

**В.А. Батурин, А.Ю. Карпенко, Г.В. Кирик, В.И. Мирошниченко,
А.Г. Нагорный, С.А. Еремін, С.А. Пустовойтов, В.А. Нагорный**

Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы

УСТАНОВКА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ АТОМНО-ИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ



Разработана экспериментальная электронно-лучевая установка для нанесения противозерозионных и противокоррозионных покрытий на лопатки паровых турбин тепловых и атомных электростанций. Защитные покрытия наносятся методом атомно-ионного распыления с высокочастотной ионизацией паровой фазы. Проведены исследования свойств покрытий, в том числе и ядерно-физическими методами.

Ключевые слова: вакуумная камера, электронная пушка, атомно-ионное распыление, ВЧ-ионизация, защитные покрытия.

Требования, предъявляемые к современным высокотехнологическим материалам, обуславливают необходимость создания на их поверхности слоев с особыми характеристиками. Одним из широко применяемых методов для изменения поверхностных свойств является напыление покрытий с управляемым составом и структурой. Использование электронно-лучевого испарения материалов позволяет получать большие удельные мощности и дает возможность испарять различные вещества, в том числе и тугоплавкие металлы, с большой скоростью. Получаемая при этом высокая плотность пара даёт возможность возбуждать разряды различного типа и ионизировать испаренное вещество без дополнительного введения плазмообразующего газа, а также реализовывать высокие скорости нанесения покрытия. Формирование покрытий в высоком вакууме существенно улучшает их качество. Кроме того,

такое преимущество электронно-лучевых установок, как получение пучков с большой удельной мощностью при сравнительно низких энергозатратах, позволяет использовать их для модификации приповерхностных слоев широкого спектра деталей и узлов различного назначения с целью улучшения их свойств. Проведение локальной обработки поверхности избавляет изделие от деформации, а кратковременный электронно-лучевой нагрев дает возможность закалывать поверхность, в том числе и из жидкого состояния. В последние годы активно развивается модификация поверхности комбинированными методами, когда нанесенное на детали покрытие модифицируют электронным пучком. При этом возможна рекристаллизация покрытия, изменение его пористости, улучшение однородности и адгезии, увеличение твердости и износостойкости.

Одной из проблем энергетики является увеличение ресурса работы паровых турбин тепловых и атомных электростанций. На сегодняшний день нет надежных технологий защиты рабочих лопаток турбин от эрозионного и

коррозионного разрушения. Известно, что эрозийный износ лопаток снижает экономичность, мощность и вибрационную надежность последних ступеней турбин. Потому задача создания экспериментальной установки для нанесения упрочняющих защитных покрытий на лопатки паровых турбин и разработка технологий получения таких покрытий весьма актуальна.

Среди новых технологий упрочнения лопаток паровых турбин перспективной является технология атомно-ионного распыления [1, 2].

В связи с вышеизложенным в Институте прикладной физики (ИПФ) НАН Украины в рамках научно-технического проекта была разработана экспериментальная установка для электронно-лучевого испарения рабочих веществ (в том числе и тугоплавких) с ВЧ-ионизацией паровой фазы. Оборудование предназначено для нанесения защитных покрытий на различные образцы с возможностью дальнейшей модификации полученных покрытий сканирующим электронным пучком. Установка позволяет наносить противозерозионные и противокоррозионные защитные покрытия на длинномерные лопатки паровых турбин.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

При создании установки использованы результаты физических исследований и научно-технических разработок ИПФ НАН Украины, а также передовые технологии ионно-плазменного нанесения защитных покрытий, разработанные в ННЦ ХФТИ [3].

Схематическое изображение вакуумной камеры электронно-лучевой установки для нанесения защитных покрытий показано на рис. 1. На рис. 2 показана её фотография.

Вакуумная камера и система откачки

Вакуумная система должна обеспечивать определенное давление в отдельных частях установки. Так, в электронной пушке в процессе работы необходимо поддерживать высокий вакуум на уровне 10^{-4} – 10^{-5} Па, в то время как ва-

куумные условия в физической камере изменяются в широких пределах, что обусловлено большим газовыделением в процессе нанесения покрытий и требует высоких скоростей откачки.

