leybold Vacuum (Германия) и VAT (Швейцария). Используются затворы и клапаны с пневмоприводом. При отключении электроэнергии или падении давления сжатого воздуха все клапаны и затворы автоматически закрываются под действием встроенных пружин. Форвакуумные насосы характеризуются низким уровнем шума и комплектуются фильтрами очистки выхлопных газов. Насос Рутса имеет встроенный клапан защиты от чрезмерного перепада давления на входе и выходе и позволяет начинать откачку при атмосферном давлении на входе одновременно с включением форвакуумного насоса. В результате скорость откачки комбинации насосов возрастает. Паромасленные насосы поставляются с пароулавливающей ловушкой и имеют встроенные термостаты защиты от перегрева масла и превышения температуры охлаждающей воды.

Система управления вакуумом обеспечивает автоматическое аварийное закрывание затворов

высоковакуумных насосов при падении вакуума в камерах ниже  $10^{-1}$  мм. рт. ст, а также аварийное перекрытие трубопроводов на всасывании механических насосов при внезапном прекращении подачи электроэнергии.

Непосредственное управление вакуумной системой производится в автоматическом или ручном режиме с помощью сенсорной панели оператора, которая имеет для этого отдельное окно управления. На панель оператора выводится информация о состоянии вакуума в магистралях вакуумной системы, насосах, камерах и т. д. Для измерения вакуума в установке используются вакуумметрические датчики с выходным сигналом, пропорциональным давлению. Все измерительные сигналы от вакуумметров обрабатываются с помощью промышленного контроллера и отображаются на панели оператора. Система охлаждения установки обеспечивает подачу холодной воды к узлам и конструкциям, требующим охлаждения. Проток воды через наиболее ответственные узлы (тигли, насосы, пушки) контролируется с помощью датчиков протока. Также контролируется температура охлаждающей воды. При отсутствии протока или превышении установленного значения температуры осуществляется защитное отключение источников ускоряющего напряжения. Информация о наличии или отсутствии протока воды выводится на экран оператора.

Смотровая система, расположенная на передней двери технологической камеры, представляет собой стробоскопическое устройство для наблюдения за поверхностью расплавленных слитков в тиглях и за нагревом изделий.

Четыре электронно-лучевых пушки мощностью 100 кВт установлены для испарения материалов из тиглей таким образом, что каждая электронная пушка, предназначенная для испарения слитка из соответствующего тигля, может также испарять материал из соседнего тигля. Для нагрева изделий служат две электронные пушки мощностью 60 кВт.

В установке использованы газоразрядные электронно-лучевые пушки.

**Технические параметры пушек мощностью 100 кВт**

Ускоряющее напряжение, кВ, не более.....	30
Максимальный ток луча, А.....	3,3
Диаметр пятна в фокусе пучка, мм.....	около 10
Угол отклонения электронного луча от оси, град.....	15
Частота развертки электронного луча, Гц, не более.....	50
Ток фокусирующих линз, А, не более.....	0,95
Рабочее давление в технологической камере, Па, не более.....	$10^{-1}$
Рабочий газ.....	технический водород, смесь водорода и кислорода и др.
Максимальный расход газа (л-атм /ч), не более.....	10
Расход охлаждающей воды с температурой $15\pm 5^{\circ}$ С при давлении 0,3 МПа, л/мин.....	15



Использование холодного катода из низковольтного сплава алюминия исключает любые его искривления, что дает возможность получать стабильный электронный пучок. Общий ресурс катода составляет около 1000 ч. Использование системы электромагнитной фокусировки в пушках с холодным катодом позволяет получить качественный луч с минимальным диаметром фокального пятна около 10 мм.

Принцип действия газоразрядной электронной пушки основан на генерировании и формировании электронного пучка в высоковольтном тлеющем разряде. При работе пушки в ее разрядной камере (между катодом и анодом) горит высоковольтный тлеющий разряд с плазмой, локализованной возле анода и отделенной от катода областью катодного падения потенциала. Плазма эмитирует положительные ионы, которые ускоряются полем в области катодного падения и бомбардируют катод, вызывая эмиссию электронов. Поле катодного падения потенциала ускоряет электроны и формирует сходящийся электронный пучок с кроссовером, расположенным на расстоянии от катода, близким к радиусу кривизны его эмиссионной поверхности (вблизи отверстия в аноде).

