

УДК 621. 793

Н.И.Гречанюк, П.П.Кучеренко<sup>(1)</sup>, И.Н.Гречанюк<sup>(1)</sup>, О.П.Василега, Р.В.Минакова

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины

<sup>(1)</sup> Научно-промышленное предприятие «Элтехмаш»

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

*Приведены данные о современных теплозащитных покрытиях для лопаток ГТД. Рассмотрена электронно-лучевая технология получения жаростойких и теплозащитных покрытий, и ее особенности. Представлено основные типы электронно-лучевых установок используемых для получения покрытий.*

**Ключевые слова:** Теплозащитные покрытия, лопатки ГТД, электронно-лучевая технология.

В конце 60-х начале 70-х годов прошлого столетия в институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины был разработан способ получения толстых (более 5 мкм) пленок металлических и неметаллических материалов путем высокоскоростного электронно-лучевого испарения и последующей конденсацией в вакууме.

В промышленно развитых странах указанный способ послужил базой для создания промышленных технологий осаждения защитных покрытий на лопатки газовых турбин.

Проблема создания эффективно, экономно и надежно работающих газовых турбин наиболее сложная среди многочисленных проблем, возникающих на пути развития газотурбостроения.

Важными элементами турбины являются рабочие и сопловые лопатки, материал и конструкция которых определяют допустимую температуру газа перед турбиной и тем самым непосредственно влияют на технико-экономические показатели работы газотурбинных двигателей (ГТД). Технологические трудности дальнейшего форсирования конвективного охлаждения лопаток, энергетическая ущербность пленочных завес и теплообменников, состояние развития металлургии жаропрочных сплавов указывают на то, что улучшение параметров цикла ГТД следует связывать с разработкой качественно новых систем защиты лопаток газовых турбин и переходом от жаростойких многокомпонентных покрытий к теплозащитным (ТЗП).

Попытки создания теплозащитных покрытий предпринимались более 60 лет назад. Однако интерес к ним возник в последние годы, когда были созданы современные ГТД с температурой газа близкой или превышающей температурный максимум работы существующих жаропрочных сплавов.

Проведенные исследования показали, что применение ТЗП толщиной 250 мкм с теплопроводностью 1 Вт/м·К на двух ступенях турбины позволяет реализовать одну из двух возможностей:

- при неизменной рабочей температуре материала лопаток увеличить температуру газа перед турбиной примерно на 100°C, что приведет к повышению КПД и экономии топлива более чем на 13%.

- не изменяя температур газа перед турбиной увеличить долговечность лопаток примерно в 4 раза вследствие снижения их рабочей температуры.

В НПП «Элтехмаш» защитные покрытия на лопатки турбин наносят путем электронно-лучевого испарения сплавов MeCrAlY (где Me-Ni, Co, Fe) MeCrAlYHfSiZr и керамики на основе ZrO<sub>2</sub>, стабилизированного Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и последующей конденсации паровой фазы на поверхности рабочих и направляющих лопаток газовых турбин различного назначения. Разработаны три класса покрытий (рис. 1):

- однослойные металлические типа MeCrAlY, MeCrAlYHfSiZr (рис. 1а).

- однослойные композиционные микрослойного типа с чередованием слоев MeCrAlY (MeCrAlYHfSiZr)/ MeCrAlY (MeCrAlYHfSiZr) + MeO, где MeO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или ZrO<sub>2</sub> + (6-8 % мас)Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 1б).

- двухслойные покрытия с внутренним металлическим MeCrAlY (MeCrAlYHfSiZr) и внешним керамическим слоями (рис. 1в).

- двухслойные покрытия с внутренним композиционным  $\text{MeCrAlY}$  ( $\text{MeCrAlYHfSiZr}$ ) +  $\text{MeO}$  дисперсно-упрочненного или микрослойного типов и внешним керамическим ( $\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$ ) слоями (рис. 1г).

