

УДК 621.9048.7:62.226.2-192

М. К. СМЫСЛОВА

ВАКУУМНОЕ ИОННО-ИМПЛАНТАЦИОННОЕ И ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ БОЛЬШЕРАЗМЕРНЫХ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН

Приведены результаты исследований физико-химического состояния, эксплуатационных свойств сталей 15X11МФ, 20X13 и титановых сплавов ТС5, ВТ6 после комбинированного вакуумного ионно-имплантационного и ионно-плазменного модифицирования поверхности. Данные результаты легли в основу разработки технологии и оборудования упрочнения рабочих лопаток паровых турбин, которые обеспечивают значительное повышение их эксплуатационных свойств, надежности и долговечности. Комбинированные вакуумные технологии; ионная имплантация; упрочнение лопаток паровых турбин

Рабочие лопатки (РЛ) последних ступеней цилиндра низкого давления (ЦНД), являясь наиболее высоконагруженными и ответственными деталями паровых турбин, работают в сложных условиях влажно-паровой эрозии, коррозионного воздействия и знакопеременных нагрузок. Результатами данных эксплуатационных воздействий являются износ и повреждение кромок (рис. 1), усталостные разрушения и обрывы пера, различной величины коррозионные язвы поверхности.

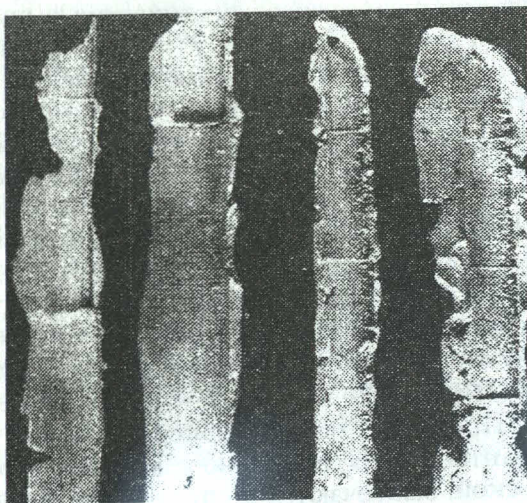


Рис. 1. Изношенные лопатки паровой турбины из стали 20X13, наработка 72000 ч

Все это не только ухудшает эксплуатационные свойства рабочей лопатки паровой турбины, но и снижает надежность и экономичность турбины. Для повышения сопротивления влажно-паровой эрозии входные кромки

лопаток из высокохромистых сталей защищают путем напайки или приварки стеллитовых пластин [1] (на ОАО «Ленинградский металлургический завод» (ЛМЗ), г. С.-Петербург и ОАО «Уральский турбомоторный завод» (УТМЗ), г. Екатеринбург), нанесения электроискровых покрытий и упрочнения ТВЧ-закалкой (на ОАО «Турбоатом», г. Харьков) и др. [2].

Однако применение данных способов защиты РЛ проблему эрозии в полной мере не решают и характеризуются следующими недостатками: повышается эрозионная стойкость лишь ограниченных участков поверхности лопатки; на границах упрочненных и неупрочненных участков возникают различные краевые эффекты, усиливающие коррозионные процессы; нет защиты выходных кромок (известно, что уменьшение хорды лопаток и возникновение концентраторов напряжений в прикорневой зоне в результате эрозии металла приводят к уменьшению ресурса работы лопатки); выступающие за профиль стеллитовые пластины не только значительно уменьшают усталостную прочность, но и ухудшают аэродинамические характеристики лопатки; практически все применяющиеся технологии изменяют физико-химическое состояние поверхности и приводят к появлению дополнительных концентраторов напряжений. Результаты проведенной нами совместно с УТМЗ и ОАО «Мосэнерго» работы, представлены в табл. 1.

