

УДК 621.793.324:621.452

**Р. Р. НЕВЬЯНЦЕВА, А. А. БЫБИН,  
Е. В. ПАРФЕНОВ, Н. Ф. ИЗМАЙЛОВА**

**ВЫБОР СПОСОБА УДАЛЕНИЯ ПОКРЫТИЯ TiN  
С ПОВЕРХНОСТИ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ  
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ  
РЕМОНТА ЛОПАТОК ЭНЕРГОУСТАНОВОК**

Проведено комплексное исследование физико-химического состояния поверхности и некоторых эксплуатационных характеристик мартенситной стали после удаления с ее поверхности дефектного покрытия нитрида титана химическим и электролитно-плазменным способами. Показано влияние способов съема покрытия на характеристики стальной поверхности и установлена возможность применения указанных способов обработки для создания ремонтной технологии в серийных условиях. *Рабочая лопатка ; мартенситная сталь ; покрытие нитрида титана ; удаление покрытия ; химический способ ; электролитно-плазменный способ ; рекомендации для технологии ремонта*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Ионно-плазменные нитридные покрытия, в частности TiN, позволяют защитить рабочие лопатки газотурбинного двигателя и паровых турбин от коррозионного и газоабразивного износа в течение заданного срока эксплуатации [1, 2]. При нарушении технологического процесса напыления на пере лопаток могут появляться различные дефекты, недопустимые по условиям эксплуатации изделия. Для повышения выхода годной продукции в серийном производстве необходимо наличие технологии ремонта, позволяющей проводить удаление покрытия нитрида титана с созданием поверхности деталей, пригодной для повторного его нанесения.

### **1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА**

Удаление покрытия TiN с ремонтных лопаток может проводиться с использованием химического и электролитно-плазменного способов [3–5]. Для повторного нанесения качественного защитного покрытия поверхность стали не должна содержать оксидных пленок или других продуктов взаимодействия с травильным раствором. Кроме того, согласно требованиям, предъявляемым к рабочим лопаткам, шероховатость поверхности перед нанесением покрытия не должна превышать значения Ra 0,2 мкм. В

процессе эксплуатации под действием различных факторов в поверхностном слое лопаток возникают максимальные напряжения, что может привести к зарождению очагов и развитию трещин усталости. На сопротивление усталости большое влияние оказывает состояние поверхности детали: шероховатость, структурный и фазовый состав, твердость, характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое. В процессе эксплуатации рабочие лопатки авиационных двигателей и паровых турбин взаимодействуют с компонентами воздуха и перегретого пара, в том числе и конденсированной влагой, содержащей агрессивные компоненты. Поэтому одной из наиболее важных характеристик, определяющих работоспособность деталей, является их коррозионная стойкость.

### **2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Цель работы – проведение исследований по влиянию удаления покрытия TiN химическим и электролитно-плазменным способом на физико-химические и механические характеристики мартенситной стали и разработка технологических рекомендаций по ремонту рабочих лопаток энергоустановок.

### **3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Исследования проводили на образцах из мартенситной высоколегированной хромистой стали марки 13X11H2B2MФш (ЭИ961ш). Об-

разцы подвергали термической обработке, шлифованию и полированию до получения шероховатости поверхности не более Ra 0,2 мкм. На подготовленные образцы наносили ионно-плазменное покрытие TiN толщиной 5...7 мкм. При использовании химического способа удаления покрытия TiN применяли травильные растворы, содержащие плавиковую и соляную кислоты (базовая часть), а также азотную кислоту с добавлением уротропина (раствор состава № 1) или фосфорную кислоту (раствор состава № 2). Съем покрытия проводили при комнатной температуре. Электролитно-плазменную обработку (ЭПО) осуществляли в 5% растворе сульфата аммония при напряжении на ячейке 200 В и температуре раствора 70 °С [5]. Измеряли шероховатость и твердость поверхности, величину электродного потенциала и токов коррозии относительно хлорсеребряного электрода, определяли распределение остаточных напряжений в поверхностном слое, изучали микроструктуру поверхности подложки, выполняли испытание на усталость при комнатной температуре с последующим фрактографическим анализом изломов.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В таблице представлены физико-механические характеристики мартенситной стали марки ЭИ961ш в исходном состоянии, а также после удаления покрытия TiN различными способами.

Характеристики стальной поверхности после удаления ионно-плазменного покрытия химическим способом зависят от состава электро-

лита травления. После обработки образцов в растворе состава № 1 происходит незначительное возрастание шероховатости поверхности, что связано с растравливанием областей сплава вокруг мартенситных игл, обусловленным окислительным действием азотной кислоты. В то же время входящая в состав травильного раствора плавиковая кислота обеспечивает создание на поверхности вязкой пленки из плохо растворимых фторидов, что в свою очередь приводит к небольшому снижению твердости стальной поверхности по сравнению с ее исходным состоянием.