Магнитное поле, создаваемое первой фокусирующей линзой, формирует электронный пучок по форме, близкий к цилиндрическому, вследствие чего он проходит через лучепровод без энергетических потерь в технологическую камеру. С помощью второй фокусирующей линзы пучок фокусируется на поверхности расплава, а с помощью систем отклонения осуществляется программная развертка пучка.

Управление током разряда обеспечивается регулированием давления рабочего газа в пушке при непрерывной его откачке совместно с технологической камерой установки. Для эффективного управления током разряда и стабилизации режима работы пушки применяется система автоматического напуска газа.

Система управления электронно-лучевыми пушками обеспечивает регулирование и стабилизацию токов лучей, токов электромагнитных линз, управление положением и сканированием пучка, а также позволяет осуществлять нанесение слоистых (микрослойных) покрытий.

В состав установки входят шесть высоковольтных источников питания для питания шести электронно-лучевых пушек постоянным током высокого напряжения. Высоковольтный источник питания обеспечивает преобразование трехфазного переменного напряжения в постоянное напряжение, ограничение токов короткого замыкания, отключение высокого напряжения при пробоях в пушках, а также автоматическое повторное включение.

Один комплект высоковольтного источника питания включает следующие основные составные части: шкаф пускозащитной аппаратуры (ПЗА); токоограничивающий дроссель; высоковольтный преобразователь.

Высоковольтный преобразователь состоит из силового высоковольтного трансформатора, блока выпрямителя и высоковольтных делителей, помещенных в один маслonaполненный корпус.

Система управления электроприводами обеспечивает управление механизмами подачи слитков, механизмами подачи и вращения боковых валов, смотровой системой, тигельными заслонками и заслонками междукамерных затворов.

На двигатели механизмов подачи слитков установлены энкодеры, выходной сигнал которых подается на преобразователи частоты и используется для стабилизации и расширения диапазона регулирования скорости подачи слитков.

Сигналы от энкодеров на механизмах подачи слитков и подачи бокового вала также используются системой на базе ПЛК для позиционирования и замера скоростей подачи указанных механизмов. Установка нулевых значений положения штоков осуществляется автоматически при срабатывании концевых выключателей. Положения механизмов и скорость вращения валов отображаются на экране оператора.

Система управления подачей боковых валов позволяет осуществлять возвратно-поступательное движение оснастки с изделиями в процессе осаждения покрытия в заданных пределах и с заданной скоростью для обеспечения равномерности осаждаемых покрытий по периметру изделий.

Автоматизированная система управления и мониторинга технологических параметров (АСУ) обеспечивает автоматический сбор и визуализацию технологических параметров в реальном времени, документирование информации в базе данных, осуществление функций автоматизированного и ручного управления вакуумной системой установки.

Комплекс состоит из двух основных систем: системы управления, сбора, обработки и визуализации технологической информации на базе промышленного программируемого контроллера и сенсорной панели оператора и информационно-регистрирующей системы на базе промышленного компьютера с операционной системой Windows®.

Программное обеспечение сенсорной панели оператора разработано в виде многооконного интерфейса. В окне «Мнемосхема» в графическом виде представлена мнемосхема всей вакуумной системы с отображением цифровых значений вакуума в семи точках по принимаемым данным

от системы управления. Система управления вакуумной откачкой предоставляет оператору возможность работать в ручном, автоматическом и сервисном режимах.

В ручном режиме оператору предоставляется возможность управлять вакуумным оборудованием по своему усмотрению. В этом режиме система управления вводит в действие программные блокировки, которые не позволяют оператору производить некорректные действия по отношению к вакуумной системе. При этом на мнемосхеме отображаются только те элементы управления, с которыми можно производить действия, и становятся недоступными те, которые заблокированы.

При переходе в автоматический режим на экране появляется блок кнопок, которые используются для осуществления функций автоматической откачки вакуумных камер, напуска воздуха, а также отключения установки после завершения работы и приведения вакуумной системы в исходное состояние. Режим «Сервис» снимает все блокировки и используется только для наладки системы управления инженерными работниками, обслуживающими данную установку. Для активации данного режима необходимо ввести пароль доступа.

В окне «Процесс» отображаются значения ускоряющих напряжений, токи лучей электронных пушек, скорость подачи и остатка слитков, величина вакуума в рабочей и загрузочной камерах, позиция горизонтальных валов, показания весового датчика, температура изделия, наличие протока воды в катодах и анодах электронных пушек и тиглях и т. д.

