

УДК 621.9048.7:62.226.2-192

М. К. СМЫСЛОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ И ПАРОВЫХ ТУРБИН

Обсуждаются результаты исследования и разработки комбинированных ионно-плазменных технологий, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств лопаток газовых и паровых турбин. Комбинированные вакуумные технологии; ионная имплантация; упрочнение лопаток турбин

Повышение эксплуатационных свойств лопаток газовых и паровых турбин, наиболее нагруженных и ответственных деталей, отвечающих за их ресурс, — крупная народнохозяйственная задача.

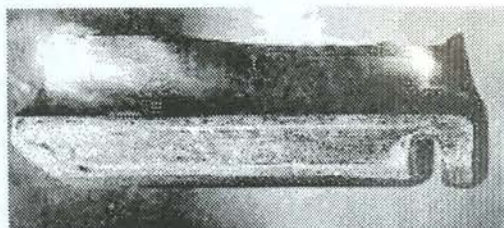
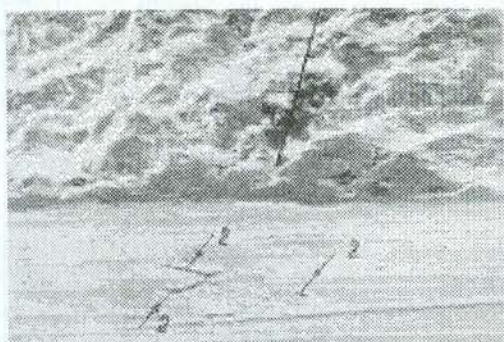
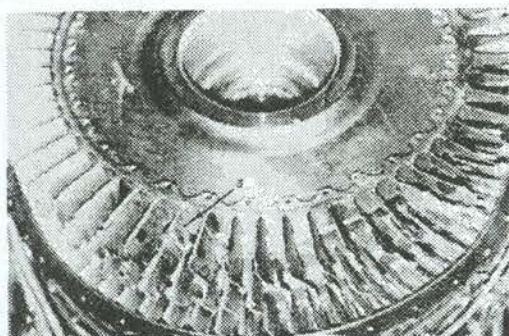


Рис. 1. Разрушение ротора и лопатки 4-й ступени РКВД (наработка 186 ч). Причина разрушения — прижог при полировке

Лопатки газовых и паровых турбин на финишном этапе изготовления подвергаются упрочнению и защите от вредных эксплуатационных воздействий. Традиционные технологии упрочнения и защиты лопаток газовых турбин исчерпали себя, так как приводят к ненормированному формированию физико-химического состояния поверхности, появлению дефектов и т. п. и в результате к отказу турбины (рис. 1).

К лопаткам газотурбинных двигателей нового поколения со сверхзвуковыми профилями они неприменимы, так как упрочненные слои соизмеримы с размерами самих лопаток. В результате из-за недостаточной выносливости такие лопатки разрушаются в процессе эксплуатации (рис. 2).

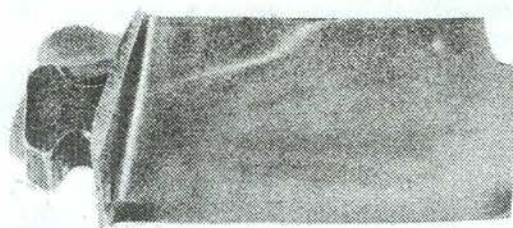


Рис. 2. Разрушение лопатки РКВД (наработка 15–156 ч). Причина — отсутствие достаточной выносливости

Еще более сложная ситуация сложилась в энергетике. Рабочие лопатки последних ступеней ЦНД паровых турбин работают не только в условиях сложного знакопеременного нагружения, коррозионной среды, но и мощного каплеударного воздействия. Результатом такого воздействия являются: износ входных кромок, трещины и изменение геометрических размеров лопатки (рис. 3) [1].

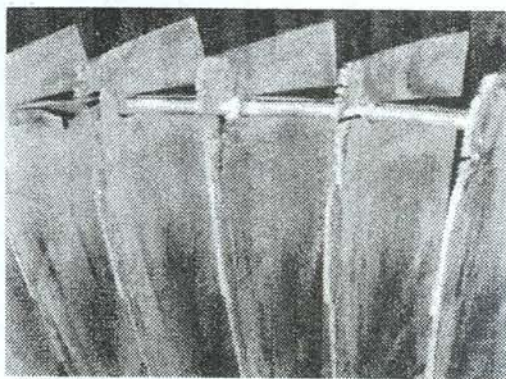


Рис. 3. Эрозионное повреждение входной кромки рабочих лопаток паровой турбины после наработки 7380 ч на Ровенской АЭС

Традиционно лопатки защищают от эрозии приваркой или припайкой защитных пластин, которые, эродируя, сами, замедляют эрозию лопатки. Однако при этом ухудшаются эксплуатационные свойства и аэродинамические характеристики лопатки [2].

