



УДК 669.187.2:537.533.001.4

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПАРЕНИЯ И ОСАЖДЕНИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

Б. А. Мовчан, К. Ю. Яковчук

Представлены технические характеристики и конструктивные особенности электронно-лучевых установок, разработанных в Международном центре электронно-лучевых технологий Института электросварки им. Е. О. Патона и предназначенных для получения материалов и покрытий путем электронно-лучевого испарения и последующей конденсации в вакууме. Рассмотрены пути дальнейшего развития и совершенствования электронно-лучевого оборудования, связанные с внедрением новых технологических процессов в машиностроении.

Technical characteristics and design features of electron beam installations, designed at the International Center of electron beam technologies of the E.O.Paton Electric Welding Institute and used for producing materials and coatings by electron beam evaporation and subsequent condensation in vacuum, are presented. The ways for further development and improvement of electron beam equipment, connected with implementation of new technological processes in machine-building, are considered.

Ключевые слова: электронно-лучевое испарение и осаждение (EB-PVD); неорганические материалы; электронно-лучевые установки; покрытия; лопатки турбин

Исследование и разработка оборудования для получения материалов и покрытий методом электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме (EB-PVD в англоязычной терминологии) обусловлены насущными требованиями современного научно-технического прогресса и большими возможностями этой технологии [1–3].

Процессы испарения (атомизации) веществ и последующей конденсации паровой фазы составляют уникальный технологический комплекс, позволяющий создавать новые материалы и покрытия. Находясь в паровой фазе, вещества «не знают» законов растворимости. Поэтому, путем испарения одновременно нескольких веществ, смешивания их паровых потоков и последующей конденсации на подложке, можно достичь таких сочетаний и соотношений компонентов, создать такие структуры, которые очень трудно или невозможно получить другими методами. Технологии подобного уровня прецизионности принято классифицировать как нанотехнологии.

В середине 60-х годов прошлого столетия на базе мощных электронно-лучевых пушек были разработаны технические средства для высокоскоростного

испарения веществ в вакууме и начаты систематические исследования структуры и свойств массивных конденсатов толщиной 1... 2 мм [4]. Накопленные к настоящему времени экспериментальные данные подтверждают возможность получать из паровой фазы новые неорганические материалы и покрытия с заданными составом и структурой: аморфные и нанокристаллические материалы с неравновесной структурой, включая алмазоподобные фазы на основе углерода; дисперсно-упрочненные, микрослойные и микропористые материалы на основе металлов, сплавов и керамики. Возможен также синтез на поверхности конденсации интерметаллидов, тугоплавких соединений и многофазных систем на их основе. Разработаны функционально-градиентные материалы и покрытия.

В период 1970–1991 гг. ИЭС им. Е. О. Патона являлся ведущей и, по сути, единственной организацией в СССР, которая занималась исследованиями в области электронно-лучевых технологий, а также конструированием и производством соответствующего оборудования. В этот период были разработаны лабораторные и опытно-промышленные установки для получения материалов и покрытий [5–7], узкоспециализированные установки для осаждения различных покрытий, например на металлическую ленту и проволоку [8, 9] или на лопатки газовых турбин [10, 11].



Особенностями этих установок являлись применение 4–6 плосколучевых пушек мощностью 60 кВт каждая с ускоряющим напряжением порядка 18... 22 кВ и одним высоковольтным источником питания для всех пушек, а также прямой электронно-лучевой нагрев поверхности конденсации (деталей). В 1980–1990 гг. 15 специализированных промышленных установок типа УЭ-175 и УЭ-187 [10, 11] для нанесения покрытий на лопатки газовых турбин работали на предприятиях Минавиапрома, Минсудпрома и Мингазпрома СССР. Многие из них продолжают успешно эксплуатироваться и в настоящее время.

Развитие электронно-лучевых установок в Европе и США шло по пути создания крупных узкоспециализированных высокопроизводительных установок для осаждения покрытий в основном на лопатки газовых турбин [12–14]. Особенности этих установок являются использование аксиальных электронно-лучевых пушек мощностью до 100... 250 кВт с ускоряющим напряжением до 40 кВ, а также преимущественно радиационный нагрев деталей.