Широко применяются для изготовления РЛ стали 20X13, 15X11МФ, ЭИ-961, а в по-

следние десятилетия прошлого столетия стали применяться титановые сплавы ВТ6, ТС5, обладающие высокими прочностными и коррозионными свойствами. Применительно к лопаткам из титановых сплавов указанные способы защиты, а также разрабатываемые методы нанесения покрытий в воздушной атмосфере оказались неприемлемыми не только ввиду вышеперечисленных недостатков, но и из-за активного газонасыщения поверхности, возникновения концентраторов напряжений, растрескивания.

Таблица 1
Результаты усталостных испытаний образцов из стали 20Х13, обработанных по различным технологическим вариантам

Состояние образцов	Предел выносливости σ_{-1} , МПа, на базе 10^7 циклов (воздух)	Предел выносливости σ_{-1} , МПа, на базе 10^5 циклов (коррозионная среда)
Исходное	320	180
Припайка стеллита	90	80
Приварка стеллита	60	50

В связи с этим можно сделать вывод, что в настоящее время не разработаны технологии, обеспечивающие стойкость к влажно-паровой эрозии, а также усталостную прочность и коррозионную стойкость РЛ из сталей и титановых сплавов.

Наиболее перспективным направлением по изменению эксплуатационных свойств РЛ являются вакуумные ионно-имплантационные и ионно-плазменные технологии [3], уже нашедшие свое применение для упрочнения лопаток газовых турбин [4, 5]. Однако они, как правило, реализуются на отдельных установках в разных вакуумных объемах. Ионная имплантация проводится на специализированных вакуумных установках «Вита», «ИЛУ», «Везувий» и т.п., а ионно-плазменные покрытия наносятся на установках «Булат», ННВ-6. Комбинированная обработка данных процессов в разных вакуумных объемах экономически нецелесообразна и обуславливает появление на границе между ионно-имплантационным состоянием и покрытием ненормированных микронапряжений, оксикарбонитридных образований, приводящих, как следствие, к низкой адгезии и пластичности покрытия. Для исключения указанных недостатков и решения проблемы

упрочнения большемерных ($L \geq 1500$ мм и массой ~ 20 кг) РЛ паровых турбин из сталей и титановых сплавов наиболее перспективными являются комбинированные методы, реализуемые в едином вакуумном объеме и включающие в себя электронное, ионно-имплантационное модифицирование поверхности с последующим осаждением ионно-плазменных покрытий на основе нитридов и карбидов тугоплавких металлов.

Учитывая актуальность проблемы, мы разработали технологии упрочнения и оборудование для их реализации применительно к РЛ ЦНД паровых турбин из сталей и титановых сплавов. В ходе разработки технологий проведено: исследование возможностей ионных газовых источников и устройств для формирования металлической плазмы с целью их использования для обработки большемерных лопаток паровых турбин в одном вакуумном объеме; изучение физико-химического состояния поверхностного слоя и механических свойств в связи с комбинированной вакуумной ионно-имплантационной и ионно-плазменной обработкой; разработка режимов комбинированной обработки; исследование эксплуатационных свойств после комбинированной обработки; разработка пакета технологий и оборудования для упрочнения РЛ паровых турбин с использованием комбинированной обработки.

В настоящее время имеются различные газовые источники для проведения ионной имплантации: высокоэнергетические импульсные ($En = 20-500$ кэВ, $j = 50-150$ А/см²); высокоэнергетические непрерывного действия ($En = 20-80$ кэВ, $j = 10-50$ мкА/см²); низкоэнергетические источники объемных газовых разрядов низкого давления ($En \leq 1$ кэВ); низкоэнергетические источники газоразрядной плазмы несамостоятельного дугового разряда низкого давления с полым катодом ($En \leq 1$ кэВ, $j = 15$ мА/см²); низкоэнергетические источники на основе двухступенчатого вакуумно-дугового разряда (ДВДР) ($En = 1$ кэВ, $j = 15$ мА/см²).