Физическая камера установки состоит из двух цилиндрических водоохлаждаемых частей диаметром 500 мм и длиной 800 мм. Для упрощения монтажно-демонтажных работ внутри камеры боковые фланцы выполнены откатными, а на раме предусмотрены специальные рельсы. Общая длина вакуумной камеры составляет 1600 мм, что позволяет наносить покрытие на образцы (в том числе и лопатки паровых турбин), длина которых достигает 1000 мм. На боковых фланцах основной камеры размещены токовводы, система напуска газа, смотровые окна и другие технологические устройства. Один из фланцев содержит часть элементов механизма крепления и перемещения образцов. На нижнем фланце физической камеры смонтировано устройство для испарения распыляемого материала (тигель-испаритель). Рабочий вакуум в камере обеспечивается двумя паромасляными насосами, каждый из которых имеет скорость откачки 2500 л/с, что позволяет работать в условиях сильного газовыделения в процессе нанесения покрытий. В качестве рабочей жидкости в насосах используется полифиниловый эфир 5Ф4Э, обладающий низким давлением насыщенных паров.

Электронно-лучевая пушка

В установке используется электронно-лучевая пушка ЭЛА-60Б (разработка ИЭС им. Патона). Она позволяет осуществлять плавную регулировку мощности электронного пучка с током от 1 мА до 1 А при ускоряющем напряжении 60 кВ. Высокое анодное напряжение в электронной пушке обуславливает необходимость поддержания соответствующих вакуумных условий для исключения электрических пробоев. Поэтому для автономной откачки электронной пушки применяется турбомолекулярный насос ТРУ-310 фирмы Balzers, со скоростью откачки ~300 л/с. Это позволяет подде-

рживать в электронной пушке вакуум на два порядка выше, чем в основной камере установки, что особенно важно в процессе нанесения покрытий.

Тигель-испаритель

Для реализации схемы атомно-ионного распыления с электронно-лучевым испарителем источник испаряемого вещества был изготовлен в форме стрежня, торец которого нагревается электронным пучком до температуры плавления. Испаряемый стержень располагается в охлаждаемом водой медном тигле. Подача материала в зону расплава происходит снизу вверх через отверстие в кожухе (рис. 3).

Стенки испаряемого стрежня охлаждаются при контакте с медью. Устройство охлаждения спроектировано таким образом, чтобы расплав рабочего вещества удерживался в его верхней части, формируя объем испаряемой жидкости. Интенсивное охлаждение медного кожуха предотвращает стекание расплава по стрежню. Через отверстие в нижней части тигля вводится шток, который может перемещать рабочий стержень по мере его испарения. Вся конструкция тигля-испарителя крепится на нижнем фланце установки. Механизм подачи образца управляется двигателем через вакуумное уплотнение во фланце. Изменение общей скорости вращения двигателя, а значит и скорости подачи рабочего вещества осуществляется контроллером двигателя.

Крепление образца

Механизм крепления образца для напыления, показанный на рис. 1, обеспечивает размещение образца в зоне испарения рабочего вещества и предусматривает возможность его продольного перемещения и вращения вокруг оси. В зависимости от вида напыляемого вещества возможно регулирование скорости перемещения и вращения. В конструкции механизма предусмотрена тепловая и электрическая развязка между закрепляемым образцом и самим механизмом.

Высокочастотный индуктор

С целью улучшения качества осаждаемых покрытий в установке предусмотрено выполнение таких функций, как нагрев напыляемого образца и ионизация паровой фазы. Для реали-