В случае лопаток как газовых, так и паровых турбин необходим поиск новых технологических решений, обеспечивающих эффективную защиту лопаток и повышение их эксплуатационных свойств.

Известно [3, 4], что кардинальными методами изменения физико-химического состояния поверхности являются пучковые методы обработки поверхности. Однако имеющиеся данные в этой области носят отрывочный характер, не систематизированы, в основном относятся к простым сплавам и другим объектам исследования.

С целью разработки технологий защиты и упрочнения лопаток газовых и паровых турбин нами исследованы ионно-имплантационные процессы применительно к титановым сплавам (BT18, BT9, BT6) и сталям (20X13, 15ХМФ, ЭИ961) в широком диапазоне высоких (до 30 кэВ) и низких (до 1,5 кэВ) энергий, доз облучения (от 10^{16} до 10^{20} ион/см²), плотностей тока, в условиях сепарационной и бессепарационной имплантации. На основании теории упрочнения академика Богвара, диаграмм фазового равновесия, физико-химических явлений, сопровождающих ионную имплантацию, научно обоснован выбор легирующих ионов. Для титановых сплавов — N, B, C; для сталей — N, Cr.

В процессе исследования были использованы методики оптической и электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, ОЖЕ-спектроскопии, вторичной ионной масс-спектроскопии. Исследования механи-

ческих и эксплуатационных свойств проводились по стандартным методикам.

Установлено, что ионно-имплантационное модифицирование приводит к частичному распылению поверхности, внедрению легирующих ионов на глубину до 1250 Å (при ВЭИ) и до 9 мкм (при НЭИ) с образованием твердых растворов внедрения (C, N) и замещения (B, Cr), высокодисперсных твердых фаз (рис. 4–6). На глубинах, значительно превышающих пробег ионов до 80–120 мкм, формируется развитая дислокационная структура, близкая к блочной при ВЭИ и сетчатой при НЭИ, что свидетельствует о проявлении эффекта дальнего действия (рис. 7).

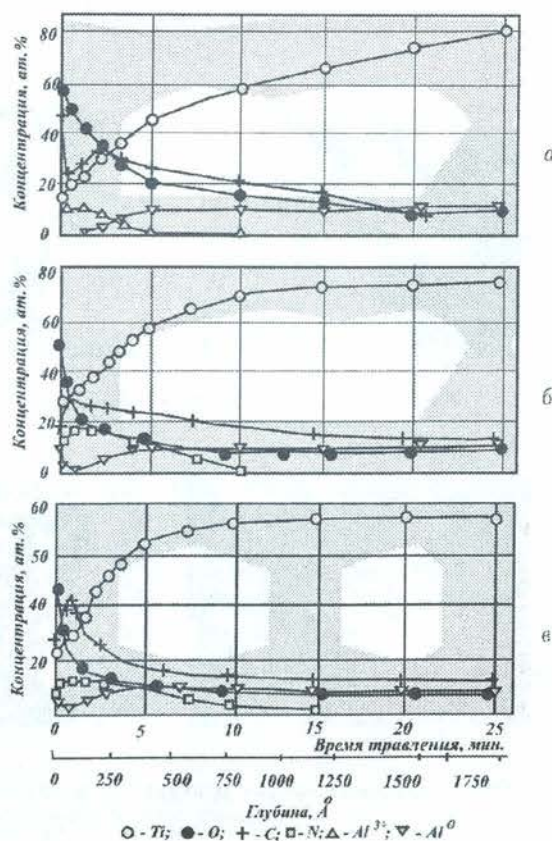


Рис. 4. Изменение элементного состава сплава BT18У: а — исходное состояние; б — ИИ N⁺ E = 40 кэВ; в — ИИ N⁺ + постимплантационный отжиг в вакууме

Ионная модификация стали приводит к смещению их бестоковых электродных потенциалов в более положительную область. Имплантация азота в сталь 20X13 изменяет электродный потенциал с -0,22 эВ до -0,11 эВ, а имплантация хромом — до +0,18 эВ.

