

**Г.Н. Картмазов<sup>1</sup>, Ю.В. Лукирский<sup>1</sup>, Г.В. Кирик<sup>2</sup>,  
В.Г. Маринин<sup>1</sup>, Ю.И. Поляков<sup>1</sup>, А.А. Дейнека<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков

<sup>2</sup> Концерн «Укрросметалл», Сумы

<sup>3</sup> 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 натуральных 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.

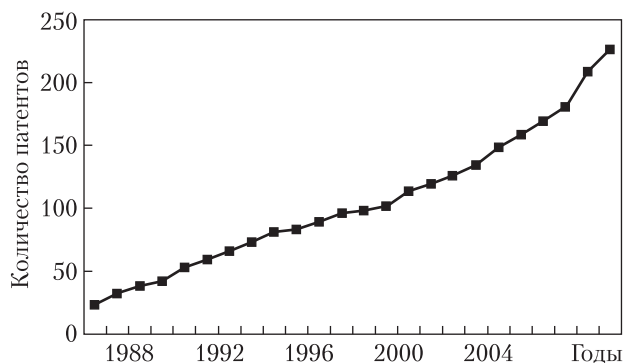
Проблема эрозионной повреждаемости рабочих лопаток паровых турбин стала актуальной еще в начале 80-х годов прошлого столетия. Характер кривой динамики изобретательской активности (рис. 1) свидетельствует о неослабевающем интересе к проблеме защиты рабочих лопаток от эрозии и других видов износа.

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 (кобальго-хромо-вольфрамовые сплавы) на вход-

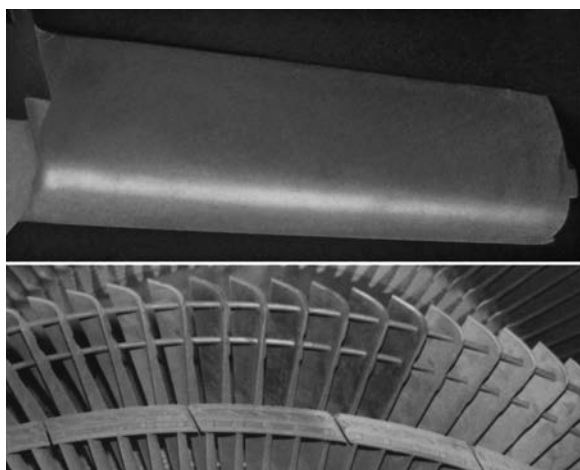
ную кромку или нанесением высокотвердых покрытий в воздушной атмосфере не эффективно, что подтверждается многими научными центрами, ведущими разработки в этой области техники. Припайка пластин не решает проблемы эрозионного износа и при этом значительно ухудшает аэродинамические свойства лопаточного 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.** Динамика изобретательской активности разработок защитных покрытий на рабочих лопатках паровых турбин (по результатам патентных исследований, выполненных в ННЦ ХФТИ)



**Рис. 2.** Турбинные лопатки с коррозионностойкими покрытиями. Установлены на Новочеркасской ТЭС

мируемые при конденсации металлической плазмы вакуумно-дугового разряда [2, 3] на установках типа «Булат», были нанесены на опытно-промышленную партию рабочих лопаток, в дальнейшем установленных в турбинах Новочеркасской и Змиевской ТЭС (рис. 2). Опыт их эксплуатации на протяжении более 150 тыс. часов подтвердил эффективность разработанного метода защиты поверхности лопаток от коррозионных повреждений [4].

В указанный период в ННЦ ХФТИ была разработана технология нанесения защитных покрытий атомно-ионным распылением (АИР)

[5, 6], базирующаяся на использовании высокоэнергетического острофокусного электронного луча для нагрева и высокоскоростного испарения в вакууме металлов IV–VI групп периодической системы элементов Д.И. Менделеева, и техника для ее реализации.

В Украине ведущей организацией-разработчиком технологий и специализированного оборудования для электронно-лучевого нанесения покрытий на поверхность лопаток турбин является Институт электросварки (ИЭС) им. Е.О. Патона НАН Украины. Приоритет в области разработки технологии и оборудования ионно-плазменного нанесения покрытий в вакууме (КИБ, АИР) принадлежит ННЦ ХФТИ [1–6].