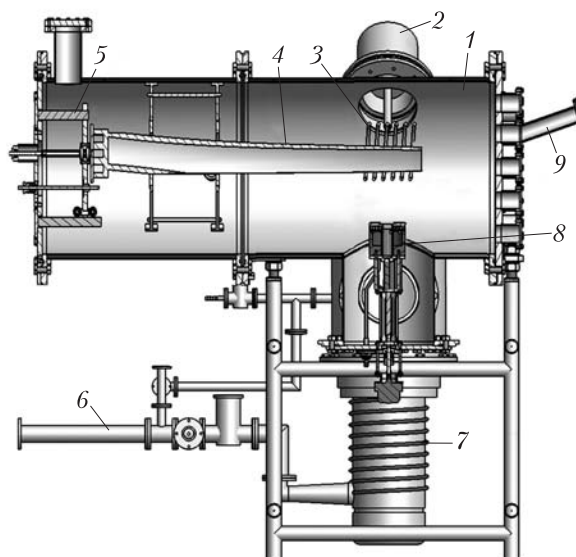


Рис. 1. Схематическое изображение продольного сечения вакуумной камеры установки: 1 – вакуумный объем; 2 – электронно-лучевая пушка; 3 – индуктор; 4 – упрочняющая деталь (лопатка паровой турбины); 5 – механизм крепления и подачи образца; 6 – вакуумная откачка; 7 – вакуумный насос; 8 – тигель; 9 – окно видеонаблюдения

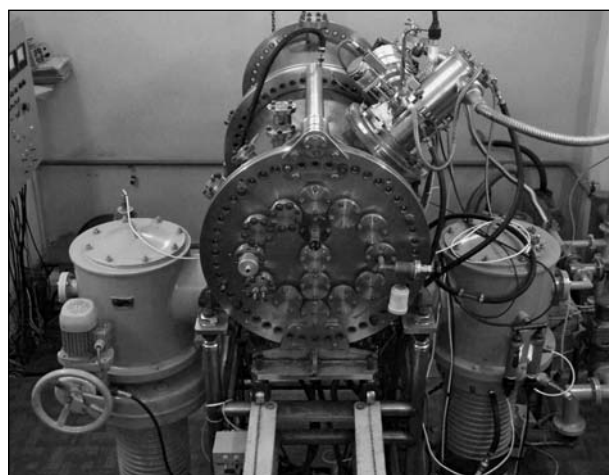


Рис. 2. Многофункциональная установка для получения защитных покрытий

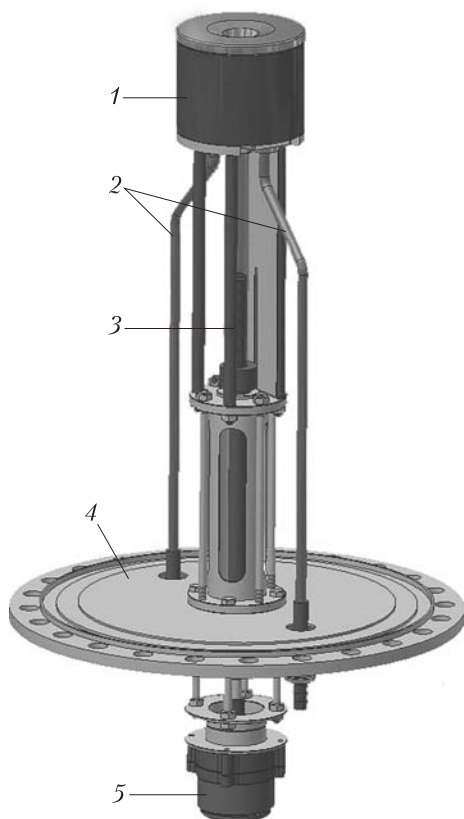


Рис. 3. Устройство для испарения образцов: 1 — испаритель; 2 — охлаждение; 3 — механизм подачи образца; 4 — фланец; 5 — двигатель

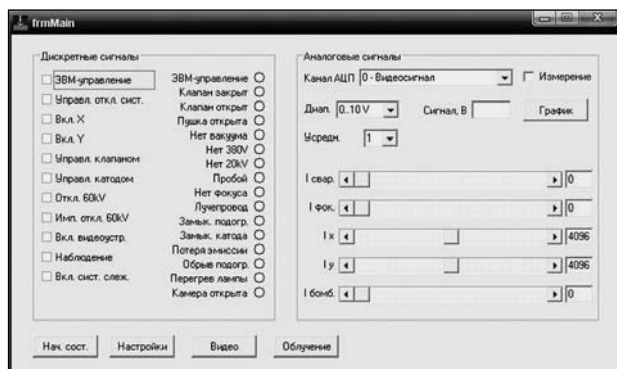


Рис. 4. Общий вид программы управления электронно-лучевой установкой

зации этих задач используется высокочастотный индуктор. Он размещен внутри вакуумной камеры таким образом, чтобы охватывать об-