Международный центр электронно-лучевых технологий (МЦ ЭЛТ) ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, начавший свою деятельность в 1994 г., разработал и производит в настоящее время три типа новых установок, относящихся ко второму поколению: лабораторные установки УЭ-205, опытно-промышленные УЭ-204, промышленные УЭ-207П.

Создание подобных установок направлено на обеспечение дальнейшего развития электронно-лучевой технологии осаждения из паровой фазы новых материалов и покрытий, начиная от лабораторных исследований и завершая промышленным производством.

К главным особенностям новых установок следует отнести:

модульный принцип исполнения элементов установки и гибкость в ее переналадке с одного технологического процесса на другой. Для этого основная камера выполнена в виде водоохлаждаемого каркаса с пристыкованными съемными стенками, камерами пушек, загрузочными камерами и т. п;

усовершенствованный вариант электронно-лучевых пушек с двухступенчатой сис-

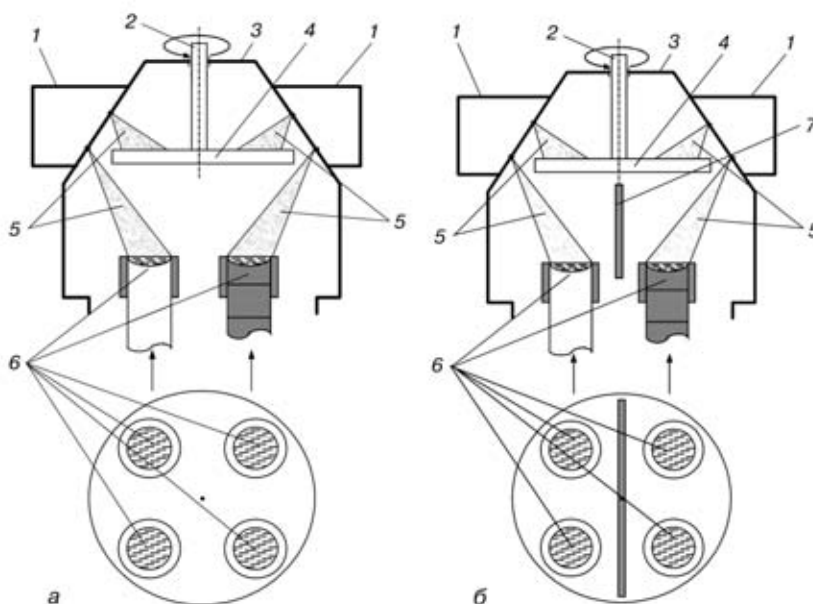


Рис. 1. Основные технологические схемы испарения и конденсации: *а* — из четырех независимых источников со смешанными паровыми потоками; *б* — с экраном для разделения паровых потоков; 1 — камера пушек; 2 — вертикальный вал вращения подложки; 3 — вакуумная камера; 4 — подложка; 5 — электронные лучи для нагрева и испарения; 6 — испаряемые материалы в виде слитков или прессованных штабиков; 7 — разделительный экран

темой дифференциальной высоковакуумной откачки, позволяющий осуществлять процесс испарения с введением реактивных газов в рабочую камеру;

повышенная частота (до 400 Гц) сканирования электронного луча, позволяющая плавно регулировать нагрев и испарение веществ;

устройство для ионизации парового потока и подачи смещения на подложку;

компьютеризированная система управления установкой, обеспечивающая сбор и хранение информации, управление лучами пушек, управление вакуумным оборудованием, в том числе в автоматическом режиме;

многотигельные испарители карусельного типа для испарения композиционных керамических