Выявленные изменения физико-химического состояния приводят к упрочнению исследуемых материалов, которое проявляется

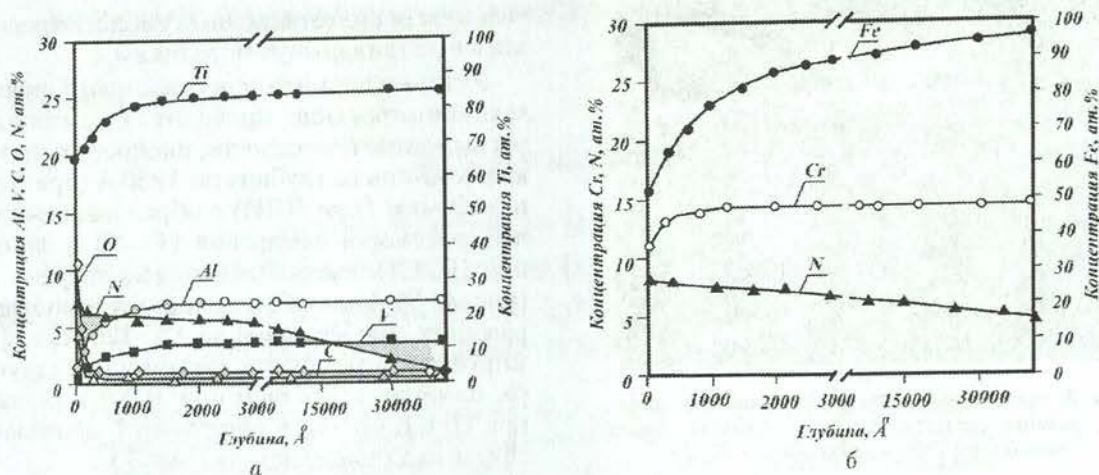


Рис. 5. Изменение элементного состава после низкоэнергетической имплантации: а — сплава ВТ6 (данные А. М. Смыслова и Э. В. Сафина); б — сталь 20X13

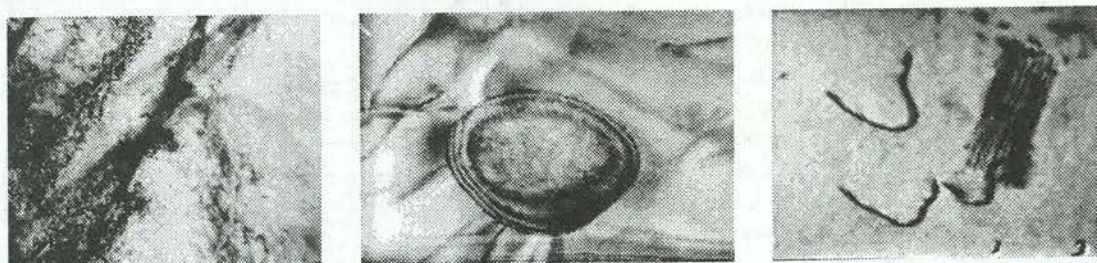


Рис. 6. Выделение вторичных фаз в сплаве ВТ18У после высокоэнергетической имплантации

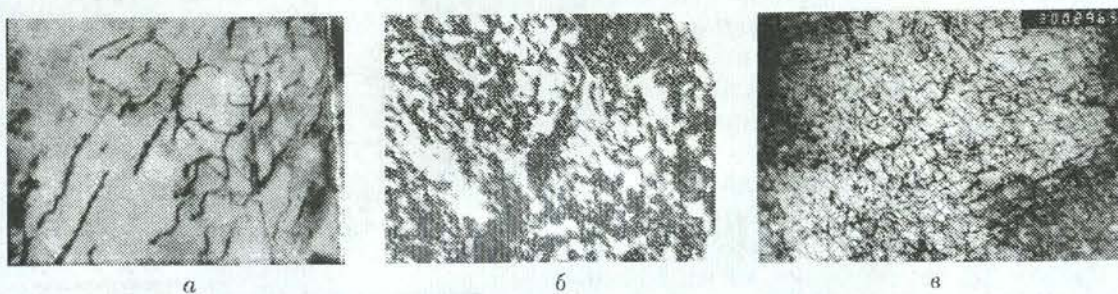


Рис. 7. Дислокационная структура сплава ВТ18У: а — исходная; б — после высокоэнергетической имплантации; в — после низкоэнергетической имплантации

в повышении микротвердости поверхности и прочности материала.

Исследовано влияние ионно-модифицированного состояния на протекание процессов в поверхности при длительном термостабилизации. Установлено, что все виды модификации в титановые сплавы и стали блокируют диффузию в глубь металла, создавая профили внедрения кислорода меньшей концентрации и глубины, как следствие, предопределяя, в отличие от исходного состояния, более стабильные механические свойства (рис. 8).