- трехслойные покрытия с внутренним и промежуточным металлическими слоями на основе сплавов  $\text{MeCrAlY}$  ( $\text{MeCrAlYHfSiZr}$ ) и внешним слоем на основе керамики ( $\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$ ) (рис. 1д).

- трехслойные покрытия с внутренним металлическим  $\text{MeCrAlY}$  ( $\text{MeCrAlYHfSiZr}$ ), промежуточным композиционным  $\text{MeCrAlY}$  ( $\text{MeCrAlYHfSiZr}$ ) +  $\text{MeO}$  дисперсно-упрочненного или микрослойного типов и внешним керамическим ( $\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$ ) слоями (рис. 1ж).

- трехслойные покрытия с внутренним металлическим  $\text{MeCrAlY}$  ( $\text{MeCrAlYHfSiZr}$ ), промежуточным композиционным  $\text{MeCrAlY}$  ( $\text{MeCrAlYHfSiZr}$ ) +  $\text{MeO}$  дисперсно-упрочненного или микрослойного типов и внешним керамическим ( $\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$ ) с элементами – дисперсными частицами боридов, которые, окисляясь, залечивают микротрещины во внешнем керамическом слое, возникающие при термоциклах нагрев-охлаждение (рис. 1з).

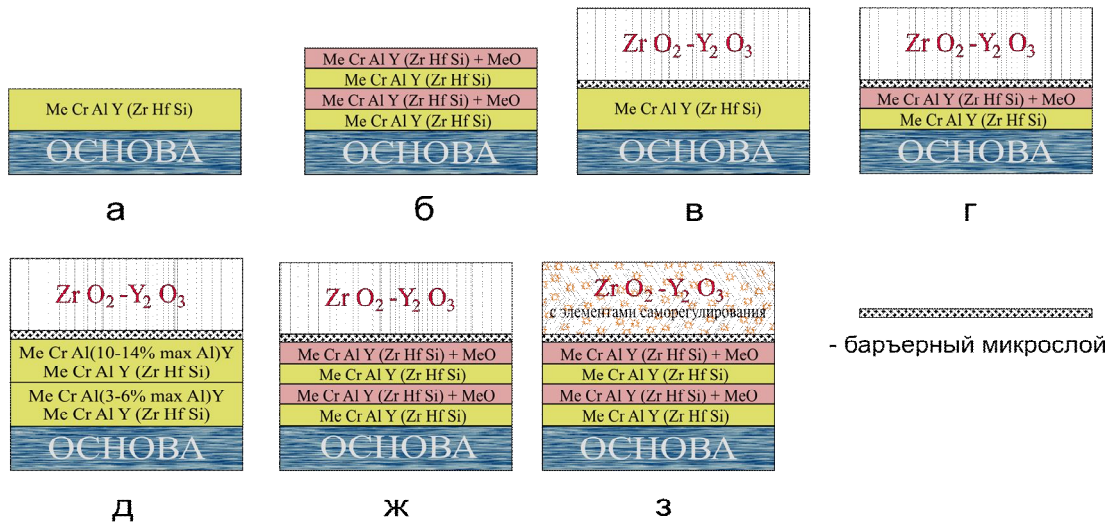


Рис. 1. Схемы жаропрочных и теплозащитных покрытий, получаемых электронно-лучевым осаждением