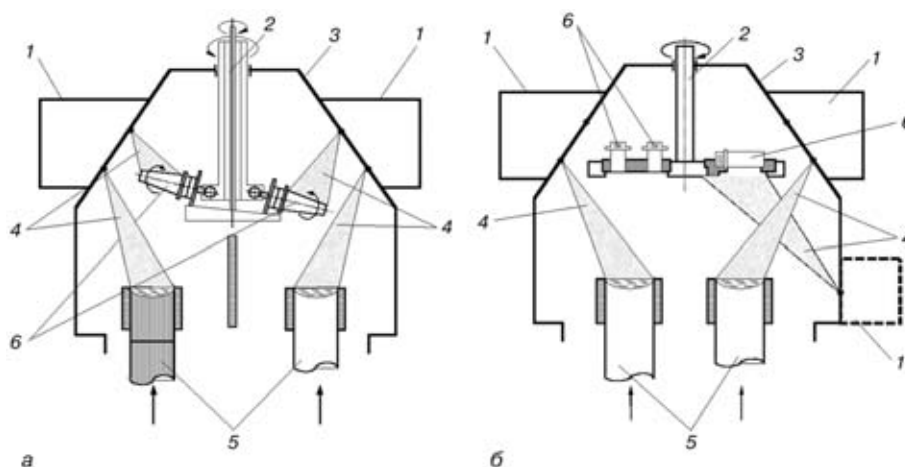


Рис. 2. Технологические схемы испарения и конденсации: *а* — осаждение защитных и конструкционных покрытий на лопатки; *б* — осаждение жаропрочных сплавов при ремонте лопаток; 1 — камера пушек; 2 — вертикальный вал вращения подложки; 3 — вакуумная камера; 4 — электронные лучи для нагрева и испарения; 5 — испаряемые материалы в виде слитков или прессованных штабиков; 6 — подложка

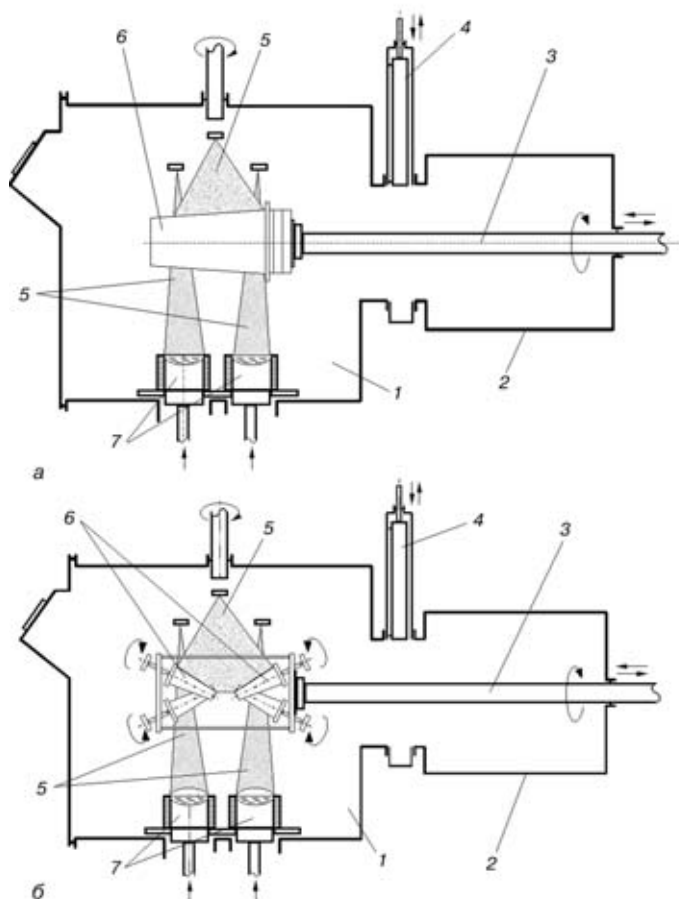


Рис. 3. Технологические схемы осаждения защитных покрытий: *a* — на крупногабаритные лопатки турбин; *b* — на лопатки авиационных газотурбинных двигателей; 1 — основная камера; 2 — загрузочная камера; 3 — горизонтальный вал; 4 — вакуумный затвор; 5 — электронные лучи для нагрева и испарения; 6 — лопатки; 7 — испаряемые слитки

слитков при одностадийном технологическом процессе осаждения градиентных покрытий.