Проведено исследование высокотемпературной усталости образцов из исследуемых конструкционных материалов с различной обработкой поверхности (ППД, полирование, ионная имплантация). Установлено, что характеристики выносливости зависят как от сформированного физико-химического состояния, так и от условий проведения испытаний. В области больших долговечностей малых и средних нагрузок, когда активно протекают релаксационные процессы, наиболее высокими параметрами долговечности и надежности обладает ионно-имплантирован-

ное состояние. В области малых долговечностей и высоких напряжений, когда релаксационные процессы заторможены, более эффективны процессы поверхностно-пластической обработки (рис. 9). Результаты высокотемпературных усталостных испытаний легли в основу разработки температурно-ресурсных зон работоспособности конструкционных материалов, позволяющих для лопаток компрессора и условий их эксплуатации осуществлять выбор метода окончательной обработки поверхности с целью получения максимальных эксплуатационных свойств.

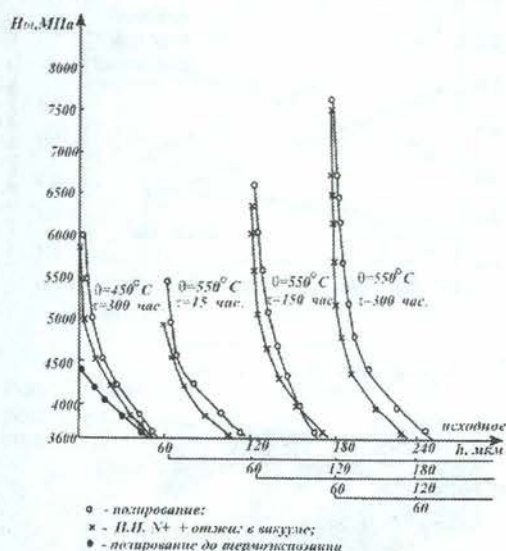


Рис. 8. Изменение микротвердости ионно-имплантированных и исходных образцов из сплава VT18U после длительной термоэкспозиции

По результатам выполненных исследований установлено, что применение ионной имплантации в технологии изготовления лопаток компрессора обеспечивает: увеличение предела выносливости на 9–31%, циклической долговечности — более чем в 20 раз, стойкости к газоабразивной эрозии — в 1,5 раза, длительной прочности — в 2 раза.

На основании полученных результатов были разработаны технологии упрочнения лопаток компрессора из титановых сплавов VT9, VT18U, VT6, а также выдано техническое задание на проектирование установки для реализации данных технологических процессов.

Установки «Вита» были изготовлены и установлены на базе ОАО «УМПО» (Уфа), где ведется серийная обработка штатных лопаток.

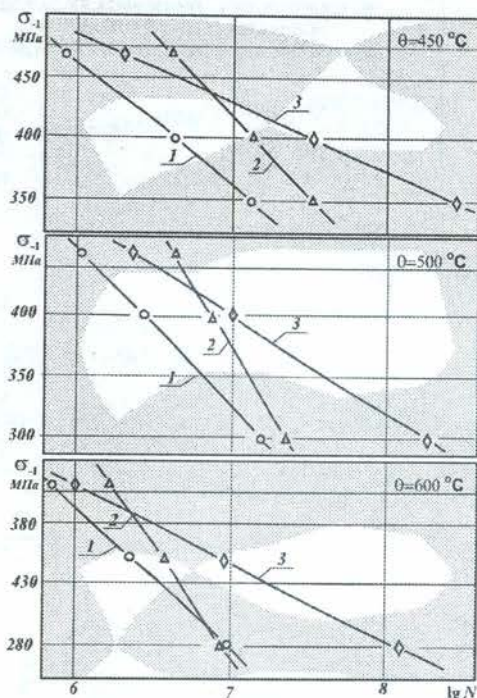


Рис. 9. Кривые выносливости образцов из сплава VT18U: 1 — полирование; 2 — упрочнение микрошариками; 3 — полирование + ИИ N⁺ + вак. ПИО

Учитывая, что лопатки ГТД из хромистых сталей подвержены в процессе эксплуатации интенсивной коррозии, а лопатки паровых турбин из титановых сплавов и хромистых сталей подвержены мощному каплеударному воздействию, необходима дополнительная защита поверхности путем нанесения покрытия. Наиболее перспективными покрытиями, имеющими высокую адгезионную прочность с подложкой, плотность и хорошие эксплуатационные свойства, являются вакуумные ионно-плазменные покрытия. Данные покрытия хорошо себя зарекомендовали при упрочнении режущего инструмента. Однако для обработки лопаток паровых турбин, а также группы лопаток газовых турбин необходимо проведение ионно-имплантационной ионно-плазменной обработки больших площадей (более 1000 мм²). Нами проведен анализ имеющихся источников газовой и металлической плазмы.