Общая толщина однослойных жаростойких покрытий не превышает 150 мкм, двухслойных теплозащитных 200 мкм, трехслойных теплозащитных – 300 мкм. Толщина демпфирующего внутреннего слоя с пониженным содержанием Al (3-6 % мас.) в трехслойных теплозащитных покрытиях колеблется от 30 до 50 мкм, промежуточного жаростойкого 50-80 мкм внешнего керамического 80-120 мкм концентрация Cr, Al, Y, Zr, Hf, Si в жаростойком слое составляют соответственно 18-24 % мас., 10-13 % мас., 0,4-1,8 % мас., Zr, Hf, Si от 0,05-0,2 % мас. Дополнительное легирование сплавов  $\text{MeCrAlY}$  цирконием, гафнием и кремнием позволило с одной стороны повысить жаростойкость однослойных многокомпонентных и композиционных жаростойких покрытий; с другой стороны при использовании указанных сплавов в качестве материала внутреннего демпфирующего и промежуточного жаростойкого слоев замедлить диффузионные процессы на границах основа – демпфирующий слой, промежуточный жаростойкий слой – внешний керамический слой и тем самым повысить ресурс работы в целом. Еще более существенное замедление диффузионных процессов в слоях, составляющих покрытия, наблюдается при выполнении промежуточного жаростойкого слоя в микрослойном варианте. При этом оптимальные характеристики достигаются при толщине чередующихся металлического и композиционного слоев от 0,5 до 1 мкм и концентрации дисперсных тугоплавких частиц ( $\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) в композиционном микрослое от 0,3 до 1 % мас.

При конструировании теплозащитных покрытий (ТЗП) принципиальное значение приобретает формирование барьерного микрослоя на границе раздела промежуточный жаростойкий слой – внешний керамический слой.

Обычно слой металлокерамики толщиной от 1 до 5 мкм на основе сложных шпинелей из  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CrO}_3$  и сплава  $\text{MeCrAlY}$  получают с помощью специальных технологических

приемов. Подобный барьерный слой тормозит образование оксидной пленки ( $Al_2O_3$ ) на границе раздела промежуточный - внешний слой теплозащитного покрытия.

Если толщина пленки из  $Al_2O_3$  достигает 10-15 мкм наблюдается отслоение внешнего керамического слоя  $ZrO_2 - Y_2O_3$ .

Двухслойные покрытия металл/керамика (рис.1в) осаждаемые по двухслойной технологии широко применяются на предприятии «Зоря-Машпроект» г. Николаев, Украина и обеспечивают ресурс работы лопаток первой ступени турбины газотурбинных агрегатов для перекачки газа до 25000 часов. В настоящее время завершены работы по оптимизации технологии нанесения двухслойных теплозащитных покрытий с внутренним композиционным слоем микрослойного типа с чередованием слоев  $CoCrAlY / CoCrAlY + (ZrO_2 - Y_2O_3)$  и внешним керамическим слоем  $ZrO_2 - Y_2O_3$ . Подобные покрытия наносятся за один технологический цикл и должны обеспечить ресурс работы до 32000 часов.

Повышение долговечности ТЗП за счет изменения его конструкции наиболее целесообразно, так как при этом нет необходимости вносить какие-либо изменения в схему технологического процесса, что связано со значительными расходами. Корректировки в схеме конструкции ТЗП не ограничены возможностями электронно-лучевой технологии.

В трехслойных покрытиях (рис. 1д, ж, з) как уже указывалось ранее, в качестве внутреннего демпфирующего слоя используют сплавы  $MeCrAlY$ ,  $MeCrAlYHfSiZr$  с соотношением компонентов, обеспечивающим высокую пластичность (относительное удлинение  $\delta=2,5$  %) и достаточную жаростойкость. Этот слой служит для снижения напряжений в ТЗП, а также торможения и блокирования трещин развивающихся с поверхности в глубь основы.

Промежуточный слой – композит повышенной жаростойкости и термостабильности. Третий внешний керамический на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом итрия. Во внешний керамический слой могут дополнительно вводиться один или несколько тугоплавких боридов. Окисляясь, бориды, залечивают возникающие во внешнем керамическом слое микротрещины.

Трехслойные покрытия разработаны для Московского научно-производственного объединения «Сатурн». Последняя модификация ТЗП для защиты лопаток первой ступени турбины военных двигателей пятого поколения. Аналогичные работы проводятся и для украинских предприятий, работающих в области газотурбиностроения, ГП «Ивченко-Прогресс» и АО «Мотор-Сич» г. Запорожье.

