

**Г.Н. Картмазов¹, Ю.В. Лукирский¹, Г.В. Кирик²,
В.Г. Маринин¹, Ю.И. Поляков¹, А.А. Дейнека³**

¹ Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков

² Концерн «Укрросметалл», Сумы

³ ОАО «Полтавский турбомеханический завод», Полтава

КОРРОЗИОННО-ЭРОЗИОННОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН



Исследованы и оценены возможности атомно-ионного осаждения металл-углеродных ионно-плазменных покрытий. Нанесены коррозионно-эрозионностойкие покрытия системы Cr–C микро- и нанокристаллической структуры на опытную партию рабочих лопаток. Лопатки с покрытиями переданы для натурных эксплуатационных испытаний в турбине К-200-130 ЛМЗ 24-й и 28-й ступеней. Разработанная технология экологически безопасна.

Ключевые слова: паровые турбины, лопатки, эрозия, наноструктурные покрытия, технология АИР.

Проблема эрозионной повреждаемости рабочих лопаток паровых турбин стала актуальной еще в начале 80-х годов прошлого столетия. Характер кривой динамики изобретательской активности (рис. 1) свидетельствует о неослабевающем интересе к проблеме защиты рабочих лопаток от эрозии и других видов износа.

Проведенный нами анализ статистики повреждаемости элементов проточной части паровых турбин в период 1960–2000 гг. показал, что наибольшего внимания требуют вопросы повышения надежности рабочих лопаток, эксплуатирующихся в зоне фазового перехода, а также способы усиления защиты рабочих лопаток последних ступеней, у которых эрозионный износ больше в связи со значительными окружными скоростями (до 700 м/с). Традиционное упрочнение лопаток из сталей 20Х13 и 15Х11МФ припайкой пластин из стеллита (кобальто-хром-вольфрамовые сплавы) на вход-

ную кромку или нанесением высокотвердых покрытий в воздушной атмосфере не эффективно, что подтверждается многими научными центрами, ведущими разработки в этой области техники. Припайка пластин не решает проблемы эрозионного износа и при этом значительно ухудшает аэродинамические свойства лопаточного аппарата и КПД турбины. Кроме того, это неприемлемо для титановых лопаток.

В современных условиях эксплуатации энергетического оборудования продление ресурса работы его элементов осуществляется через внедрение защитных покрытий, обладающих высокой эрозионной и коррозионной стойкостью. Ключевым вопросом эффективного практического применения антиэрозионных и других типов покрытий является обоснованный выбор материала покрытия и технологии его получения.

В ННЦ ХФТИ разработка способов защиты рабочих лопаток ЦНД паровых турбин проводится с 1979 г. с применением вакуумной ионно-плазменной технологии [1]. Покрытия, фор-

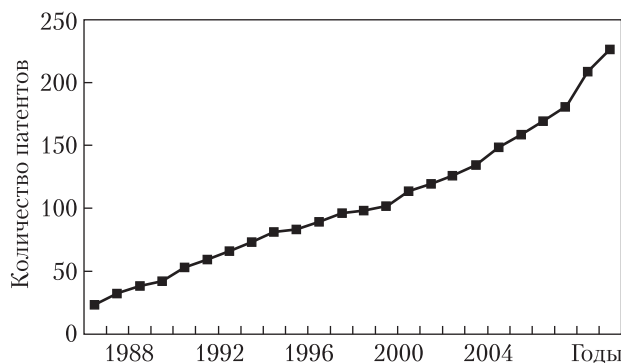


Рис. 1. Динаміка изобретательської активності розробок захисних покриттів на робочих лопатках парових турбін (по результатам патентних досліджень, виконаних в ННЦ ХФТИ)

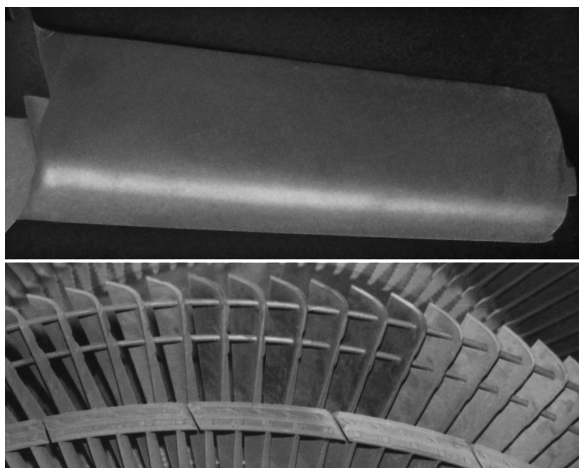


Рис. 2. Турбінні лопатки з корозійностійкими покриттями. Установлені на Новочеркаській ТЭС

мируємі при конденсації металічної плазми вакуумно-дугового розряду [2, 3] на установках типу «Булат», були нанесені на опытно-промислову партію робочих лопаток, в дальнєйшєм установленнєх в турбінах Новочеркаської і Змієвської ТЭС (рис. 2). Опыт їх експлуатації на протязєнні болєе 150 тєс. часов підтвердїл ефектївнєсть розробанного методу зашити поверхнєх лопаток от корозїоннїх поврєждєнїй [4].