Окна «Графики вакуума», «График температуры» и «Токи лучей» предоставляют возможность наблюдения за изменением в реальном времени указанных параметров.

Производительность установки — до 60 тыс. покрываемых лопаток в год. Установка успешно прошла производственные испытания и введена в промышленную эксплуатацию в НПО «Сатурн» (г. Рыбинск).

## Выводы

1. Разработана конструкция, изготовлена и успешно введена в промышленную эксплуатацию электронно-лучевая установка L-8 для нанесения ТЗП на лопатки газовых турбин.

2. Решена задача предварительного нагрева ло-

паток в шлюзовых камерах установки, их ионной очистки перед нанесением ТЗП, а также формирования барьерных микрослоев между функциональными слоями ТЗП с целью замедления диффузионных процессов на их межфазных границах.

3. Решена задача контроля толщины в процессе осаждения ТЗП.

1. Пап П. А., Малащенко И. С., Иванов А. М. Лабораторная установка для получения защитных покрытий различного назначения электронно-лучевой конденсацией в вакууме // Спец. электрометаллургия. — 1975. — Вып. 27. — С. 98–104.
2. Промышленная электронно-лучевая установка УЭ-175М для нанесения защитных покрытий на лопатки газовых турбин / А. И. Четвертко, В. В. Щербицкий, Б. А. Мовчан и др. // Там же. — 1982. — Вып. 50. — С. 53–61.
3. Мовчан Б. А., Малащенко И. С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. — Киев: Наук. думка, 1983. — 230 с.
4. Мовчан Б. А., Яковчук К. Ю.. Электронно-лучевые установки для испарения и осаждения неорганических материалов и покрытий // Спец. электрометаллургия. — 2004. — № 2. — С. 10–15.
5. Современное состояние и перспективы создания теплозащитных покрытий (ТЗП) для лопаток газотурбинных установок (ГТУ) и оборудования для их нанесения / Н. И. Гречанюк, П. П. Кучеренко, В. А. Осокин, П. А. Шпак // Новини енергетики. — 2000. — № 9. — С. 32–37.
6. New materials, coatings and electron-beam equipment for their production / N. Grechanyuk, P. Kucherenko, V. Osokin et al. // Intern. conf. «Electron Beam Technologies EBT 2003», Varna, Bulgaria, 2013. — P. 258–264.
7. Pat. 2451682 Canada. Installation for coating parts using electron beams / N. Grechanyuk, P. Kucherenko. — Publ. 23.05.2005.
8. Pat. 6923868 B2 US. Installation for electron-ray coatication of coatings / N. Grechanyuk, P. Kucherenko. — Publ. 2.08.2005.
9. Пат. 2265078 РФ. Установка для электронно-лучевого нанесения покрытий / Н. И. Гречанюк, П. П. Кучеренко. — Введ. 27.11.2005.
10. Modern technologies and equipment for obtaining of new materials and coatings / N. Grechanyuk, P. Kucherenko, I. Grechanyuk, P. Shpak // Electrotechnica & Electronica. — 2006. — № 5-6. — С. 122–128. 8-th Intern. conf. on electron beam technologies, 5–10 June 2006, Varna, Bulgaria. — P. 122–128.
11. Гречанюк Н. И., Кучеренко П. П., Гречанюк И. Н. Новое электронно-лучевое оборудование и технологии получения современных материалов и покрытий // Автомат. сварка. — 2007. — № 5. — С. 36–41.
12. Grechanyuk N., Medzinski B., Grodzinski A. Modern electron beam technologies for fabrication of various materials, powders and metal compositions from a vapour phase // Przegląd Elektrotechniczny. — 2010. — № 5. — P. 1–4.
13. Modern electron beam technologies and physical vapor deposition of different materials / N. Grechanyuk, A. Melnik, I. Grechanyuk et al. // Electrotechnica & Electronica — 2014. — № 5, 6. — P.115–121. 11-th Intern. conf. on electron beam technologies, 8–12 June 2014, Varna, Bulgaria.
14. Boone D. H., Lee D., Shafer J. M. The electron beam coating of turbine components and ion plating. — In: IPAT 77: Proc. Conf. Ion Plating and Allied Techn. Edinburgh. — 1977, S. I., s. a., P. 141–148.

Поступила в редакцию 01.09.2014