Наиболее оптимальными параметрами, обеспечивающими ионно-имплантационную обработку больших площадей и с высокой равномерностью по сечению, обладают газовые источники МАИ (ИПА) (Москва), которые могут работать в режиме ускорения путем приложения отрицательного смещения к обрабатываемому изделию, технологические источники с накаливаемым катодом (Томск), которые дают наибольшую плотность ионно-

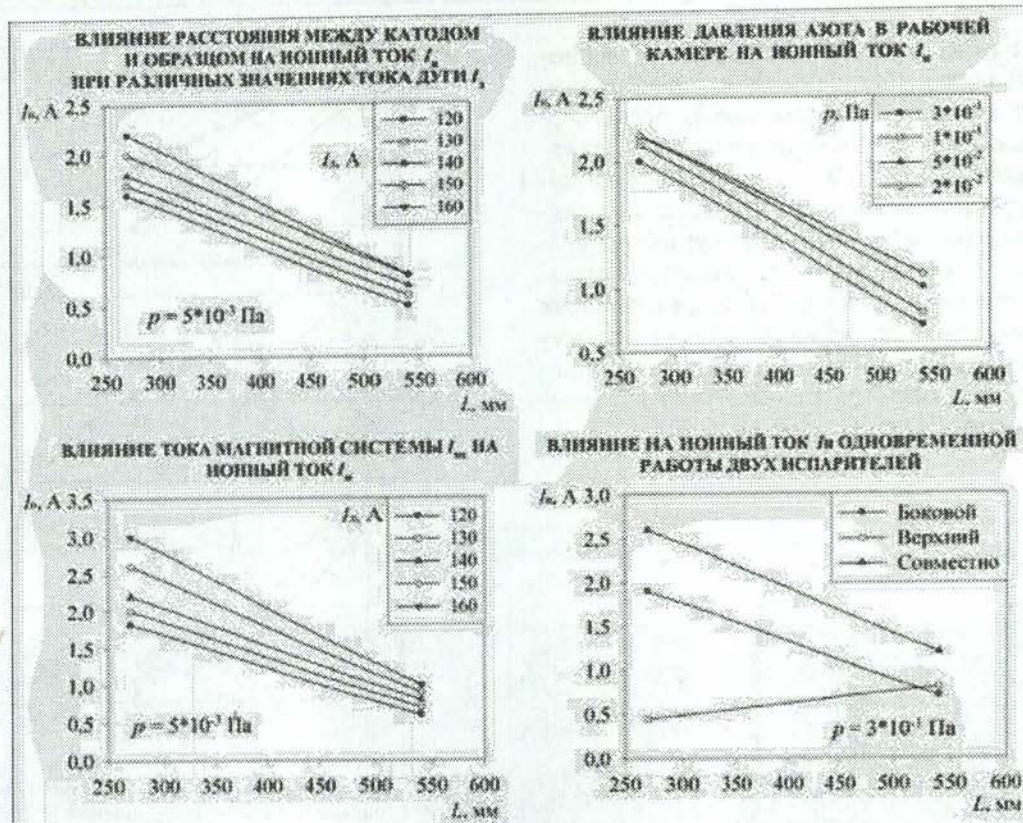


Рис. 10. Исследование параметров плазмы электродугового испарителя



Рис. 11. Микроструктура образцов из сплава ВТ6 после нанесения покрытия комбинированным методом

го тока. Плазма такого разряда может регенерироваться одновременно с металлической плазмой и осуществлять ассистирование напыления покрытий. Для нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий были разработаны электродуговые испарители с большим диаметром катода (200 мм) и совместно с ХФТИ с протяженным катодом ($L = 1000-1200$ мм), на которых были проведены исследования параметров плазмы в зависимости от режимов обработки (рис. 10).

Исследованы стехиометрии, различные системы покрытия и проведено конструирование поверхности по условиям эксплуатации лопаток газовых и паровых турбин. Для титановых лопаток паровых турбин наи-

более оптимальным является покрытие системы Ti-TiN. Комбинированная обработка, включающая в себя низкоэнергетическое ионно-имплантационное модифицирование поверхности титановых сплавов с последующим осаждением ионно-плазменных покрытий, реализуемая в едином вакуумном объеме, позволила изменить структурно-фазовый состав подложки, обеспечить твердо-растворное, дисперсионное, дислокационное ее упрочнение, распылить и активировать поверхность, тем самым усилить ее взаимодействие с наносимым покрытием. Образованные в поверхностном слое нитридные фазы обеспечили изоморфность перехода подложки в покрытие, а в целом плавный пере-

ход их физико-химических свойств. Наносимое ионно-плазменное покрытие толщиной не менее 8 мкм имеет микротвердость H не менее 15000 МПа, неоднородность не более 8% (рис. 11). По разработанным режимам проведена вакуумная комбинированная обработка образцов из титановых сплавов ТС5, BT6 и проведено исследование их эксплуатационных свойств. Результаты приведены на рис. 12, 13. Положительные результаты исследования легли в основу разработки технологии упрочнения лопаток паровых турбин из титановых сплавов и установки «Мария» для ее реализации на базе ФГУП «Мотор».