Лабораторная установка УЭ-205 и опытно-промышленная установка УЭ-204 предназначены для осуществления всех известных технологических вариантов электронно-лучевого испарения и последующего осаждения паровой фазы на подложке заданной конфигурации. Регулируя с помощью тех-

нологических параметров осаждения сцепление конденсатов с подложкой, можно достичь хорошего физического контакта (адгезии) на границе или, наоборот, создать условия для отделения полученного материала от подложки. Конденсируемые материалы можно получать в виде: относительно тонких (10... 150 мкм) покрытий на готовых изделиях; толстых (1... 2 мм) конструктивных покрытий, выполняющих функцию несущего элемента конструкций; фольги, ленты, листа и даже отдельных массивных заготовок толщиной до 20 мм для последующей термопластической обработки.

Скорость конденсации паровой фазы на стационарной подложке можно регулировать в широких пределах, например 1... 15 мкм/мин для керамических материалов и 10... 50 мкм/мин для металлических материалов.

Установки УЭ-205 и УЭ-204 отличаются количеством и мощностью испарителей, размерами рабочей и загрузочной камер, камер пушек и др., но имеют подобные конструктивные формы и одинаковые функциональные возможности. На рис. 1–3 показаны основные технологические схемы испарения и конденсации, реализуемые в этих установках.

На рис. 1 представлены схемы испарения из четырех независимых источников и последующей конденсации парового потока на горизонтально расположенной дисковой подложке, вращающейся относительно оси вертикального вала. Схема на рис. 1, *a* соответствует технологическому процессу одновременного испарения и последующей конденсации смешанного парового потока. Например, осаждение никелевых многокомпонентных сплавов путем одновременного раздельного испарения с заданной скоростью нескольких слитков чистых металлов или сплавов, компоненты которых имеют близкие значения давления пара при температуре испарения: Ni–Co–Cr–Al, W–Re–Ta, Mo–Nb–Hf [1].

Подобным образом могут быть получены также многокомпонентные композиционные металлокерамические и керамические конденсаты практически любого химического состава. Температура подложки и скорость испарения (конденсации) — основные технологические параметры, позволяющие в широких пределах варьировать структуру конденсатов при заданном химическом составе.

Технологическая схема на рис. 1, *b* отличается от предыдущей наличием в рабочей камере экрана, разделяющего испарители на две группы.

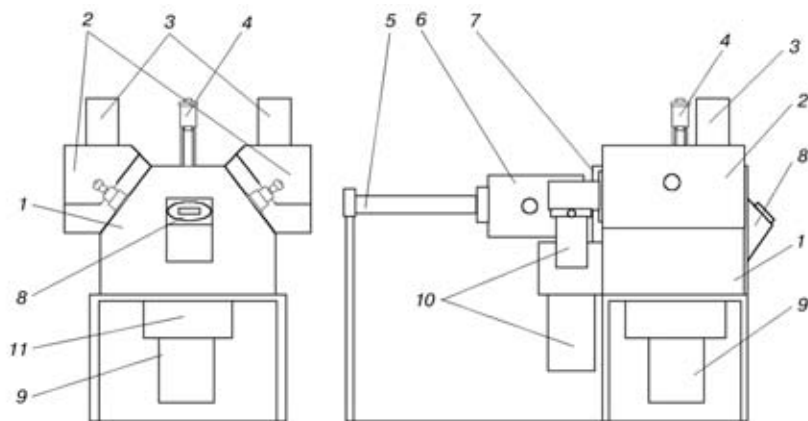


Рис. 4. Блок-схема электронно-лучевых установок типа УЭ-205 и УЭ-204: 1 — основная камера; 2 — камеры пушек; 3 — турбонасосы; 4 — вертикальный вал; 5 — горизонтальный вал; 6 — загрузочная камера; 7 — вакуумный затвор; 8 — смотровая система; 9 — механизмы перемещения; 10 — диффузионные насосы; 11 — камера слитков