Преимущества низкоэнергетической имплантации, по сравнению с высокоэнергетической, заключаются в следующем: большие глубины проникновения легирующего элемента, низкотемпературный разогрев поверхности, снятие остаточных напряжений (ОН) после механической обработки, высокие эксплуатационные свойства (σ_{-1} , износостойкость) в сочетании с технологичностью и экономичностью обработки. Поэтому в данной

работе была принята за основу низкоэнергетическая имплантация азотом.

Требования, предъявляемые к источникам газовой плазмы для ионно-имплантационной обработки, следующие: плотность ионного тока порядка $j = 5...10 \text{ мА/см}^2$; неравномерность плотности ионного тока по сечению $\leq 10...15\%$; диаметр пучка не менее 300 мм; возможность трансформации аксиально-симметричных плазменных источников в протяженные для равномерного облучения больших изделий; широкий спектр плазмообразующих газов (аргон, азот, ацетилен и т. п.); простота конструкции, низкая стоимость; совместимость с другими плазменными источниками при одновременной работе в едином вакуумном объеме; стабильность и долговечность в эксплуатации.

Требования к выбору источников металлической плазмы, обеспечивающих нанесение тугоплавких покрытий, следующие: высокая скорость осаждения покрытия ($v \geq 20 \text{ мкм/ч}$); диаметр плазменного пучка не менее 200 мм с неравномерностью не более 5% по толщине покрытия; высокая степень ионизации испаряемого материала; минимальное количество капельной фазы; возможность испарения различных тугоплавких металлов и их сплавов; возможность трансформации из аксиально-симметричных плазменных источников в протяженные; простота конструкции, низкая стоимость; совместимость при работе с другими источниками плазмы.

Отвечают поставленным требованиям и заслуживают внимания газовые источники нейтральных молекул МГТУ «Станкин» (Москва). Ведет обработку больших площадей с высокой равномерностью по сечению источник МАИ (ИПА) (Москва), который может работать в режиме «до ускорения» ионов путем приложения отрицательного смещения к обрабатываемому изделию.

Известны технологические газовые источники с накаливаемым катодом (Томск), которые дают наибольшую плотность ионного тока, плазма такого разряда может генерироваться одновременно с металлической плазмой и осуществлять ассистирование напыления покрытий.

Большой интерес для решения вопроса ионно-имплантационной и ионно-плазменной обработки с использованием одного устройства представляет организация двухступенчатого вакуумно-дугового разряда. На рис. 2 представлена схема электродной системы для реализации ДВДР.

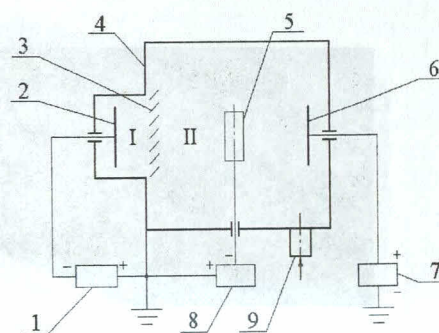


Рис. 2. Электрическая схема системы для обработки в ДВДР с отдельными источниками питания: 1 — источник питания электродугового испарителя (ЭДИ); 2 — катод ЭДИ; 3 — оптически непрозрачный экран; 4 — корпус вакуумной камеры; 5 — обрабатываемое изделие; 6 — дополнительный анод; 7 — источник питания газового разряда; 8 — высоковольтный источник питания; 9 — натекаль газа

Разряд возбуждается в вакуумной камере 4, содержащей массивный водоохлаждаемый катод 2 из эродируемого материала, дополнительный анод 6 и расположенный между ними оптически непрозрачный, но проницаемый для электронов и электрического поля экран 3. Экран 3 является границей двух разнородных в физическом отношении областей: области I, заключенной между катодом 2 и экраном 3, заполненной металлической плазмой, генерированной электродуговым испарителем; области II, расположенной между экраном 3 и дополнительным анодом 6 и заполненной газовой плазмой. Экран препятствует проникновению в область газовой плазмы ионов металла, распространяющихся из катодных пятен вакуумной дуги по прямолинейным траекториям, и формирует границу металлической плазмы. Электрическое поле анода, проникая к границе металлической плазмы, ускоряет ее электронный компонент, который ионизирует газ в области II.