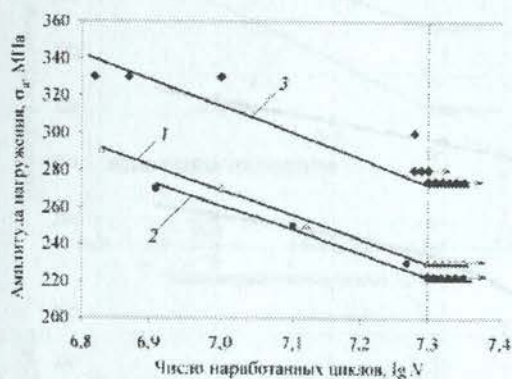


Рис. 12. Кривые выносливости сплава ТС5 после различных видов обработки: 1 — исходное состояние; 2 — покрытие TiN⁺; 3 — ионное модифицирование + покрытие TiN

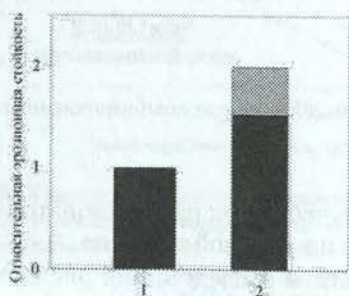


Рис. 13. Относительная эрозионная стойкость сплава ТС5 после комбинированной обработки: 1 — исходное состояние; 2 — ионное модифицирование + покрытие TiN

По разработанной технологии с 2000 г. обрабатываются титановые лопатки для Ленинградского металлического завода (рис. 14). В настоящее время имеются данные по эрозионной стойкости титановых лопаток из сплава ТС5 после наработки 21000 ч с 78 пусками в горячем и неостывшем состоянии с крайне низкой температурой пара (рис. 15). Установлено, что на входной кромке отмечается начало эрозии с глубиной отдельных повреждений от 0,1–0,5 мкм (70%) и от 0–0,2 мкм

(30%), при этом хорда не изменена, а выходная кромка не повреждена.

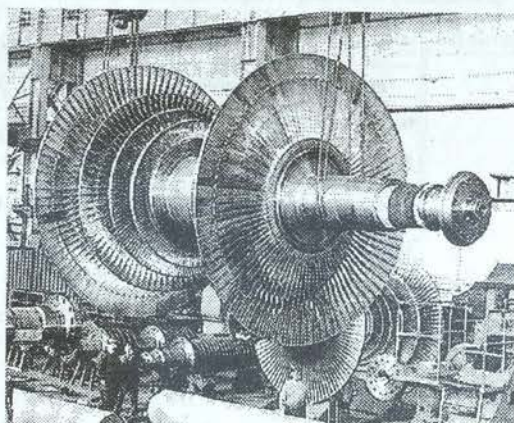


Рис. 14. Внешний вид ротора паровой турбины с упрочненными лопатками

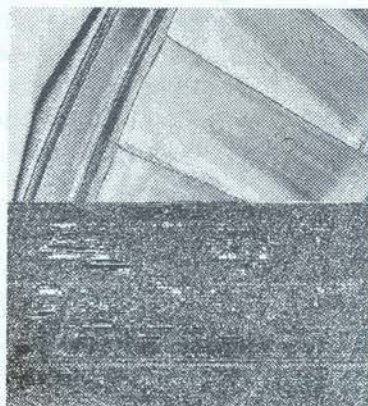


Рис. 15. Внешний вид упрочненных лопаток паровой турбины после наработки 21000 ч

Эксплуатация лопаток в составе действующей турбины подтвердила результаты стендовых испытаний экспериментальных образцов. Толщина покрытия на лопатках действующей турбины составляла 8 мкм, а модифицированного слоя — 80 мкм. В целях дальнейшего повышения эксплуатационной надежности лопаток нами проводятся работы по нанесению покрытия более 50 мкм.