Для нанесения жаростойких и теплозащитных покрытий разработано лабораторное и промышленное электронно-лучевое оборудование. На рис.2 показан внешний вид универсальной лабораторной электронно-лучевой установки Л-2 для плавки и испарения материалов в вакууме. Схемы технологических процессов представлены на рис.3, технические характеристики установки приведены в табл.1.

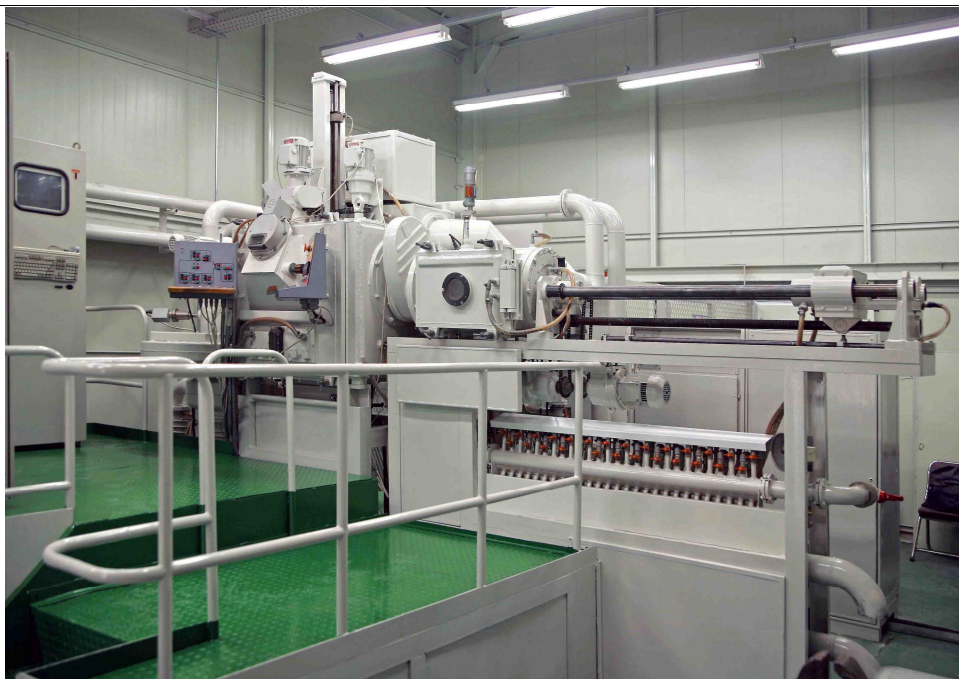


Рис. 2. Внешний вид универсальной лабораторной электронно-лучевой установки Л-2 для плавки и испарения материалов в вакууме

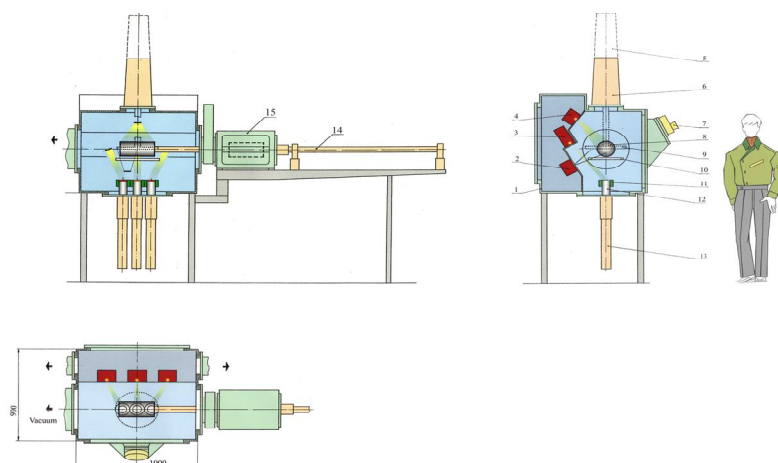


Рис. 3. Схема технологического процесса плавки и испарения материалов в вакууме: 1 – рабочая камера; 2 – ЭЛ пушка для нагрева изделия снизу; 3 – ЭЛ пушка для испарения материалов; 4 – ЭЛ пушка для нагрева изделия сверху; 5 – вертикальный механизм для сплавления заготовки; 6 – механизм подвески и вращения изделия; 7 – смотровая система; 8 – габарит цилиндрического изделия; 9 – габарит дискового изделия; 10 – заслонка; 11 – тигель; 12 – слиток; 13 – механизм подачи слитка на испарение; 14 – горизонтальный механизм подачи изделия; 15 – шлюзовая камера