Использование ДВДР позволяет один и тот же источник плазмы использовать как для проведения ионной имплантации, так и для последующего нанесения покрытий. В связи с этим конструкция вакуумной камеры существенно упрощается. При разработке технологии упрочнения титановых лопаток за основу был выбран газовый источник МАИ (ИПА), который был встроен в вакуумный объем на базе установки ЭЛУ-9Б. При обработке стальных лопаток для организации газовой плазмы был использован ДВДР. Нанесение покрытий проводилось с использованием электродуговых испарителей типа ЭДИ-140 и ЭДИ-180, отвечающих поставленным требованиям.

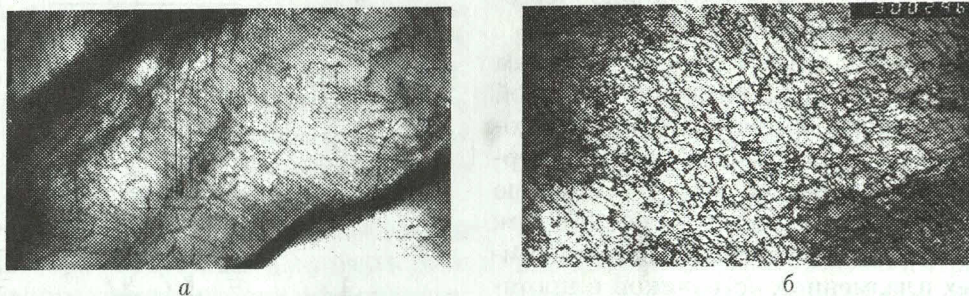


Рис. 3. Структура поверхности образца из сплава ТС5: *a* — исходное состояние (механическое полирование), $\rho = 3,5 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$; *б* — имплантированное состояние, $\rho = 17,3 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$

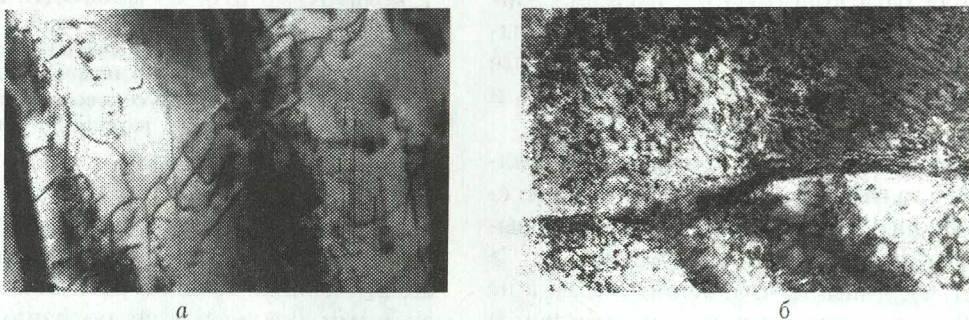


Рис. 4. Структура поверхности образца из сплава ВТ6: *a* — исходное (отожженное) состояние, $\rho = 8,8 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$; *б* — имплантированное состояние, $\rho = 18 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$