В указаннїй перїод в ННЦ ХФТИ була розробтана технологїя нанесєннєя зашитнїх покриттїй атомно-їоннїм распыленїєм (АІР)

[5, 6], базїрующєяся на іспользованнїі высокоенєргетїческогo острєфокусногo електронногo луча для нагрєва і высокоскоростногo іспарєннєя в вакуумє металлов IV–VI грυпп перїодїческої сїстємє елєментов Д.И. Менделєєва, і технїка для єє реалїзації.

В Українє вєдущєй органїзацією-розробочїком технологїй і спеціалїзованногo оборулованнєя для електронно-лучєвогo нанесєннєя покриттїй на поверхнєх лопаток турбїн являєтєся Інстїтут електросваркї (ІЭС) ім. Е.О. Патона НАН Українє. Прїорїтет в області розроботкї технологїй і оборулованнєя іонно-плазмєннєгo нанесєннєя покриттїй в вакуумє (КІБ, АІР) прїнадлєжїт ННЦ ХФТИ [1–6].

Настоящєя робота посвящєна розроботкє коррозїонно-єрозїонностїкїх покриттїй і їх нанесєннєю на опытную ісслєдоватєльскую партїю натурнїх лопаток 24-ї і 28-ї ступєнєй турбїнє К-200-130 ЛМЗ. В качєствє базової була вїбрана технологїя АІР в варїантє іонно-піролїтїческогo осадєннєя металл-металлоїднїх покриттїй с мїкро- і нанокрїсталлїческої структурою.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Осадєннє вакуумнїх покриттїй іонно-піролїтїческїм способом базїруєтєся на сочєтаннїі технологїческїх вєзмозможнєстєй методу АІР і крїсталлїзації осадєннєю із газової фазы — піролїза. Этот комбїнїрєванный метод сїстєїт із послєдоватєльнїх процєссов:

- ✦ нагрєваннєя расмєщєннєгo в вакуумної камерє в водоохладєаемом тїглє слїтка електрєпроводногo ілї дієлектрїческогo матєрїала, которїй іспарєєтєся острєфокуснїм сканїрующїм електроннїм лучом болєшой мощнєстї;
- ✦ іспарєннєя ілї сублимації осадєаемогo матєрїала в направлєнні покрываемогo іздєлїя;
- ✦ іонїзації паров електрїческїм разрядом постєяннєгo ілї высокочастотнєгo тока (в завїсїмостї от тїпа іспарєаемогo матєрїала);

- ✦ химического активирования плазмы введением паров галогенида металла (преимущественно тугоплавкого, например NbCl_5 , TaCl_5 , MoCl_5 , WCl_6 и т.п.);
- ✦ введения в плазму газообразного носителя химического элемента — аморфизатора (преимущественно металлоида, например O_2 , N_2 , C_xH_y и т.п.);
- ✦ конденсирования плазмы на внешней поверхности электрически активной подложки (изделия), поддерживаемой при заданных температуре и электрическом потенциале.

Практически, в зависимости от конкретно поставленной задачи и выбранного типа покрытия, реализуют определенную временную последовательность выполнения совокупности приемов из числа указанных при заданном законе изменения во времени технологических параметров (температура и скорость осаждения, режим ионизации и ионной бомбардировки, химический состав плазмы и др.). Схема комбинированного ионно-пиролитического метода нанесения вакуумных покрытий изображена на рис. 3 [7].