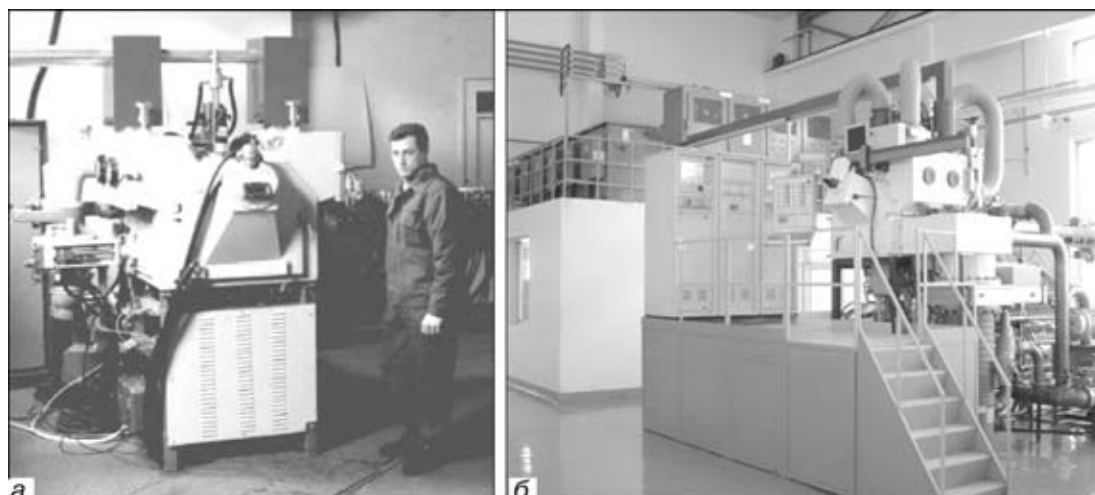


Рис. 5. Общий вид электронно-лучевых установок: а — УЭ-205; б — УЭ-204

В этих условиях поверхность подложки в виде вращающегося диска будет поочередно находиться в зонах парового потока, создаваемого различными испарителями. В результате образуется слоистая структура конденсата. Скорость испарения исходных веществ и скорость вращения диска позволяют достаточно свободно регулировать толщины чередующихся микрослоев, а сочетания выбранных исходных испаряемых веществ — заданную структуру и свой-ства конденсатов.

Рассмотренные технологические схемы с применением вертикального вала для вращения подложки можно усложнить и адаптировать для осаждения покрытий на конкретные изделия, например, лопатки газовых турбин.

На рис. 2, а и б показаны схемы осаждения защитных и конструкционных покрытий на рабочую поверхность лопаток и конструкционных покрытий, по химическому составу аналогичных составу жаропрочного сплава, на торцы и стенки при ремонте лопаток. Как видно, простая дисковая подложка в этих схемах заменена на более сложные конструкции для крепления и вращения лопаток. Технологическая схема на рис. 2, б предусматривает также применение дополнительной камеры (показана пунктиром) для размещения пушек и обеспечения нагрева лопаток снизу. Возможны и другие варианты крепления деталей с использованием вертикального вала.

Установки УЭ-205 и УЭ-204 имеют загрузочную камеру, пристыкованную к задней стенке рабочей камеры, с горизонтальным валом для крепления и передачи движения подложкам (деталям).

Технологические схемы осаждения защитных покрытий на лопатки больших и малых размеров показаны на рис. 3. Горизонтальный вал рационально применять при осаждении покрытий на поверхность изделий, которые должны вращаться относительно собственной горизонтальной оси в паровом потоке осаждаемого материала.

Блок-схема установок УЭ-205 и УЭ-204 и их общий вид представлены на рис. 4 и 5. Основные технические характеристики этих установок, разработанных и производимых в МЦ ЭЛТ, следующие:

	УЭ-205	УЭ-204	УЭ-207П
Размеры главной рабочей камеры, мм:			
длина	770	1000	1000
ширина	654	1000	980
высота	610	800	640
Количество электронно-лучевых пушек, шт.	4	6	4
Характеристики электронно-лучевых пушек:			
мощность, кВт	40	60	60
ускоряющее напряжение, кВ	20	20	20
анодный ток, А	2	3	3
Мощность высоковольтного источника питания, кВ·А	160	300	250
Размеры загрузочной камеры, мм:			
длина	450	700	800
ширина	300	410	500
высота	300	480	500
Диаметр отверстия затвора, разделяющего основную и загрузочную камеры, мм	178	300	300
Количество испарителей, шт.:			
традиционных	4	5	2
или карусельного типа	1	2	2
Диаметр испаряемых слитков, мм	50	70	70
Максимальная длина испаряемых слитков, мм	200	300	300
Максимальный размер подложки, на которую осаждаются покрытия, мм:			
плоская прямоугольная	200×140	400×280	500×280
плоская круглая, диаметр	380	480	—
Максимальный диаметр изделий, помещаемых в загрузочную камеру, мм	140	280	280

Промышленная установка УЭ-207П предназначена в первую очередь для осаждения всех вариантов защитных покрытий на детали турбин: жаростойких, коррозионно- и эрозионностойких, термобарьерных, демпфирующих и др.

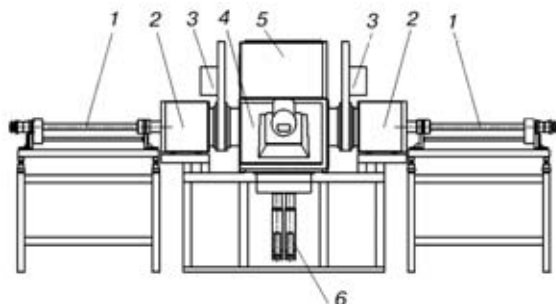


Рис. 6. Блок-схема электронно-лучевой установки УЭ-207П: 1 — механизм перемещения и вращения изделий; 2 — загрузочная камера; 3 — вакуумный затвор; 4 — главная камера; 5 — камера пушек; 6 — механизм подачи слитков

На рис. 6 показана блок-схема установки, имеющей традиционную конструкцию: прямоугольную рабочую камеру, одну или две загрузочные камеры с горизонтальными валами для крепления деталей и передачи движения. В загрузочных камерах предусмотрена возможность ионной очистки поверхности деталей и их подогрев перед перемещением в рабочую камеру. Четыре электронно-лучевые пушки мощностью 60 кВт каждая, расположенные в камере пушек, предназначены для подогрева деталей и испарения материала покрытий. Основные характеристики установки УЭ-207П приведены выше.

Установка УЭ-207П так же, как и ранее рассмотренные установки УЭ-205 и УЭ-204, в зависимости от конкретных требований может быть усовершенствована традиционными испарителями (водоохлаждаемым тиглем с вертикальным штоком для перемещения испаряемого слитка) и/или новыми испарителями карусельного типа для испарения композиционных слитков.

Как было показано ранее [2, 3], испарение композиционных слитков позволяет за один технологический цикл осаждать многослойные градиентные покрытия, состоящие из связующих и внешних рабочих слоев, например, градиентное термобарьерное покрытие на лопатках газовых турбин, состоящее из связующего слоя интерметаллида NiAl, внешнего керамического слоя $ZrO_2(7\% Y_2O_3)$ и двух переходных слоев подложка/связующий слой и связующий слой/керамика [3]. Подобные термобарьерные покрытия более экономичны по сравнению с покрытиями, полученными с помощью традиционных многостадийных технологий, имеют высокую степень повторяемости состава, структуры и свойств, повышенную надежность и долговечность.

На рис. 7 показан общий вид блока испарителей, состоящий из традиционного испарителя и 5-позиционного испарителя карусельного типа. Подобный блок испарителей предназначен в первую очередь для нанесения градиентных термобарьерных покрытий по одностадийной технологии путем испарения композиционных керамических слитков из многотигельного испарителя карусельного типа. В случае необходимости нанесения жаростойкого связующего слоя типа $MCrAlY$ используется металлический слиток соответствующего химического состава, помещаемый в традиционный испаритель. Осаждение переходных зон и внешнего керамического слоя термобарьерного покрытия производится путем нагрева и последующего полного испарения одного композиционного керамического слитка.