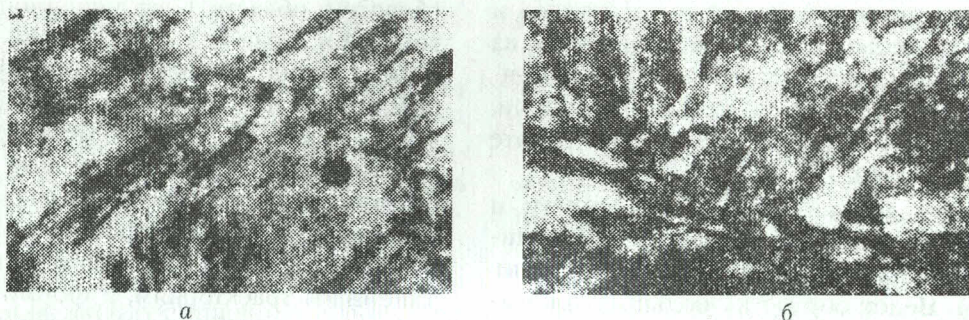


Рис. 5. Структура поверхности образца из стали 20X13: *a* — исходное состояние (закаленное) $\rho = 1,8 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$; *б* — имплантированное состояние, $\rho = 1,2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$

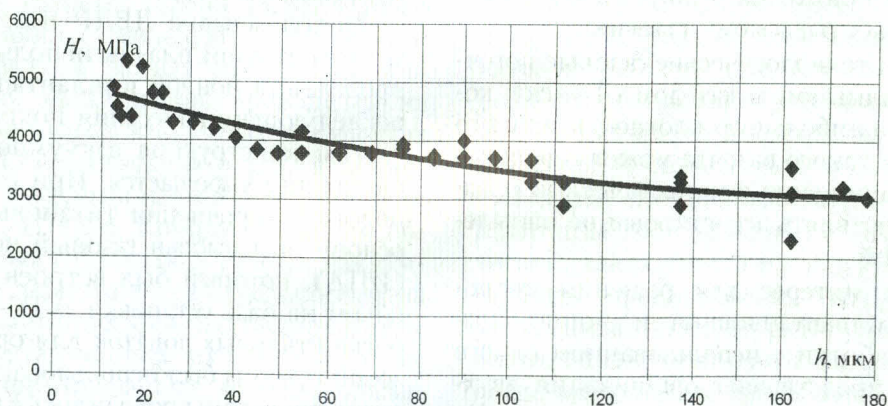


Рис. 6. Микротвердость модифицированного ионной имплантацией слоя сплава ТС5 при нагрузке 50 г

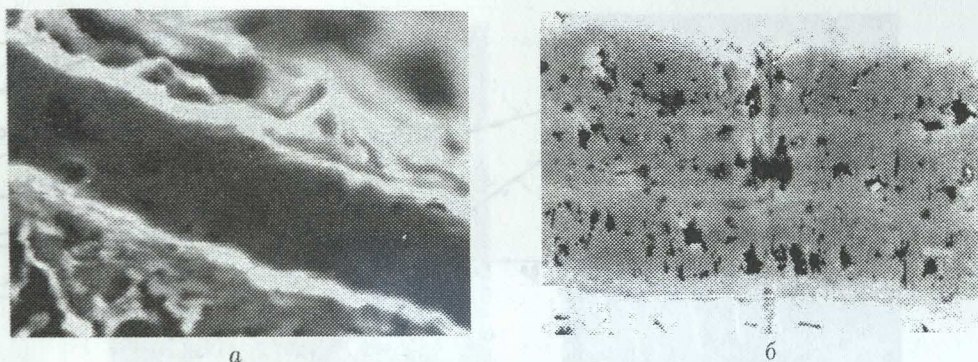


Рис. 7. Микроструктура покрытия, нанесенного на сплав ВТ6 (а) и на сталь 20Х13 (б) ($\times 1000$)

Исследование физико-химических изменений в сталях и титановых сплавах ВТ6, ТС5 в связи с комбинированной вакуумной ионно-имплантационной и ионно-плазменной обработкой было проведено с использованием оптической и электронной микроскопии, ОЖЕ-спектрометрии и рентгеноструктурного анализа.

Процесс низкоэнергетической ионной имплантации сопровождается внедрением ионов азота до глубин 8... 10 мкм с образованием твердых растворов внедрения и упрочняющих нитридных фаз, а также значительным изменением дислокационной структуры: повышением плотности дислокаций и образованием структуры, близкой к сетчатой, до глубин 80... 100 мкм (рис. 3–5). Распределение микротвердости в модифицированном ионно-имплантационном слое приведено на рис. 6. Аналогичный характер изменения микротвердости установлен на сталях 20Х13 и 15Х11МФ.