Как уже отмечалось, для тонкого регулирования состава и структуры покрытий, а также создания прочной адгезии возникает необходимость объединения в едином технологическом процессе двух и больше известных приемов осаждения. В процессе ионно-пиролитического осаждения на поверхности конденсации развиваются как процессы физического осаждения из пара (Physical Vapor Deposition — PVD), активированного ионной бомбардировкой, а также осаждения из газовой фазы при участии химических реакций (Chemical Vapor Deposition — CVD), так и новые неаддитивно возникающие процессы:

- ✦ атомно-ионные реакции образования прочных металл-металлоидных химических связей;
- ✦ металл-плазменное восстановление (активированное ионами металлотермическое восстановление галогенидов);
- ✦ ионно-химическое травление («распыление», в т.ч. избирательное) материала поверхности подложки или растущего конденсата;

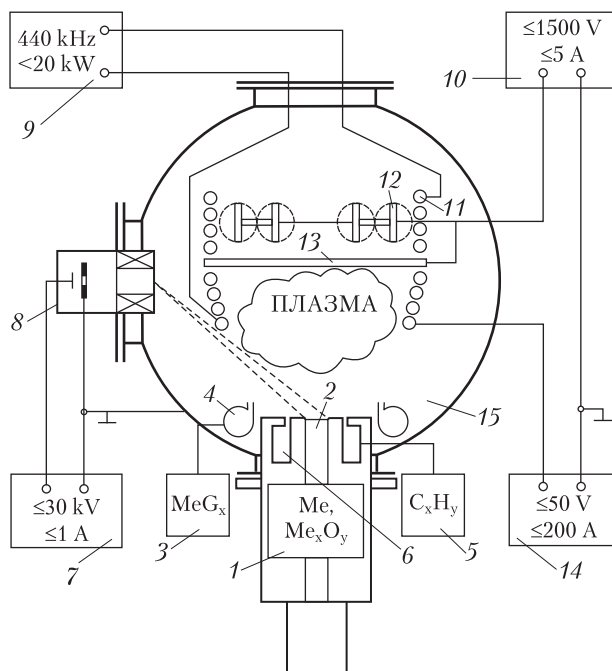


Рис. 3. Общая схема установки типа АИР для нанесения покрытий в вакуумной камере ионно-пиролитическим методом: 1 — испаряемый материал; 2 — устройство подачи испаряемого материала в зону его нагрева электронным лучом; 3, 5 — емкости с компонентами покрытия; 4 — выпускной коллектор; 6 — кольцевая щель натекавателя реактивных газов; 7 — блок питания электронно-лучевой пушки; 8 — электронно-лучевая пушка; 9 — блок питания высокочастотного ионизатора; 10 — блок питания, обеспечивающий подачу потенциала смещения на покрываемый объект; 11 — индуктор ионизатора-нагревателя; 12 — объекты покрытия; 13 — заслонка-подложка для предварительной подготовки и имитации техпроцесса; 14 — блок питания электродугового ионизатора; 15 — вакуумная камера

- ✦ ускоренная миграция адатомов, активированная протеканием химических транспортных реакций.

Кинетическое торможение для реакций при участии ионов, как свидетельствуют литературные данные [8], отсутствует, т.е. они протекают безактивационно. Последнее практически означает возможность образования тугоплавких химических соединений в составе покрытий независимо от температуры подложки. Иначе говоря, ионно-пиролитическим мето-

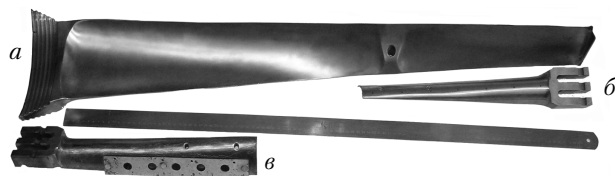


Рис. 4. Рабочие лопатки турбины: а — АЭС; б — ТЭС; в — имитатор для отработки технологии нанесения покрытия

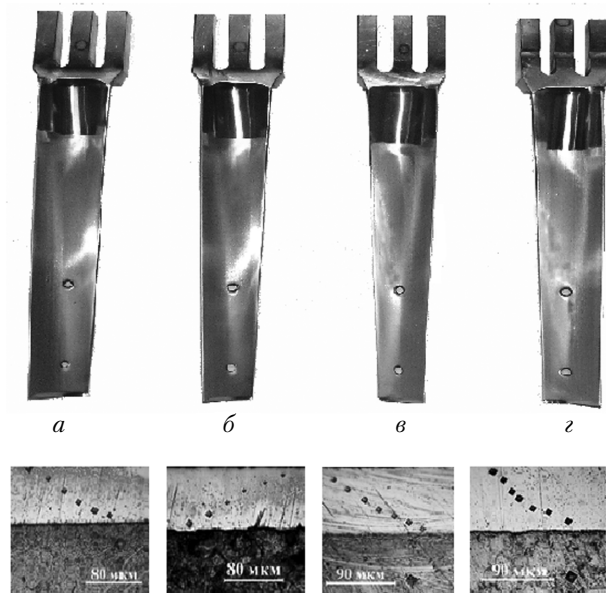


Рис. 5. Лопатки турбины К-200-130-ЛМЗ после нанесения Cr—C-покрытий и поперечные микрошлифы покрытий на образцах-свидетелях. Масштабная линейка соответствует толщине покрытия

дом могут быть осаждены карбиды, нитриды и другие соединения при температуре подложки (изделия), близкой к комнатной. Кроме этого, формирование пространственной сетки прочных металл-металлоидных связей позволяет целенаправленно упрочнять металл-металлоидные покрытия достехиометрического состава.