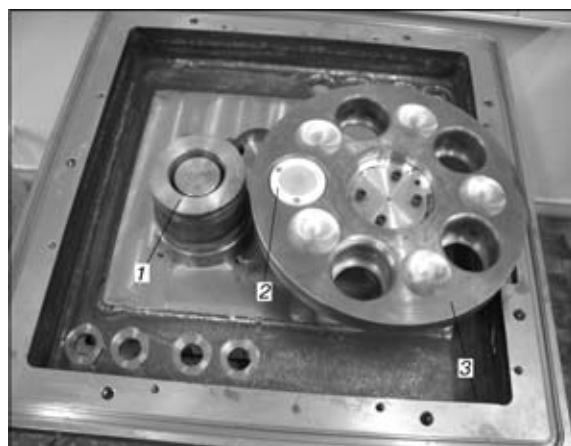


Рис. 7. Общий вид блока испарителей: 1 — традиционный испаритель диаметром 70 мм; 2 — композиционный керамический слиток для осаждения градиентных термобарьерных покрытий; 3 — 5-позиционный испаритель карусельного типа

Проворотом карусели на фиксированный угол обеспечивается перемещение следующего композиционного керамического слитка для его испарения и нанесения покрытия на следующую партию деталей (лопаток). Имеющиеся на поверхности карусельного испарителя пять водоохлаждаемых лунок диаметром 50 мм обеспечивают возможность испарения различных добавок, например, с целью создания барьерного слоя на подложке или для регулирования пористости осаждаемого покрытия.

Система управления рассмотренными установками ориентирована на прецизионный контроль и регулирование основных элементов технологического процесса: например, скорости подачи материалов в зону испарения, температуры подложки, формы развертки и стабильности параметров электронного луча. Следует также подчеркнуть достоинства высоковольтного источника питания фирмы «Neeltran» (США), благодаря которому достигнута надежная стабилизация токов лучей пушек.

Система управления позволяет: управлять вакуумной системой в ручном и автоматическом режимах с использованием персонального компьютера с отображением текущей информации на мониторе; управлять механизмами перемещения/вращения валов и испаряемых материалов (металлических и керамических слитков); управлять технологическим процессом нанесения покрытий (установкой и регулировкой параметров напыления); накапливать, отображать и сохранять технологические параметры в цифровой и графической формах в режиме реального времени (измеряемую температуру нагрева деталей, используемые развертки лучей, токи электронно-лучевых пушек, ускоряющее напряжение, уровни вакуума в камерах, величины перемещений и скорости вращения валов, величины остатков и расходов слитков в каждом из механизмов подачи, температуру охлаждающей воды в тиглях) при помощи персонального компьютера.

Система управления автоматически переводит установку в безопасное состояние при возникновении нештатных ситуаций, имеет звуковую и световую сигнализацию при аварийной ситуации, а также набор блокировок, гарантирующих безопасность при некорректных действиях оператора. Ис-



пользование подобных систем управления обеспечивает воспроизводимость технологических процессов и значительно упрощает работу операторов.

В заключение следует отметить, что применительно к указанным трем типам установок разработаны или адаптированы известные методы и устройства для химической и ионной очистки поверхности деталей или образцов перед осаждением покрытий в рабочей камере, ввода реактивных газов в рабочую камеру, ионизации паровой фазы и подачи смещения на поверхность конденсации.

Установки УЭ-204, УЭ-205 и УЭ-207П производит Международный центр электронно-лучевых технологий Института электросварки им. Е. О. Патона, используя широкую кооперацию с американскими и европейскими компаниями-поставщиками комплектующих частей: форвакуумных и вакуумных насосов, высоковольтных источников питания, вакуумных затворов, измерительных устройств и др.