Установка состоит из рабочей и вспомогательной камер для загрузки и выгрузки покрываемых изделий, количество тиглей 3. Длина испаряемых слитков 400 мм, диаметр испаряемых слитков 70 мм. Установка оснащена 5-ю электронно-лучевыми пушками с горячим катодом собственной конструкции.

Таблица 1

Технические характеристики универсальной лабораторной электронно-лучевой установки Л-2 для плавки и испарения материалов в вакууме

1. Установленная мощность, кВт	300
2. Ускоряющее напряжение, кВ	20
3. Размер испаряемых слитков, мм	

-диаметр	70
-длина	400
4. Размер сплавляемых заготовок, мм	
-диаметр	80
-длина	390
5. Размер выплавляемых слитков, мм	
-диаметр, сечение	70
-длина	400
6. Размер поверхности конденсации, мм	
-прямоугольной плоской	350x350
-круглой плоской (диаметр)	400
-цилиндрической	
-диаметр	200
-длина	400
7. Количество тиглей, шт.	3
8. Внутренний диаметр тиглей	70, 74
9. Грузоподъемность горизонтального штока, кг	30
10. Грузоподъемность горизонтального штока, кг	50
11. Количество и номинальная мощность электронных пушек, п x кВт	
-для испарения материалов	3 x 60
-для нагрева изделий	2 x 20
-для переплава	(2 x 60)
12. Степень вакуума в рабочей камере, Па	$6 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-2}$
13. Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч	10
14. Площадь, занимаемая установкой, м <sup>2</sup>	100

Установка предназначена для:

- переплава металлов и сплавов с целью рафинирования и получения цилиндрических слитков;
- получения специальных сплавов включая интерметаллиды, например Ni<sub>3</sub>Al, Ti<sub>3</sub>Al, TiAl и т.д.;
- осаждения коррозионностойких, теплозащитных, конструкционных покрытий на плоские поверхности и поверхности тел вращения включая лопатки газовых турбин;
- осаждения особо твердых износостойких покрытий из чистых металлоподобных соединений и их смесей, в том числе покрытий микрослойного типа.
- синтеза при осаждении паровых потоков тугоплавких соединений (карбидов, боридов, силицидов) и получения тонких и толстых (покрытий).
- получения дисперсно-упрочненных микрослойных и микропористых материалов в виде покрытий и массивных заготовок отделяемых от подложки, получения покрытий из равновесных фаз углерода.

Для промышленного применения создана универсальная электронно-лучевая установка Л-9.

Общий вид установки Л-9 и схема нанесения покрытий показаны на рис 4.