Использование травильного раствора состава № 2, в котором активный компонент – азотная кислота – заменен на менее активный – фосфорную кислоту, обеспечивает уменьшение шероховатости поверхности до двух раз по сравнению с раствором состава № 1. В данном случае поверхность стали, освобожденная от покрытия TiN, пассивируется пленкой фосфатов железа и не подвергается дальнейшему травлению. Формирование в процессе травления такой пленки обуславливает снижение твердости поверхности в 1,3...1,5 раза по сравнению с исходным состоянием.

Наличие пассивирующей пленки на поверхности образцов после удаления покрытия нитрида титана химическим способом подтверждается и результатами измерения электрохимических характеристик. Показано, что поверхность мартенситной стали в исходном состоянии характеризуется электродным потенциалом минус 0,54 В и значением тока коррозии  $1,46 \cdot 10^{-3}$  А/м<sup>2</sup>.

Таблица

Эксплуатационные свойства стали ЭИ961ш при различном состоянии поверхности

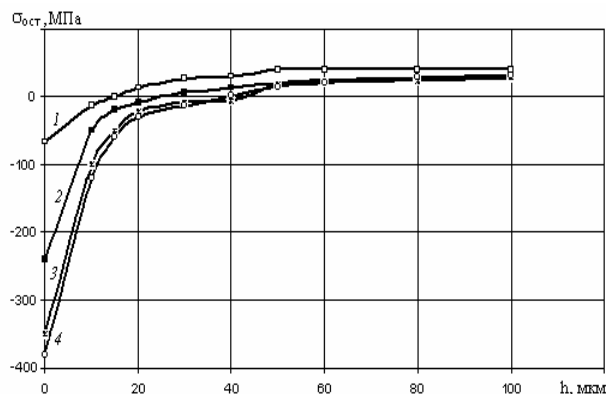
Состояние поверхности	Шероховатость поверхности Ra, мкм	Твердость поверхности, НВ	Электродный потенциал поверхности, В	Ток коррозии, $\times 10^{-3}$ , А/м <sup>2</sup>	Предел выносливости, МПа (20 $\times 10^6$ циклов)
Исходное состояние до нанесения покрытия TiN	0,15...0,20	332...351	– 0,54	1,46	420
После ремонта электролитно-плазменным способом	0,06...0,09	364...402	– 0,50	1,37	440
После ремонта химическим способом в растворе:	0,19...0,21	286...302	– 0,43	1,24	400
	– состава № 1 – состава № 2	0,10...0,11 207...248	– 0,36	1,11	430

Создание пассивной пленки приводит к сдвигу потенциала поверхности в область менее отрицательных значений и уменьшению величины токов коррозии, что свидетельствует о снижении активности стальной поверхности. Так, формирование пленки, состоящей из комплексных соединений фторидов металла, обеспечивает снижение активности поверхности в 1,2...1,3 раза, а пленки из фосфатов железа – в 1,3...1,5 раза. Полученные данные свидетельствуют о положительной роли пассивирующего слоя на стальной поверхности и о большем снижении ее активности в случае создания пленки из фосфатов железа.

Обработка образцов с использованием электролитной плазмы обеспечивает уменьшение шероховатости поверхности в среднем в 2,7 и 1,5 раза по сравнению с химическим травлением в растворах № 1 и № 2 соответственно. Получение более высокого класса чистоты поверхности обусловлено не только особенностями электрохимического растворения поверхностного слоя, но и гидродинамическим воздействием парогазовой оболочки на обрабатываемую поверхность [6]. Одновременно поверхность испытывает воздействие электрических разрядов, что приводит к ее упрочнению и, как следствие, повышению твердости в 1,3 и 1,7 раза по сравнению с обработкой в растворах № 1 и № 2 соответственно.

Установлено также, что использование электролитно-плазменного метода для удаления покрытия TiN приводит к созданию поверхности, обладающей электродным потенциалом минус 0,5 В и значением тока коррозии  $1,37 \cdot 10^{-3} \text{ А/м}^2$ , что практически не отличается от исходного состояния.

Различное воздействие рассматриваемых способов обработки на поверхность мартенситной стали сказывается и на формировании в поверхностном слое остаточных напряжений. Следует иметь в виду, что в серийном производстве поверхность образцов в исходном состоянии с целью нанесения на нее качественного ионно-плазменного покрытия подвергается механическому полированию. Данный вид обработки приводит к наведению в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия [7]. Экспериментально установлено, что непосредственно на поверхности напряжения достигают значений 360 МПа (рис. 1).