ласть покрываемой части детали. Индуктор через устройство согласования подсоединяется к источнику высокочастотных колебаний, в качестве которого используется промышленная высокочастотная установка ВЧИ4-10В4 с частотой колебаний 440 кГц и выходной мощностью 10 кВт.

Автоматизированная система управления

Система автоматизации управления установкой состоит из аппаратной и программной частей. Аппаратная часть спроектирована на основе плат управления фирмы ICP DAS, устанавливаемых в ЭВМ, через которые осуществляется обмен информацией с электронно-лучевой установкой.

Программное обеспечение разработано в среде Delphi и занимает объем 600 Кбайт. На рис. 4 представлено рабочее окно программы.

Программа обладает следующими возможностями:

- ✦ подача дискретных управляющих команд (вкл./ выкл. ЭВМ-управления, системы сканирования электронного пучка, клапана электронной пушки, катода, системы наблюдения и т. п.);
- ✦ считывание состояния оборудования (состояние клапана электронной пушки, подогревателя, катода, вакуумной камеры и т. п.);
- ✦ подача аналоговых сигналов управления (установка тока электронного пучка, его фокусировка, отклонение по X и Y, ток бомбардировки катода);
- ✦ считывание аналоговых сигналов из оборудования (видеосигнал, ток электронного пучка, фокусировка, ток катушек сканирования электронного пучка, ток бомбардировки катода и т. п.) и вывод их на график зависимости от времени;
- ✦ сканирование поверхности образца электронным пучком в пределах всего доступного поля или заданного участка с целью получения изображения поверхности во вторичных электронах;

✦ облучение поверхности образца электронным пучком по заданной программе с целью оплавления и модификации поверхности образца.

На рис. 5 показано изображение поверхности облучаемого образца во вторичных электронах с разрешением 256×256 пикселей.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКРЫТИЙ

В ходе выполнения научно-технического проекта предусматривалось проведение исследований покрытий, нанесенных на установленные в турбину лопатки. С этой целью совместно с сотрудниками ННЦ ХФТИ были подготовлены модельные образцы, изготовленные из стали 12Х13 с защитными покрытиями, аналогичными тем, что наносились на лопатки турбин. Образцы в виде пластин заданного размера были покрыты методом атомно-ионного распыления с ВЧ-ионизацией паровой фазы. Реализовывались следующие схемы нанесения покрытий:

- ✦ атомно-ионное распыление хрома в присутствии углеродсодержащего газа;
- ✦ совместное атомно-ионное распыление ниобия и углерода.

В ходе исследования структурно-физических характеристик полученных покрытий изучались их физико-химическое состояние и твердость. Некоторые результаты, полученные в результате исследования, приведены в таблице.

Анализ рентгеноструктурных исследований металлсодержащих осажденных слоёв позволяет сделать вывод, что покрытия содержат сверхпересыщенный твёрдый раствор на ос-

Характеристики покрытий

№ образца	Микротвердость, кг/мм ²	Фаза
1	760	Cr
2	670	Cr, Cr ₃ C ₂
3	830	Nb ₂ C, Nb
4	1007	Nb ₂ C, Nb