Настоящая работа посвящена разработке коррозионно-эрозионноустойчивых покрытий и их нанесению на опытную исследовательскую партию натуральных лопаток 24-й и 28-й ступеней турбины К-200-130 ЛМЗ. В качестве базовой была выбрана технология АИР в варианте ионно-пиролитического осаждения металл-металлоидных покрытий с микро- и нанокристаллической структурой.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Осаждение вакуумных покрытий ионно-пиролитическим способом базируется на сочетании технологических возможностей метода АИР и кристаллизации осаждением из газовой фазы — пиролиза. Этот комбинированный метод состоит из последовательных процессов:

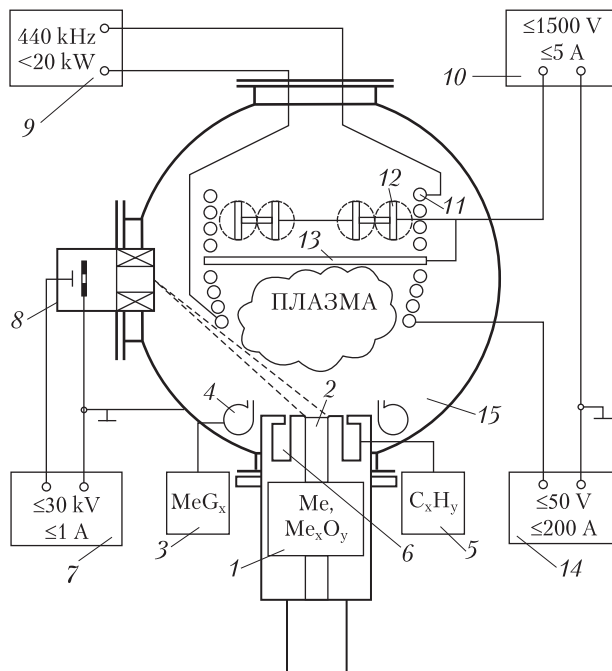
- ✦ нагревания размещенного в вакуумной камере в водоохлаждаемом тигле слитка электропроводного или диэлектрического материала, который испаряется острофокусным сканирующим электронным лучом большой мощности;
- ✦ испарения или сублимации осаждаемого материала в направлении покрываемого изделия;
- ✦ ионизации паров электрическим разрядом постоянного или высокочастотного тока (в зависимости от типа испаряемого материала);

- ✦ химического активирования плазмы введением паров галогенида металла (преимущественно тугоплавкого, например  $\text{NbCl}_5$ ,  $\text{TaCl}_5$ ,  $\text{MoCl}_5$ ,  $\text{WCl}_6$  и т.п.);
- ✦ введения в плазму газообразного носителя химического элемента — аморфизатора (преимущественно металлоида, например  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$  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 натекаателя 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 атомонов, 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-

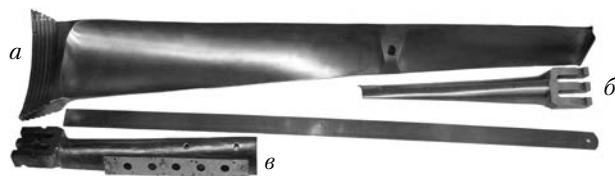


Рис. 4. Рабочие лопатки турбины: а – АЭС; б – ТЭС; в – имитатор для отработки технологии нанесения покрытия

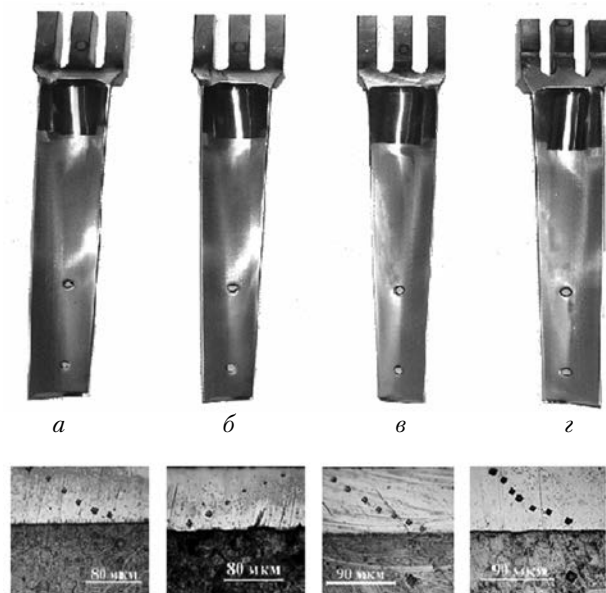


Рис. 5. Лопатки турбины К-200-130-ЛМЗ после нанесения Cr–С-покрытий и поперечные микрошлифы покрытий на образцах-свидетелях. Масштабная линейка соответствует толщине покрытия

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-эрозионноустойчивых покрытий на натуральных 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–С-покрытия на 4-х натуральных 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 техпроцессе 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. Толк 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. Маринін 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, МКИ<sup>2</sup>С23с, №14/00. Открытия. Изобретения. Опубл. 22.08.86. — Бюл. №40.
6. Патент 47545 Украина ICI<sup>4</sup> 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., Суслев 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. Хохштима. — 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., Маринін 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