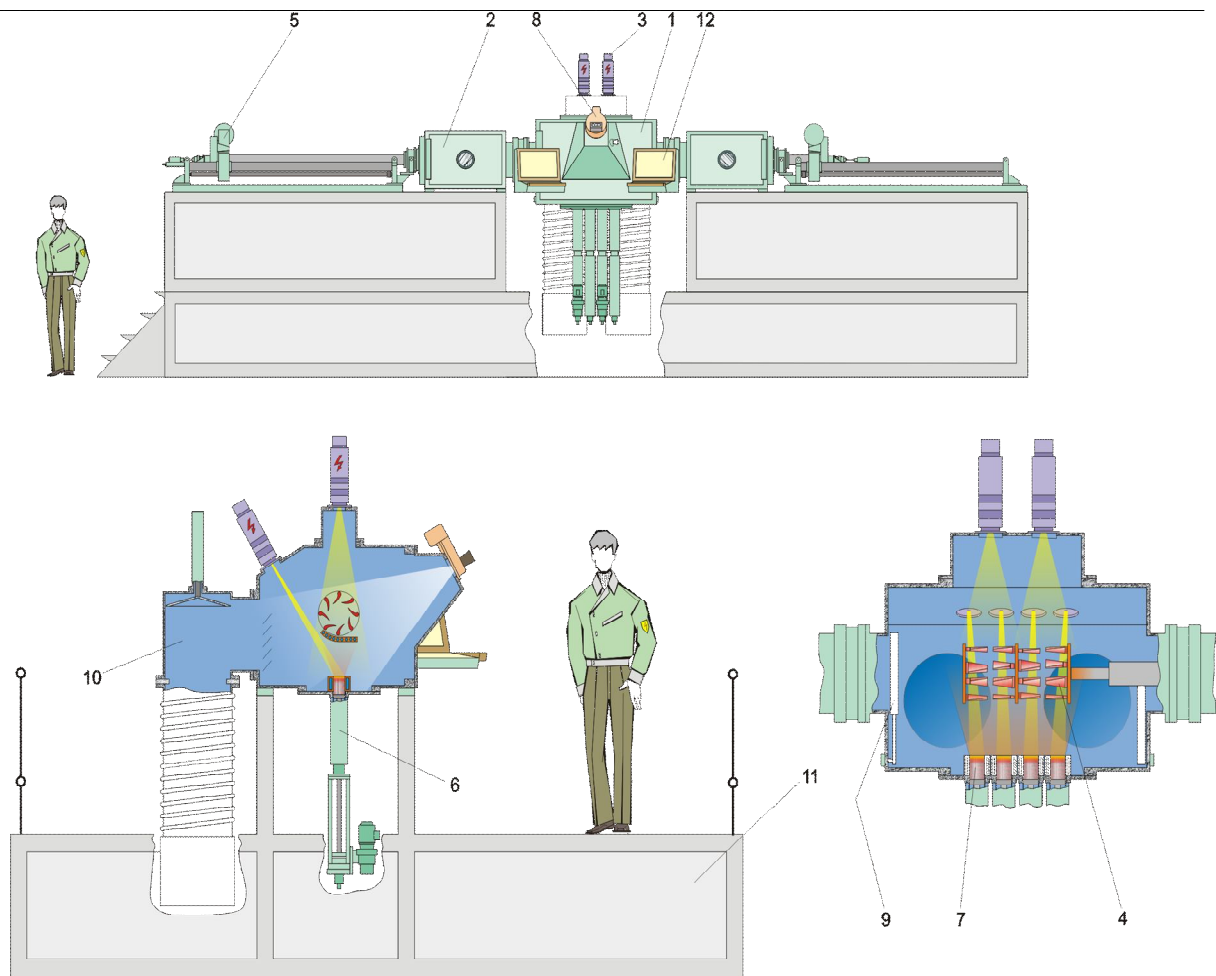


Рис. 4. Общий вид установки Л-9 и схема нанесения покрытий: 1 – технологическая камера; 2 – шлюзовая камера; 3 – ЭЛ пушка; 4 – кассета; 5 – механизм подачи кассеты; 6 – механизм подачи слитка; 7 – тигель; 8 – смотровая система; 9 – заслонка; 10 – вакуумная система; 11 – площадка обслуживания; 12 – пульт управления  
 Технические характеристики представлены в таблице 2.