**Рис. 1.** Эпюра остаточных макронапряжений в поверхностном слое стали ЭИ961ш после различных вариантов обработки: 1 – после ремонта химическим способом в растворе состава № 1; 2 – после ремонта химическим способом в растворе состава № 2; 3 – после электролитно-плазменной обработки; 4 – исходное состояние до нанесения покрытия

При воздействии на поверхность электролитной плазмы наблюдается упрочнение поверхностного слоя и наведение остаточных сжимающих напряжений. При этом уровень напряжений и характер их распределения по глубине образцов после проведения процесса ЭПО идентичен эпюре напряжений для исходного состояния поверхности, подвергнутой механическому полированию. Удаление покрытия TiN химическим способом в растворах обеих составов приводит к уменьшению значений напряжений сжатия до 50 и 250 МПа для растворов состава № 1 и № 2 соответственно. В данном случае имеет место процесс химического травливания напряженного слоя металла, возникшего при механической обработке образцов. При использовании травильного раствора состава № 1 в силу его большей активности наблюдается более значительный сьем поверхностного слоя мартенситной стали и, соответственно, максимальное снижение уровня сжимающих напряжений. Формирование на поверхности более пассивной пленки фосфатов железа при использовании травильного раствора состава № 2 практически предотвращает растрыв подложки, в связи с чем уровень сжимающих напряжений остается достаточно высоким.

Одной из основных эксплуатационных характеристик роторных лопаток изделий является сопротивление усталости. Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что предел выносливости также зависит от способа удаления дефектного покрытия при ремонте. В исходном состоянии после операции механического полирования предел выносливости составляет 420

МПа. Удаление покрытия TiN с использованием электролитно-плазменного способа и химического в растворе состава № 2 приводит к незначительному возрастанию предела выносливости. Фрактографическим анализом установлено, что очаги зарождения усталостной трещины во всех случаях располагаются непосредственно на поверхности и имеет место как межкристаллитный, так и квазивязкий механизм разрушения. Применение при ремонте операции химического травления в растворе состава № 1 приводит к снижению сопротивления усталости на 20 МПа по сравнению с исходным состоянием поверхности. В данном случае очагом разрушения служат области растравливания материала вокруг мартенситных игл, а механизм разрушения носит преимущественно межкристаллитный характер.

Авторы работ [8, 9] отмечают, что предел выносливости зависит от ряда параметров состояния поверхности: шероховатости, остаточных напряжений и др. Наибольший удельный вклад в снижение сопротивления усталости вносит повышенная шероховатость поверхности. Из данных, приведенных в таблице, следует, что минимальные значения шероховатости поверхности имеют место после электролитно-плазменной обработки. Анализ профилограмм микронеровностей поверхности в исходном состоянии и после электролитно-плазменной обработки показал, что после ЭПО не только снижается высота микронеровностей, но также изменяется их профиль. Для них характерно более плавное очертание и отсутствие единичных острых впадин. Формирование при электролитно-плазменной обработке такого благоприятного профиля в совокупности с уровнем и характером распределения остаточных напряжений способствует возрастанию сопротивления усталости и, как следствие, увеличению долговечности лопаток.

В отличие от электролитно-плазменной обработки при химическом удалении покрытия TiN в растворе состава № 1 происходит не только растравливание областей вокруг мартенситных игл, но и снятие слоя металла, наклепанного при механическом полировании. В результате происходит разупрочнение поверхностного слоя. Кроме того, шероховатость поверхности характеризуется неравномерностью шага и наличием острых впадин. Такие изменения в состоянии поверхности приводят к закономерному снижению сопротивления усталости. В тоже время после химической обработки с использованием раствора состава № 2 замет-

ного растравливания поверхности мартенситной стали не отмечается, что обуславливает сохранение предела выносливости на уровне исходного состояния.

## 5. ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проведенного комплексного исследования позволили разработать технологические рекомендации для удаления дефектного ионно-плазменного покрытия TiN с рабочих лопаток из мартенситных сталей. В связи с тем, что способ электролитно-плазменной обработки и химическое удаление покрытия с использованием раствора состава № 2 обеспечивают необходимый уровень физико-механических и эксплуатационных характеристик материала основы, то указанные способы могут быть успешно применены при ремонте стальных лопаток. Вместе с тем, следует иметь в виду, что при ремонте крупногабаритных и сложнопрофильных деталей с использованием способа ЭПО вследствие неравномерного распределения электрических полей и соответственно парогазовой оболочки по поверхности на деталях могут возникать участки со следами микроразрядов и остатками не удаленного покрытия. В связи с этим данный способ целесообразно применять для обработки только тех деталей, для которых характерно образование равномерной парогазовой оболочки с устойчивым типом ее кипения.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что способы удаления дефектного покрытия нитрида титана оказывают различное влияние на эксплуатационные свойства материала деталей. Электролитно-плазменная обработка по сравнению с химической обработкой обеспечивает наилучшие физико-механические показатели качества поверхности и не приводит к повышению коррозионной стойкости стальной подложки.