Применительно к лопаткам газовых и паровых турбин из сталей дополнительно для защиты от коррозионного воздействия необходимо было реализовать:

- Упрочнение и пассивацию подложки. Более технологичная обработка азотом позволила создать в поверхности гомогенные структуры азота в железной матрице, которая обеспечила изменение бестокового электродного потенциала с $-0,22$ эВ в исходном состоянии до $-0,11$ эВ в модифицированном состоянии.

Результаты исследования коррозионных свойств сплава 20X13

СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ	ЭЛЕКТРОДНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ, В	ТОКИ КОРРОЗИИ, В	МИКРОТВЕРДОСТЬ, МПа	ПОТЕРЯ МАССЫ, Г	ГЛУБИНА ПОВРЕЖДЕНИЙ, МКМ
ИСХОДНОЕ СОСТОЯНИЕ	-0,221	$3,5 \cdot 10^{-4}$	3600-3800	0,238	$3,5 \cdot 10^{-4}$
ИОННОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ (Ag + N) + ОДНОСЛОЙНОЕ ПОКРЫТИЕ Ti-TiN ($\delta = 7-8$ мкм)	-0,11	$1,7 \cdot 10^{-4}$	> 15000	0,157	$1,0 \cdot 10^{-5}$
ИОННОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ (Ag + N) + ДВУХСЛОЙНОЕ ПОКРЫТИЕ Ti-TiN ($\delta = 9-10$ мкм)	+0,165	$1,4 \cdot 10^{-4}$	> 18000	0,108	$1,7 \cdot 10^{-5}$
ИОННОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ (Ag + N) + МНОГОСЛОЙНОЕ ПОКРЫТИЕ Ti-TiN _{0.4} -TiN ($\delta = 20$ мкм)	+0,192	$8 \cdot 10^{-5}$	> 25000	0,063	$0,8 \cdot 10^{-5}$

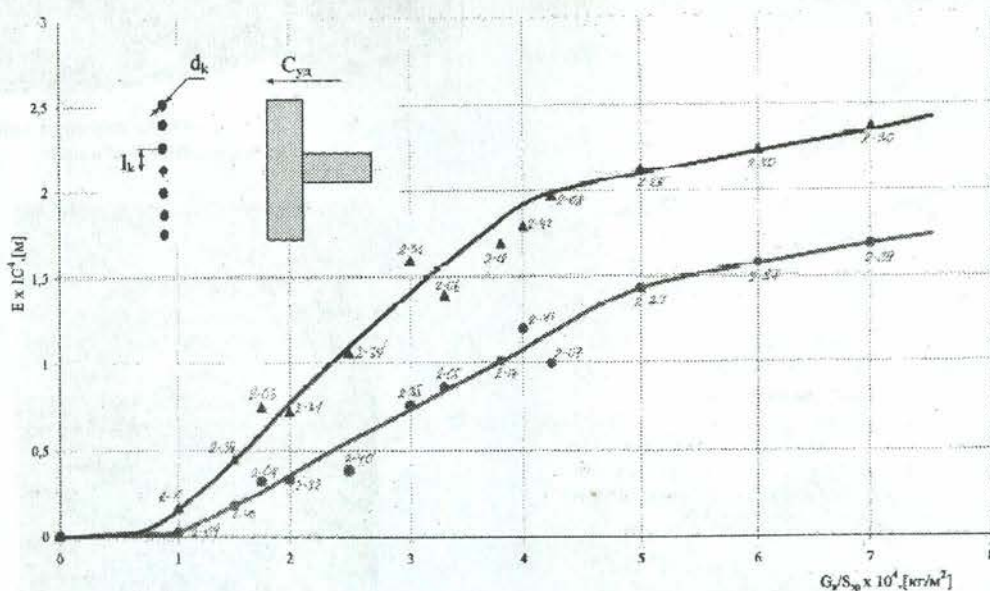


Рис. 16. Результаты исследования каплеударной эрозии стали 20X13 после комбинированного упрочнения

• Нанесение многослойных покрытий системы $\chi^*(\text{Ti}-\text{TiN}-\text{Ti}_2\text{N})$, блокирующих коррозионные процессы за счет создания слоев, где каждый последующий слой осуществляет электрохимическую защиту предыдущего. Коррозионные процессы, протекающие в газовой турбине, были имитированы на образцах из стали 20X13, упрочненных с применением комбинированной ионной модификации.

Исследованы коррозионные свойства образцов с применением комбинированных технологий упрочнения (табл. 1). Установлено, что ионно-имплантационная обработка в сочетании с многослойным покрытием системы $6^*(\text{Ti}-\text{TiN}-\text{Ti}_2\text{N})$ обеспечивает значение электродного потенциала +0,192 эВ и ток коррозии $I = 8 \cdot 10^{-5}$ А, что обеспечивает значительное повышение коррозионной стойко-

сти поверхности при работе лопаток как в газовой, так и в паровой турбине.