Таблица 2

Технические характеристики универсальной лабораторной электронно-лучевой установки Л-9

1. Установленная мощность, кВт	400
2. Ускоряющее напряжение, кВ	25
3. Размер испаряемых слитков, мм:	
-диаметр	70
-длина	500
4. Количество тиглей, шт.	4
5. Размеры кассеты с напыляемыми лопатами, мм:	
-диаметр	250
-длина	500
6. Грузоподъёмность штока подачи кассеты, кг	50
7.Количество и номинальная мощность электронных пушек – п х кВт	6x60
8. Степень вакуума в рабочей камере, Па	$6 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-2}$
9. Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч	15
10. Площадь, занимаемая установкой, м <sup>2</sup>	140

Установка представляет собой блок вакуумных камер с механизмами, устройствами и системами, обеспечивающими проведение технологического процесса нанесения покрытий в вакууме на различные изделия. К нижнему фланцу рабочей камеры пристыкован блок тиглей, в состав которых входят четыре механизма подачи испаряемых слитков. Загрузка слитков испаряемых материалов в механизмы производится сверху через тигли. Особенностью конструкции установки является ее оснащение новым источником питания со стабилизацией ускоряющего напряжения и электронно-лучевыми нагревателями с холодным катодом. Использование холодного катода из малолегированного сплава на основе алюминия исключает любые его искривления, что дает возможность получать стабильный электронный пучок в течение 250 часов работы установки без его замены. С другой стороны электронно-лучевые нагреватели с холодным катодом способны стабильно работать при вакууме 10 Па, тогда как электронно-лучевые нагреватели с горячим ленточным катодом работают в вакууме не ниже  $5 \cdot 10^{-2}$  Па.

Использование электронно-лучевых нагревателей с холодным катодом предусматривает напуск кислорода в паровое облако из диоксида циркония и обеспечивает получение стехиометрического состава внешнего слоя теплозащитного покрытия.

Четыре электронно-лучевых пушки с холодным катодом служат для испарения исходных материалов из тиглей и установлены таким образом, что каждая электронная пушка, предназначенная для испарения слитка из соответствующего тигля может использоваться также для испарения материала из соседнего тигля. Такая необходимость может возникнуть при изменении расположения или количества тиглей по требованиям технологического процесса.

Две синхронно работающих заслонки предназначены для экранирования изделий во время разогрева испаряемых материалов и изделий до стабилизации технологического режима. Для нагрева изделий служат две такие же электронные пушки, установленные сверху технологической камеры.

Две шлюзовые камеры предназначены для перезагрузки покрываемых изделий. Разобщение объемов рабочей и шлюзовой камер производится двумя вакуумными затворами.

В шлюзовых камерах предусмотрены устройства ионной очистки изделий перед нанесением покрытий. Наличие двух вспомогательных камер увеличивает производительность установки. Нанесение покрытий на изделия, подаваемые поочередно из шлюзовых камер происходит без развакуумирования рабочей камеры, в которой происходят осаждения покрытий.

Механизм горизонтальной подачи служит для перемещения изделий из шлюзовых камер в камеру напыления и обратно, а так же для вращения изделий. Штоки снабжены ротоконами-устройствами для снятия сигналов, поступающих с термопар, закрепленных на кассете с лопатками.

В конструкции установки использованы источники отдельно для каждой электронной пушки с ускоряющим напряжением 30кВ.

Система управления установкой осуществляет:

- контроль технического состояния всех систем установки;
- автоматическую подготовку установки к выполнению технологического процесса;
- управление с пульта оператора узлами установки при проведении процесса;
- сбор обработку, отображение в реальном масштабе времени, хранение технологических параметров и циклограммы процесса.

В настоящее время разработана конструкторская документация на принципиально новое промышленное электронно-лучевое оборудование для осаждения защитных покрытий.