2. При использовании химического способа значительное влияние на эксплуатационные свойства поверхности оказывает состав травильного раствора. Наиболее оптимальным следует считать состав электролита, содержащий кроме соляной и плавиковой кислот дополнительно фосфорную кислоту, которая обеспечивает пассивацию поверхности стали за счет образования труднорастворимых слоев фосфатов железа.

3. Разработаны технологические рекомендации по ремонту лопаток с наличием дефект-

ного покрытия TiN с учетом конструктивных особенностей обрабатываемых деталей. Для простых в конструктивном отношении деталей рекомендуется процесс электролитно-плазменной обработки, а при наличии труднообрабатываемых участков целесообразно использование химического способа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стяжкин, В. А.** Вакуумно-плазменные покрытия системы Ti-N для компрессорных лопаток турбины / А. В. Стяжкин, А. А. Копылов, С. Я. Палева // Защита металлов, 2000. Т. 36. № 3. С. 328–329.
2. **Смыслов, А. М.** Упрочнение лопаток газотурбинных приводов газоперекачивающих агрегатов и установок / А. М. Смыслов, В. В. Седов, С. П. Павлинич и др. // Газотурбинные технологии, 2006. № 6. С. 12–15.
3. **Амирханова, Н. А.** Влияние природы и состава электролита на удаление покрытия нитрида титана / Н. А. Амирханова, Р. Р. Невьянцева, Т. М. Тимергазина и др. // Оптимизация процессов обработки конструкционных материалов: межвуз. тематич. науч. сб. Уфа : УГАТУ, 1996. С. 121–127.
4. **Пат. РФ № 2081207 C23F1/44, 1/26.** Раствор для удаления покрытий из нитрида и карбонитрида титана / Н. А. Амирханова, Р. Р. Невьянцева, Т. М. Тимергазина. Опубл. 1997. Бюл. № 16.
5. **Пат. РФ № 2094546 C25F5/00.** Способ удаления покрытия с металлической подложки / Н. А. Амирханова, Р. Р. Невьянцева, В. А. Белоногов, Т. М. Тимергазина. Опубл. 1997. Бюл. № 30.
6. **Nevyantseva, R. R.** The influence of vapor-gaseous envelope behavior on plasma electrolytic coating removal / R. R. Nevyantseva, S. A. Gorbakov, E. V. Parfenov et al // Surface and Coatings Technology, 2001. № 148. P. 30–37.
7. **Мухин, В. С.** Поверхность: технологические аспекты прочности деталей ГТД / В. С. Мухин. М. : Наука, 2005. 296 с.
8. **Аскинази, Б. М.** Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой / Б. М. Аскинази. М. : Машиностроение, 1977. 184 с.
9. **Сулима, А. М.** Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А. М. Сулима, М. И. Евстигнев. М. : Машиностроение, 1974. 256 с.

### ОБ АВТОРАХ



**Невьянцева Римма Рахимзяновна**, доц. каф. общ. химии. Дипл. инж.-металлург и физ.-химик (Челябинск. политехн. ин-т, 1965). Канд. хим. наук по неорг. химии (защ. в ИПФ СО АН СССР, 1972). Иссл. в обл. ремонта лопаток авиац. двиг.



**Быбин Андрей Александрович**, доц. каф. технологии машиностроения. Дипл. инж. по автоматиз. технол. процессов и производств (УГАТУ, 2000). Канд. техн. наук по тепл., электроракетн. двиг. и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. технологий восстановительного ремонта деталей газовых турбин.



**Парфенов Евгений Владимирович**, доц. каф. теор. основ электротехн. Дипл. инж. по пром. электронике (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по автоматиз. и упр. технол. процессами и производствами (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. упр. технол. процессами, цифровой обработки сигналов.



**Измайлова Наиля Федоровна**, нач. бюро отдела гл. металлурга ОАО УМПО. Дипл. инж. по технологии машиностроения (УАИ, 1979). Иссл. в обл. упрочнения поверхности деталей газовых турбин концентрированными потоками энергии