Результаты исследования эксплуатационных свойств образцов из сталей, упрочненных комбинированной ионно-имплантационной ионно-плазменной обработкой, приведены на рис. 16–18. Микроструктура поверхности с многослойным покрытием представлена на рис. 19.

Положительные результаты легли в основу разработки технологии упрочнения лопаток газовых и паровых турбин из хромистых сталей и создания оборудования нового поколения для ее реализации. Сравнительные характеристики установок «Мария» и «Виктория» приведены в табл. 2.

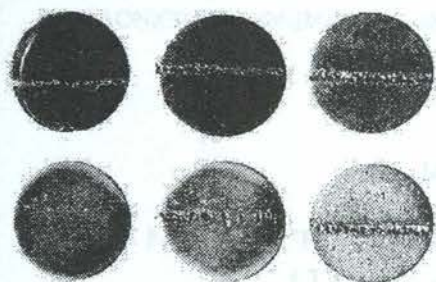


Рис. 17. Внешний вид образцов на различных этапах испытания

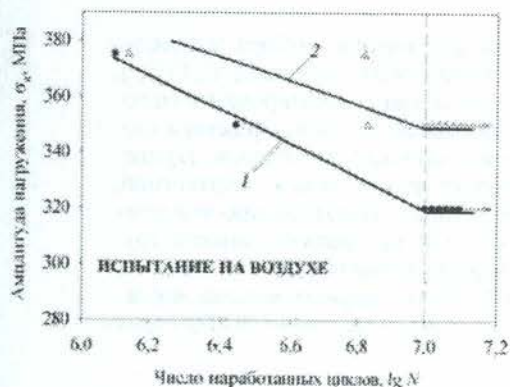


Рис. 18. Кривые выносливости образцов из стали 20Х13 после комбинированной обработки: 1 — исходное состояние; 2 — ионное модифицирование (Ag + N) + многослойное покрытие Ti-Ti₂N₅-TiN (h = 20 мкм)

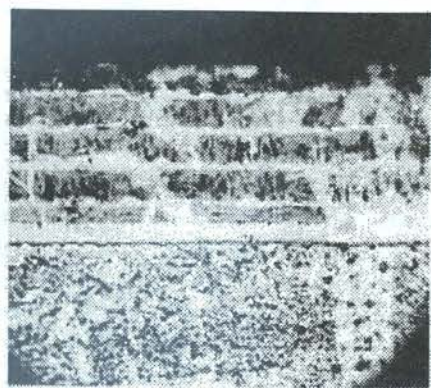


Рис. 19. Микроструктура поверхности с многослойным покрытием

Таблица 2

Сравнительные характеристики установок

Наименование показателей	«Мария»	«Виктория»
1. Время откачки вакуума до $5 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст., ч.....	2,5	1
2. Суммарный ток ионного источника (ионная очистка, ионная имплантация), А...	≈ 0,7	5... 7
3. Скорость нанесения покрытия с учетом вращения лопаток, мкм/ч.....	≈ 3,5	12... 15
4. Потребляемая мощность, кВт.....	75	150
5. Кол-во лопаток, обрабатываемых за 2 смены.....	8	18... 21
6. Возможность получения «толстых» многослойных покрытий.....	-	+

Научно-технический результат работы. Установлено, что целенаправленным изменением параметров плазмы (концентрации ионов веществ, энергии, ионного тока, температуры и др.) возможны реализация дислокационных, твердорастворных, дисперсионных механизмов упрочнения конструкционных материалов, регулируемое изменение химических реакций с образованием требуемой структуры и фазового состава поверхности и конденсированного покрытия и, как следствие, обеспечение многократного повышения эксплуатационных свойств и надежности лопаток газовых и паровых турбин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыженков В. А. Состояние проблемы и пути повышения износостойкости ТЭС // Теплоэнергетика. 2000. № 6. С. 20–25.
2. Фадеев Н. П. Эрозия влажнопаровых турбин. Л.: Машиностроение, 1974.
3. Ионная имплантация / Под ред. Д. Хирвонена. М.: Металлургия, 1985. С. 391.
4. Комаров Ф. Ф. Ионная имплантация в металлы. М.: Металлургия, 1990. С. 216.

ОБ АВТОРЕ



Смылова Марина Константиновна, доц. каф. оборуд. и технол. сварочн. пр-ва. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1978). Канд. техн. наук по тепл., электроракетн. двигателям и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 1992). Иссл. в обл. повышения прочности, долговечности и надежности деталей.