Выявленные изменения структурно-фазового состава поверхностных слоев материала обеспечивают дислокационное, твердорастворное, дисперсионное упрочнение (см. рис. 3–5), а распыленная и активированная поверхность усиливает взаимодействие ее с наносимым покрытием TiN, что значительно повышает адгезионную прочность покрытия с подложкой. Кроме того, образование нитридных фаз в поверхностном слое обеспечивает плавный переход физико-химических свойств подложки в покрытие TiN. Плазменный нагрев подложки перед нанесением покрытия обеспечивает ее постимплантационный отжиг.

Наносимое ионно-плазменное покрытие TiN (однослойное — толщиной 8 мкм для титановых сплавов, многослойное — 20 мкм для сталей) имеет поверхностную микротвердость $H_v \geq 15000$ МПа (см. рис. 6) и неоднородность не более 8%. Такое покрытие обес-

печивает по сравнению с немодифицированной поверхностью повышение твердости более чем в 3,5 раза.

Микроструктура образцов из сплава ВТ6 с покрытием и из стали 20Х13 представлена на рис. 7.

Проведенное изучение сформированного физико-химического состояния поверхностного слоя титановых сплавов ТС5 и ВТ6 легло в основу разработки режимов ионно-имплантационной и ионно-плазменной обработки, а именно: обезжиривание в УЗ-ванне; вакуумирование камеры до давления $p = 10^{-3}$ Па; очистка поверхности ионами Ag с плотностью ионного тока не менее $1...10$ мА/см²; ионно-имплантационное модифицирование поверхности с дозой $D = 2 \cdot 10^{18} - 2 \cdot 10^{19}$ ион/см² при плотности ионного тока $j = 1...10$ мА/см² и ускоряющем напряжении $U = 0,3...1$ кэВ; постимплантационный отжиг и нагрев ионами Ti перед нанесением покрытия до температуры 400... 500°С; нанесение однослойного или многослойного покрытий TiN или Ti-TiN со скоростью 20 мкм/ч и равномерностью толщины покрытия не менее 8% при ассистировании осаждения газовой плазмой.

По разработанным режимам проведена обработка образцов из сплавов ТС5, ВТ6 и проведены их испытания с определением стойкости к влажно-паровой эрозии, усталостной и адгезионной прочности. Результаты приведены в табл. 2 и на рис. 9, 10, 11.

Стойкость к влажно-паровой эрозии определяли по методике и на стенде Московского энергетического института.

Определение усталостной прочности проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9.302-88 при температуре 20°С на стенде с вибратором типа У-335.

Адгезионную прочность определяли клеевым методом.

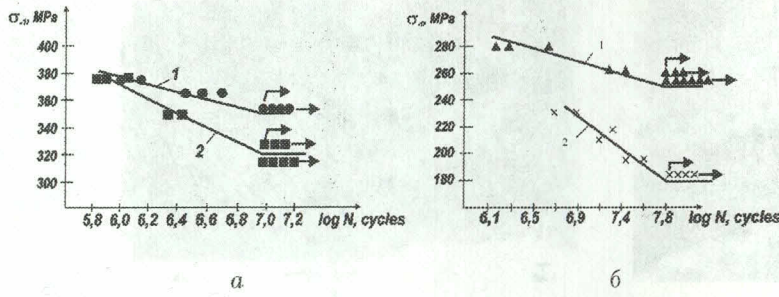


Рис. 8. Кривые усталости образцов из стали 20X13 в воздушной атмосфере (а) и в коррозионной среде (б): 1 — ионная имплантация + многослойное покрытие Ti-TiN; 2 — необработанные образцы