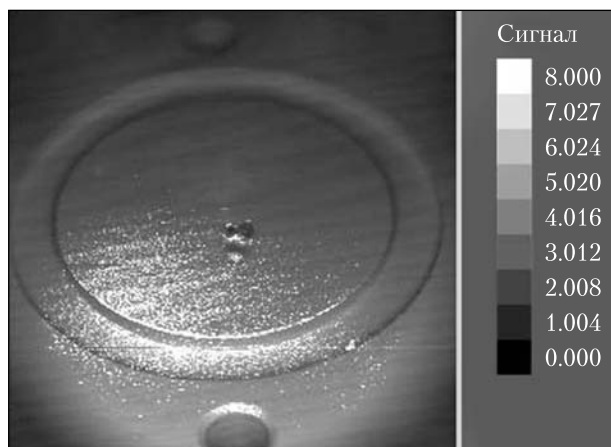


Рис. 5. Изображение поверхности образца во вторичных электронах

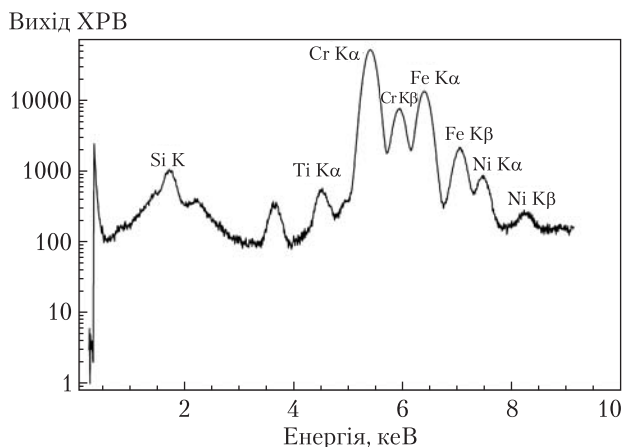


Рис. 6. Спектр ХРИ — покрытие Cr на стали 12Х13

нове металлов (Nb, Cr) с нанокристаллическими включениями их карбидных фаз. В хромсодержащих покрытиях возможно наличие аморфной фазы, что является следствием фрагментации молекул углеродсодержащего газа, в парах которого проводилось осаждение. Микротвердость покрытий не соответствовала литературным данным как для металлов, так и для их карбидов, что подтвердило вывод о суперпозиции состояний. Размытые рефлексы рентгенограмм указывали на преимущественно наноструктурное состояние покрытия с

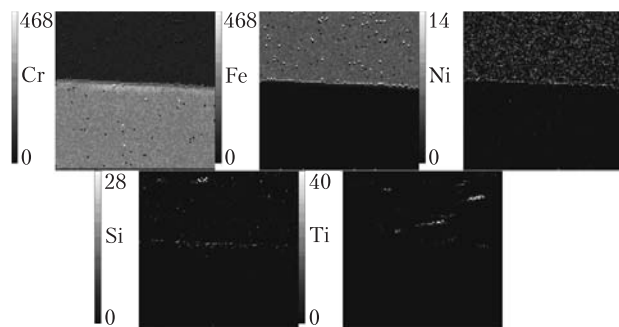


Рис. 7. Карта распределения элементов участка вблизи границы напыления — покрытие Cr на стали 12X13

большим количеством границ микрокристаллов, которое будет стойким к эрозионному каплеударному воздействию при эксплуатации этих покрытий внутри паровой турбины.

Проводились также исследования распределения элементного состава покрытий на модельных образцах с помощью ядерного сканирующего микронзонда ИПФ НАН Украины [4]. Параметры раstra — 100×100 пикселей, шаг сканирования — 3 мкм, размер раstra — 300×300 мкм, энергия протонного пучка — 1,4 МэВ. Набор спектров производился при фиксированном заряде в каждом пикселе. Исследования проводились методом μ -PIXE.

На рис. 6 показан спектр характеристического рентгеновского излучения образца Cr на стали 12X13. Карта распределения элементов на участке вблизи границы покрытия хромом модельных образцов из стали 12X13 показана на рис. 7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИПФ НАН Украины создана установка для нанесения защитных покрытий методом атомно-ионного распыления с высокочастотной ионизацией паровой фазы. Установка имеет компьютерное управление и позволяет проводить работы по нанесению защитных покрытий (в том числе и тугоплавких материалов) на длинномерные детали и механизмы, а также проводить локальную обработку материалов электронным пучком в широком интервале

плотности электронного пучка. Универсальность оборудования позволяет выполнять работы по нанесению противокоррозионных и противоэрозионных защитных покрытий на лопатки паровых турбин тепловых и атомных электростанций. Применение высокоэффективного защитного покрытия позволяет увеличить показатели надёжности и экономичности лопаток турбин.