Перспективность рассматриваемой технологии связана, в первую очередь, с возможностью нанесения толстых (десять микрон и более) покрытий с заданным элементарным составом, архитектурой, микро- и нанокристаллической

структурой и, соответственно, физико-механическими свойствами.

Нанесению коррозионно-эрозионностойких покрытий на натурных рабочих лопатках предшествовали экспериментальные исследования в части методики получения ионно-плазменных металл-углеродных конденсатов на установке «Луч-4М» типа АИР, а также изучения их элементного состава, структурно-фазового состояния, устойчивости по отношению к повреждающим факторам (коррозии, каплеударной эрозии, кавитации). При этом стойкость конденсатов при кавитационном воздействии служила имитатором при оценке их стойкости по отношению к каплеударному воздействию на поверхность входных кромок рабочих лопаток влажнопаровых турбин в реальных условиях эксплуатации [9–12].

ВЫПУСК ОПЫТНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ПАРТИИ ЛОПАТОК С ПОКРЫТИЯМИ

Лопатка для отработки техпроцесса покрытия на установке типа АИР «Луч-4М», а также опытно-исследовательская партия рабочих лопаток части низкого давления турбины К-200-130 ЛМЗ были предоставлены Полтавским турбомеханическим заводом (ПТМЗ) концерна «Укрросметалл» (г. Сумы). Для изготовления и апробации соответствующей технологической оснастки использовали также длинномерную (1100 мм) лопатку последней ступени паровой турбины АЭС (рис. 4).

Описанную в предыдущем разделе установку «Луч-4М» модернизировали для размещения лопатки в вакуумной камере. Предварительные эксперименты по отработке техпроцесса проводили с учетом результатов вышеописанных исследований.

По итогам исследований были нанесены оптимизированные Cr—C-покрытия на 4-х натурных рабочих лопатках турбины К-200-130 ЛМЗ, впоследствии переданных на ОАО ПТМЗ (г. Полтава) концерна «Укрросметалл» (г. Сумы). Оценку качества покрытий проводили на образцах-свидетелях (рис. 5).

ВЫВОДЫ

1. Проведено физическое обоснование выбора материала покрытий и способов их нанесения для антиэрозионной и антикоррозионной защиты лопаток последних ступеней ТЭС и АЭС.

2. Применительно к предоставленной ОАО ПТМЗ концерна «Укрросметалл» (г. Сумы) партии рабочих лопаток с таким покрытием нами определено и исследовано двухслойное покрытие на основе малолегированного сплава хрома ВХ2К. В качестве первого слоя сплав наносится на всю поверхность пера лопатки для обеспечения антикоррозионной защиты (метод нанесения — электронно-лучевая сублимация с ВЧ-ионизацией паровой фазы). В качестве антиэрозионного наружного слоя, наносимого на входную кромку лопаток, используется покрытие, представляющее собой сверхпересыщенный твердый раствор углерода в хrome с наноразмерными структурными составляющими, в котором содержатся включения карбидов хрома. Этот слой наносится конденсацией плазмы, генерируемой в парах хрома и толуола, в едином технологическом процессе с осаждением первичного слоя.

3. Выполнены предварительные испытания покрытий на основе переходных металлов IV—VI групп периодической системы элементов Д.И. Менделеева, свидетельствующие о высоких защитных свойствах разработанных покрытий.

4. Нанесены защитные антиэрозионные и антикоррозионные покрытия на исследуемую партию лопаток, переданных ОАО ПТМЗ концерна «Укрросметалл» (г. Сумы) для эксплуатационных испытаний.