1. *Movchan B. A.* EB-PVD technology in gas turbine industry: present and future // *J. of Metals*. — 1996. — N 11. — P. 40–45.
2. *Movchan B. A.* Functionally graded EB-PVD coatings // *Surface and Coat. Technol.* — 2002. — V. 149. — P. 252–262.
3. *Яковчук К. Ю., Рудой Ю. Э.* Одностадийная электронно-лучевая технология осаждения термобарьерных градиентных покрытий // Современная электрометаллургия. — 2003. — № 2. — С. 10–16.
4. *Bunshah R. F.* Vacuum evaporation — history, recent developments and applications // *Zeitschrift für Metallkunde*. — 1984. — 75. — N 11. — S. 840–846.
5. *Электронно-лучевая установка для получения порошков чистых металлов и сплавов методом испарения и конденсации в вакууме* // Б. А. Мовчан, А. А. Чевычелов, Р. С. Мисюра, Е. В. Дабижа // Специальная электрометаллургия. — 1983. — Вып. 51. — С. 62–65.
6. *Бадиленко Г. Ф., Чуйков Ю. Б., Мовчан Б. А.* Электронно-лучевая установка для получения конденсатов на основе улерода // Там же. — 1990. — Вып. 69. — С. 55–59.
7. *Пан П. А., Малашенко И. С., Иванов А. М.* Лабораторная установка для получения защитных покрытий различного назначения электронно-лучевой конденсацией в вакууме // Там же. — 1975. — Вып. 27. — С. 98–104.
8. *Электронно-лучевая установка УЭ-202 для нанесения покрытий на проволоку и ленту* // Б. Е. Патон, В. И. Ульянов, Б. А. Мовчан и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1992. — № 3. — С. 38–44.
9. *Электронно-лучевая установка для нанесения покрытий на металлическую ленту* // Г. Ф. Бадиленко, А. В. Демчишин, А. Е. Кушниренко и др. // Там же. — 1987. — № 2. — С. 44–47.
10. *Промышленная электронно-лучевая установка УЭ-175М для нанесения защитных покрытий на лопатки газовых турбин* // А. И. Четверо, В. В. Щербичский, Б. А. Мовчан и др. // Специальная электрометаллургия. — 1982. — Вып. 50. — С. 53–61.
11. *Мовчан Б. А., Малашенко И. С.* Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. — Киев: Наук. думка, 1983. — 232 с.
12. *Reinhold E., Botzler P., Deus C.* EB-PVD process management for highly productive zirconia thermal barrier coating of turbine blades // *Surface and Coating Technology*. — 1999. — V. 120–121. — P. 77–83.
13. *Aichert H., Hoffmann O., Stark F., Stephan H.* Заявка 2821131, ICI C23 C13/03 Vakuumbeschichtungsanlage mit einer Kondensat-Auffangeinrichtung. — Оpubл. 15.11.79.
14. *Feuerstein A., Dietrich W., Lammernann H.* Advanced PVD overlay coatings equipment for aircraft gas turbine applications // *Tokyo International Gas Turbine Congress 1987, October 26 to 31*. — P. 271–278.

Международный центр электронно-лучевых технологий

Ин-та электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 23.12.2003

XII Международная научная конференция «Современные проблемы электрометаллургии стали»

5–7 октября 2004 г.

Российская Федерация, г. Челябинск



ОРГАНИЗАТОРЫ

Министерство образования Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
при поддержке администрации Челябинской области,
ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат»,
ОАО «Мечел», ЗАО «ПТК «Ферросплав», ЗАО «НСММЗ»

ТЕМАТИКА

- Физико-химические основы производства стали и сплавов (включая ферросплавы)
- Технология выплавки стали и сплавов (в т. ч. ферросплавов) в электропечах
- Внепечная обработка стали и сплавов
- Специальная электрометаллургия (выплавка стали и сплавов в вакуумных индукционных и плазменных печах, электрошлаковый, электронно-лучевой, вакуумно-дуговой и плазменно-дуговой переплавы)
- Конструкция и работа электропечей и агрегатов внепечной обработки расплавов

По вопросам участия обращаться в Оргкомитет конференции:

Южно-Уральский государственный университет, кафедра пиromеталлургических процессов
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76

Тел.: (3512) 67-92-92, факс: (3512) 67-91-61

E-mail: steel@met/susu/ac/ru, www: <http://193.233.8.1.21/confer2004>, <http://www.susu.ac.ru/>