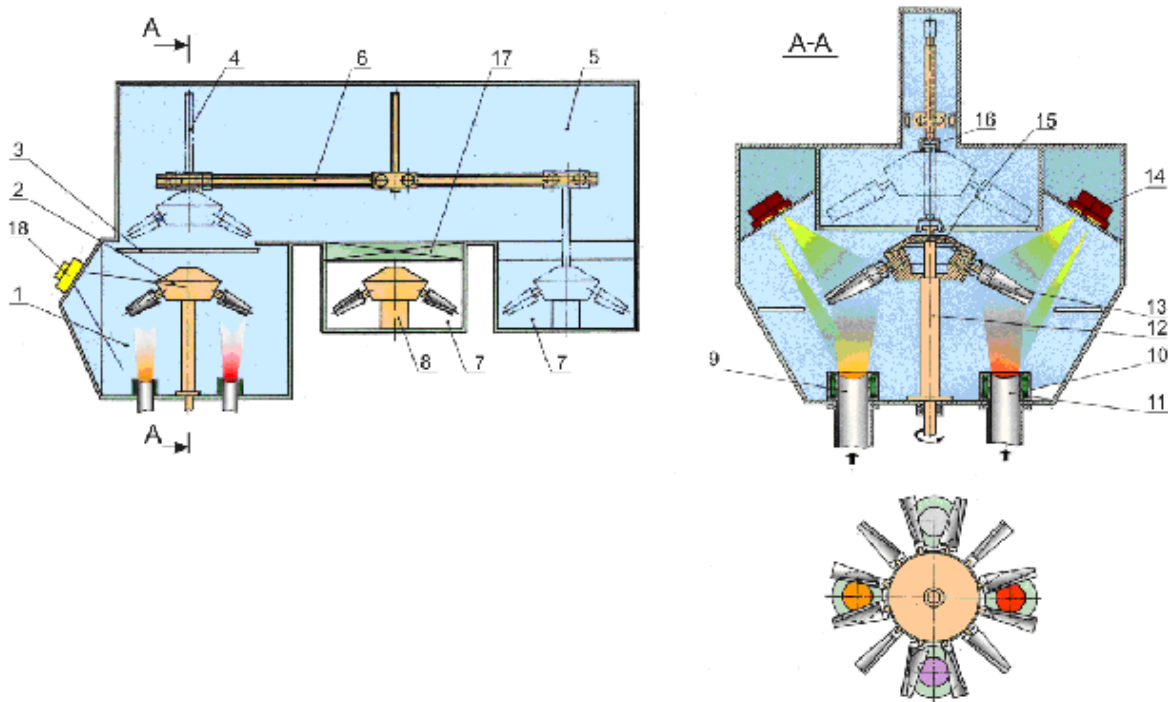


Рис. 5. Общий вид установки и схема нанесения покрытий: 1 – рабочая камера; 2 – планетарный механизм вращения изделия (лопаток); 3 – заслонка; 4 – манипулятор; 5 – переходная камера; 6 – рельсы; 7 – шлюзовые камеры; 8 – подставка; 9 – керамический слиток; 10 – металлический слиток; 11 – тигель; 12 – вращающаяся опора; 13 – изделие (лопатка); 14 – электронная пушка; 15 – приводная шестерня; 16 – захват; 17 – затвор

Установка (рис. 5) представляет собой блок, состоящий из четырех вакуумных камер, связанных между собой - соответственно технологической камеры 1, переходной камеры 5 и двух шлюзовых камер 3. Внутри технологической камеры 1 установлены водоохлаждаемые тигли 11, в которых размещают слитки 9,10 испаряемых материалов. Лучи электронных пушек 14 испаряют материал слитков, который в виде пара конденсируется на изделиях 13. Количество используемых тиглей может изменяться в зависимости от необходимого состава и конструкции (двух-трех-слойное, микрослойное) покрытие.

На данной установке возможно осаждение всех типов защитных покрытий, в том числе новых типов силицидных покрытий микрослойного типа.

Необходимо отметить, что на предприятии реализован замкнутый цикл осаждения покрытий на лопатки турбин включающий выплавку всех типов слитков на никелевой, кобальтовой и железной основах в соответствии с ТУ У 27.4-20113410-002-2001, использование слитков керамики ТУ У 13.2-20113410-004-2003.

Освоено также производство порошков Ni(Co) CrAlYSi фракцией 40-100 мкм для плазменного нанесения покрытий.