Результаты проекта внедрены на ОАО «Полтавский турбомеханический завод» концерна «Укрросметалл».

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковальский А.Э., Картмазов Г.Н., Сулов Н.Н., Евич Н.Л. Новый способ активной защиты рабочих лопаток последних ступеней энергетических турбин от эрозионного износа // Пробл. машиностроения. — 2005. — Т. 8, № 2. — С. 6—18.
2. Ковальский А.Э., Картмазов Г.Н., Кунченко В.В. Обоснование толщины и условий нанесения вакуумного противоэрозионного покрытия для рабочих лопаток последних ступеней мощных паровых турбин // Авиационно-космическая техника и технология. — 2006. — № 6(32). — С. 5—18.
3. Белоус В.А., Картмазов Г.Н., Сафонов В.И. и др. Способ нанесения покрытий в вакууме. Патент Украины № 47545, 15.07.2002. Бюл. №7.
4. Storizhko V.E., Miroshnichenko V.I., Ponomarev A.G. et. al. / IAP Accelerator Based Microanalytical Facility for Material Science Studies // Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators, Vienna, 4—8 May 2009.

*В.А. Батурін, О.Ю. Карпенко,
Г.В. Кирик, В.І. Мірошніченко, А.Г. Нагорний,
С.О. Єрьомін, С.О. Пустовойтов, В.А. Нагорний*

УСТАНОВКА ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ МЕТОДОМ АТОМНО-ІОННОГО РОЗПИЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

Розроблена експериментальна установка для нанесення протиерозійних та протикорозійних покриттів на лопатки парових турбін теплових та атомних електростанцій. Захисні покриття наносяться методом атомно-іонного розпилення з високочастотною іонізацією парової фази. Проведено дослідження властивостей нанесених покриттів з використанням ядерно-фізичних методів.

Ключові слова: вакуумна камера, електронна гармата, атомно-іонне розпилення, ВЧ-іонізація, захисні покриття.

V.A. Baturin, A.Yu. Karpenko, G.V. Kyryk,
V.I. Miroshnichenko, A.G. Nagornyj, S.A. Eremin,
S.A. Pustovoitov, V.A. Nagornyj

DEVICE FOR PRODUCING COATINGS BY MEANS OF ATOMIC-ION SPUTTERING METHOD

Experimental equipment for application of erosion and corrosion protective coatings on the blades of steam turbines

of thermal and nuclear power plants was designed. Protective coatings are applied by atomic-ion sputtering with the RF-ionization of the vapor phase. Investigations of coating properties including nuclear-physical methods were carried out.

Key words: vacuum chamber, electron gun, atomic-ion sputtering, RF ionization, protective coatings.

Стаття надійшла до редакції 21.04.11

СОЛНЕЧНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ В КРЫМУ

В августе 2011 года в Крыму открыли солнечную электростанцию. Она построена в рамках проекта снижения зависимости Украины от импортных энергоносителей. Солнечная электростанция в Крыму — это часть национальной программы, согласно которой уже к 2015 году Украина планирует сократить импорт энергоресурсов на 30 %.



Проект реализовала австрийская компания Activ Solar GmbH. «Проект такого масштаба знаменует собой поворотный момент в развитии солнечной энергетики в Европе и должен подтвердить позицию Украины как поставщика энергии из возобновляемых источников», — заявил генеральный директор Activ Solar Каве Ертефай.



После завершения установки 80 МВт солнечная электростанция будет состоять из примерно 360 тыс. наземных модулей, расположенных на площади в 160 га, что равняется размеру примерно 207 футбольных полей. Станция будет производить 100 тыс. МВт/ч электроэнергии в год. Этого достаточно, чтобы обеспечить 20 тыс. домашних хозяйств «зеленой» энергией и позволит сократить до 80 тыс. тонн выбросов углекислого газа в год.

По материалам сайта www.researchclub.com.ua