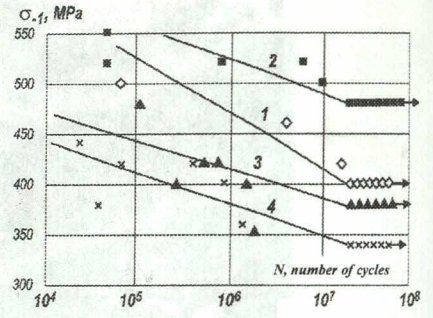


Рис. 9. Результаты усталостных испытаний образцов после различных вариантов обработок: 1 — исходное состояние; 2 — ионная имплантация + покрытие TiN ($h = 8-9$ мкм); 3 — сверхзвуковое нанесение покрытия; 4 — детонационное покрытие

Таблица 2

Результаты исследования эксплуатационных свойств образцов из сплавов ВТ6 и 20X13

Вариант обработки	Относительная эрозийная стойкость		Абсолютная прочность, МПа
	инкубацион. период, $E_{\text{относ}}$	ускоренная эрозия, $E_m \cdot 10^{-3}$	
Исходное состояние ВТ6 ..	1,3	1,5	≥150
Исходное состояние 20X13	1	1,95	
Имплантация азотом + TiN (9 мкм) ВТ6	2,6	0,65	≥150
Имплантация азотом + TiN (20 мкм) 20X13	2,85	0,5	≥150

Коррозионное поведение изучалось измерением электродных потенциалов без тока. Для этого образцы помещались в электрохимическую ячейку с установочными окнами для электрода сравнения и капилляра Лучина-Габбера (см. рис. 8, а). В качестве электрода сравнения использовался хлорсеребряный электрод ($\varphi = 0,25$ В). Измерение потенциала прослеживалось на потенциостате ПН-50-1.1. Определение проводили до установления постоянного значения потенциала.

Схема измерений приведена на рис. 10, а результаты измерений сведены в табл. 3.

Результаты исследований показывают, что на механически полированной поверхности титанового сплава имеется окисная пленка. Аналогичные явления наблюдаются и при ионной имплантации, когда внедренный азот

и дополнительно кислород атмосферы повышают электродный потенциал поверхности как в сталях, так и в сплавах ТС5, ВТ6. В случае покрытия TiN, являющегося полупроводником, электродный потенциал приближается к окиси титана, который является хорошей антикоррозионной защитой.

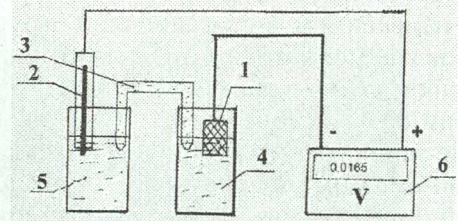


Рис. 10. Схема измерения электродных потенциалов без тока: 1 — образец; 2 — электрод сравнения; 3 — мост; 4 — NaCl — 5% р-р; 5 — KCl р-р; 6 — вольтметр

Таблица 3

Электродный потенциал исследуемых материалов после обработки поверхности

Способ обработки	Материал	φ , эВ
Механическое полирование	ТС5, ВТ6	+0,20
Ионная имплантация N^+ ..	ТС5, ВТ6	+0,22
Ионная имплантация N^+ + (Ti-TiN)	ТС5, ВТ6	+0,16
Механическое полирование	20X13	-0,31
Ионная имплантация N^+ ..	20X13	+0,11
Ионная имплантация N^+ + 4(Ti-TiN)	20X13	+0,18

Проведенные исследования эксплуатационных свойств сталей и титановых сплавов после комбинированной обработки показывают: значительное повышение усталостной прочности в воздушной атмосфере и коррозионной среде (см. рис. 8, 9); повышение стой-