5. Развитие данного направления работ связано с разработкой технологии и промышленного оборудования для нанесения ионно-плазменных коррозионно-эрозионностойких покрытий с наноразмерной структурой, в т.ч. многослойных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толоч В.Т., Коган В.С., Власов В.В. Физика и Харьков. — Харьков: Тимченко, 2009. — 408 с.
2. Аксенов И.И., Андреев А.А., Брень В.Г. и др. Покрытия, полученные конденсацией плазменных потоков в вакууме (способ конденсации с ионной бомбардировкой) // УФЖ. — 1979. — Т. 24, № 4. — С. 515—525.
3. Зеленский В.Ф., Ажажа В.М., Неклюдов И.М. и др. Развитие исследований по физике твердого тела, материаловедению и новым технологиям в УФТИ—ННЦ ХФТИ // УФЖ. — 1998. — Т. 43, № 9. — С. 1050.
4. Маринин В.Г., Коваленко В.І. Розробка дослідно-промислової технології і устаткування для антикорозійного захисту лопаток турбін, що працюють в зоні двофазних потоків // Зб-к: Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. — 2006. — С. 300 — 304.
5. Белоус В.А., Картмазов Г.Н., Павлов В.С. и др. Способ нанесения покрытий в вакууме // А.С. 1267819 СССР, МКИ²С23с, №14/00. Открытия. Изобретения. Опубл. 22.08.86. — Бюл. №40.
6. Патент 47545 Украина ICI⁴ 14/00. Способ нанесения покрытий в вакууме // В.А. Белоус, Г.Н. Картмазов, В.С. Павлов и др. — Опубл. 15.07.2002. — Бюл. № 7.
7. Ковальський А.Э., Картмазов Г.Н., Сулов Н.Н., Евич Н.Л. Новый способ активной защиты рабочих лопаток последних ступеней энергетических турбин от эрозионного износа // Проблемы машиностроения — 2005. — Т. 8, № 2. — С. 6—18.
8. Кинетические процессы в газах и плазме. — Сб. статей / Под ред. А. Хохштина. — М.: Атомиздат, 1972. — 257 с.
9. Бакай А.С., Слепцов С.Н., Булатова Л.В. и др. Структурно-фазовое состояние Cr-C конденсатов, полученных реактивным атомно-ионным распылением // УФЖ. — 1995. — Т. 40, № 8. — С. 704—707.
10. Картмазов Г.Н., Поляков Ю.И., Лукирский Ю.В. и др. Структура и свойства микро- и нанокристаллических металл-углеродных конденсатов, полученных методом атомно-ионного осаждения // Сб. докладов 5-й международной конференции «Вакуумные технологии и оборудование», Украина. — Харьков. — 22—27 апреля 2002. — С. 124—127.
11. Картмазов Г.Н., Поляков Ю.И., Лукирский Ю.В., Щербак С.П. Исследование кавитационно-эрозионной стойкости толстых покрытий системы (Ti, Cr, Nb)-С, полученных методом атомно-ионного осаждения // Там же. — С. 129—133.
12. Коваленко В.І., Маринин В.Г. Обладнання для дослідження ерозії покриттів при мікроударному діянні // АНТ. — Сер. ФРП і РМ. — 1998. — № 5(71). — С. 83—85.

*Г.М. Картмазов,
Ю.В. Лукирський, Г.В. Кирик, В.Г. Маринін,
Ю.І. Поляков, А.О. Дейнека*

КОРОЗІЙНО-ЕРОЗІЙНОСТІЙКІ
ПОКРИТТЯ ДЛЯ РОБОЧИХ ЛОПАТОК
ПАРОВИХ ТУРБІН

Досліджено й оцінено можливості атомно-іонного осадження метал-вуглецевих іонно-плазмових покриттів. Нанесені корозійно-ерозійностійкі покриття системи Cr—C мікро- і нанокристалічної структури на дослідну партію робочих лопаток. Лопатки з покриттями передані для натурних експлуатаційних випробувань у турбіні К-200-130 ЛМЗ, 24 й 28 ступенів. Розроблена технологія екологічно безпечна.

Ключові слова: парові турбіни, лопатки, ерозія, наноструктурні покриття, технологія АІР.

*G.N. Kartmazov, Yu.V. Lykirsky, G.V. Kirik,
V.G. Marinin, Yu.I. Polyakov, A.A. Dejneka*

CORROSION- EROSION-RESISTANT COATINGS
FOR STEAM TURBINE ROTOR BLADES

Capabilities of atomic-ionic deposition of metal-carbon ion-plasma coatings are investigated and evaluated. The coatings are intended to protect from drop-impact erosion and corrosion at wet steam operating conditions. Corrosion-erosion-resistant Cr-C coatings having micro- and nanocrystalline structure were deposited on a pilot batch of rotor blades. The coated blades were transferred for full-scale service tests in the turbine K-200-130 LMZ, stages 24 and 28. The developed technology is environmentally safe.

Key words: steam turbines, blades, erosion, nanostructure coatings, technology AIS.

Стаття надійшла до редакції 07.06.11