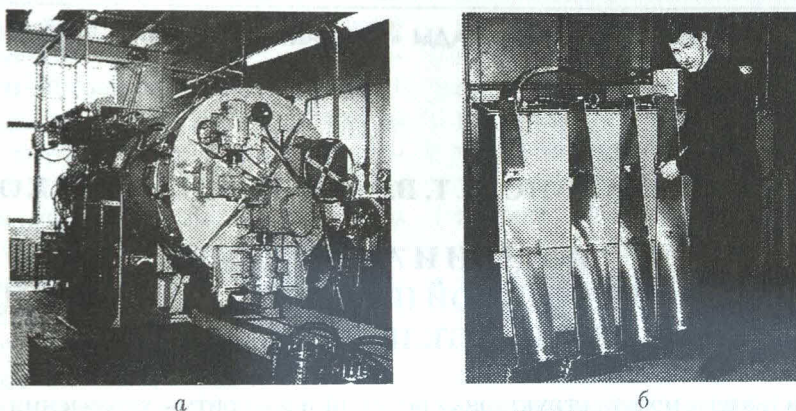


Рис. 11. Внешний вид установки «Мария» (а) и лопаток после обработки (б)

кости к влажно-паровой эрозии в 1,5–3,0 раза (см. табл. 2); повышение адгезионной прочности в 1,6 раза; повышение коррозионной стойкости.

Положительные результаты исследования легли в основу разработки реальной технологии упрочнения РЛ турбин из сталей и титановых сплавов ВТ6, ТС5.

Для реализации технологии упрочнения лопаток паровых турбин были изготовлены вакуумные установки «Мария» для обработки титановых лопаток и «Виктория» — для обработки титановых и стальных лопаток.

Установки позволяют осуществлять применительно к крупногабаритным изделиям из конструкционных материалов: электронный нагрев путем использования несамостоятельного дугового разряда низкого давления с током разряда $I_p = 150\text{--}800$ А; ионно-имплантационное модифицирование поверхности, реализующее радиационно-стимулируемую диффузию легирующих ионов, обеспечивающее дислокационное, твердорастворное и дисперсионное упрочнение, а также ионное легирование путем использования плазменных ускорителей, имеющих плотность ионного тока $j = 1\text{--}10$ мА/см² и ускоряющее напряжение $U = 0,3\text{--}1$ кэВ; очистку поверхности ионами Ag^+ , Ti^+ , Cr^+ , Ta^+ , V^+ и др., с последующим осаждением покрытий из этих металлов, а также покрытий из карбидов и нитридов металлов со скоростью до 20 мкм/ч и равномерностью толщины не более 8% на длине до 1500 мм; ассистирование процесса осаждения покрытий металлов, нитридов и карбидов ионами из газовой плазмы, которая генерируется плазменными ускорителями.

Внешний вид установки «Мария» и лопаток после обработки приведен на рис. 11.

Разработанные технологии и оборудование внедрены на базе ФГУП «НПП „Мотор“» и «УЗМ „Магнетрон“» (Уфа). РЛ паровых турбин из титановых сплавов, обработанные по данной технологии, эксплуатируются на электростанциях Финляндии, Ирана, Китая, поставлены на электростанции Индии. Стальные лопатки эксплуатируются на опытной турбине в ОАО «Мосэнерго».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фаддеев Н. П. Эрозия влажнопаровых турбин. Л.: Машиностроение, 1974. 262 с.
2. Гонсеровский Ф. Г., Петреня Ю. К., Силевич В. М. Долговечность паротурбинных рабочих лопаток с учетом ремонта в условиях электростанций // Электрические станции. 2000. № 3. С. 28–35.
3. Гусева М. И. Ионная имплантация в неполупроводниковые материалы // Итоги науки и техники. М., 1989. Т. 5. С. 5–49.
4. Смылов А. М., Лесунов В. П., Гребенюк Г. П. Пути снижения повреждаемости рабочих лопаток компрессоров авиационных ГТД // Авиационная промышленность. 1992. № 12. С. 50–51.
5. Мухин В. С., Смылов А. М., Боровский С. М. Модифицирование поверхности деталей ГТД по условиям эксплуатации. М.: Машиностроение, 1995. 256 с.

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.

