

А. М. Смыслов, А. Д. Мингажев, М. К. Смыслова, К. С. Селиванов, А. А. Мингажева

НАНОСЛОЙНОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Рассматривается возможность получения вакуумно-плазменных нанослойных покрытий для лопаток турбомашин из титановых сплавов совмещением процессов электродугового осаждения и ионной имплантации. Приводятся результаты исследования стойкости к капельно-ударной эрозии, солевой коррозии и газоабразивной эрозии. *Газоабразивная эрозия; нанослойные покрытия; нанослойный титановый сплав; вакуумно-плазменные нанослойные покрытия*

Рабочие лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) и газотурбинной установки (ГТУ), а также паровых турбин в процессе эксплуатации подвергаются воздействиям значительных динамических и статических нагрузок, а также коррозионному и эрозионному разрушению. Исходя из предъявляемых к эксплуатационным свойствам требований, для изготовления лопаток компрессора газовых турбин применяются титановые сплавы, которые по сравнению с техническим титаном имеют более высокую прочность, в том числе и при высоких температурах, сохраняя при этом достаточно высокую пластичность и коррозионную стойкость (например, титановые сплавы марок ВТ6, ВТ8, ВТ14, ВТ3-1, ВТ22 и др.). Указанные сплавы широко применяются, например, для изготовления рабочих и направляющих лопаток турбин, работающих в условиях газоабразивной и влажно-паровой среды, при температурах до 500–540 °С. Лопатки турбин из титановых сплавов обладают повышенной чувствительностью к концентраторам напряжения. Поэтому при изготовлении или ремонте деталей из титановых сплавов действуют повышенные требования к микро- и макрогеометрии поверхности, точности изготовления размеров, плавности переходов между сечениями и проч. Кроме конструктивных концентраторов напряжений на поверхности деталей при эксплуатации дополнительно возникают различного рода дефекты, снижающие прочность и надежность работы всего изделия в целом.

Для защиты лопаток от эксплуатационного воздействия традиционно используют высокопрочные защитные покрытия или стеллитовые пластины, снижающие эрозионный износ. Известные способы повышения стойкости лопаток к влажно-паровой эрозии [1, 2] припайкой или приваркой стеллитовых пластин, электроискровое и кластерное упрочнение, плазменное, дето-

национное напыление, ТВЧ-закалка – малоприменяемы или неприменимы для титановых сплавов из-за большой склонности этого материала к окислению при нагреве и последующему растрескиванию. В результате в поверхности появляются недопустимые дефекты основного материала и материала покрытия [3].

Известен способ ионной имплантации [4, 5] путем облучения поверхности ионами легирующих элементов с энергиями 300 кЭВ и дозой до $2 \cdot 10^{19}$ ион/см² [4] с последующим стабилизирующим отжигом. Однако малая глубина модифицированного слоя поверхности (до 1–2 мкм) не может обеспечить необходимую долговечность изделия при его эксплуатации в условиях влажно-паровой или абразивной эрозии. Для лопаток из титановых сплавов эта задача может быть решена сочетанием ионно-имплантационной обработки поверхности с последующим нанесением высокотвердого защитного ионно-плазменного покрытия [6], что должно обеспечить заданные эксплуатационные свойства.

В этой связи, настоящая работа посвящена созданию эрозионностойкого ионно-плазменного покрытия и технологии его нанесения, позволяющего повысить стойкость лопаток из титановых сплавов к солевой коррозии, пылевой и капельно-ударной эрозии при одновременном повышении выносливости и циклической прочности деталей с защитными покрытиями.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Предлагаемый способ получения эрозионностойкого нанослойного покрытия для лопаток турбомашин из титановых сплавов заключается в следующем. На поверхность лопатки производят вакуумно-плазменное осаждение выбранного металлического подслоя и нанослоев из нитридов, карбидов и/или карбонитридов алюминия или соединения титана, циркония и алюминия с азотом и/или углеродом. При этом после осаждения подслоя и каждого нанослоя проводят его ионно-имплантационную обработку.

Нанослои формируют при вращении лопаток вокруг собственной оси и относительно последовательно расположенных катодов, а ионно-имплантационную обработку осуществляют устройствами для имплантации ионов, расположенными между катодами [7]. Имплантационную обработку проводят ионами легирующих элементов (например Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией) при энергии ионов от 0,2 до 300 кэВ и плотности ионов от 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см². Для более качественного формирования нанослоев производят взаимное экранирование потоков распыляемого материала при помощи экранов, расположенных между катодами и устройствами имплантируемых ионов. При осаждении нанослоев используют составные катоды, содержащие либо титан и цирконий, либо титан, алюминий и цирконий. Дополнительно, перед нанесением металлического подслоя поверхность лопатки подвергают имплантации ионами легирующих элементов при энергии ионов от 0,2 до 300 кэВ и дозе имплантации ионов от 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см² и постимплантационному отжигу. Имплантацию, постимплантационный отжиг и нанесение покрытия производят в одном вакуумном объеме за один технологический цикл. При нанесении покрытия и его ионно-имплантационной обработке, в зависимости от вида покрытия, обеспечивают толщины нанослоев в диапазоне от 0,1 до 20 нм. Заданную толщину нанослоя (t_i , нм) получают регулированием количества материала, осаждаемого на деталь за пол-оборота детали вокруг собственной оси относительно потока осаждаемого материала, и скорости вращения детали вокруг собственной оси. Для расчета скорости вращения детали:

$$\tau_i = t_i / v_i, \quad (1)$$

где τ_i – заданное время полуоборота детали вокруг собственной оси, обеспечивающее формирование нанослоя заданной толщины из i -го компонента; t_i – заданная толщина нанослоя покрытия, сформированная из i -го компонента:

$$t_i = v_i \cdot \tau_i, \quad (2)$$

где v_i – средняя скорость наращивания покрытия из i -го компонента, образующего монослой покрытия;

$$v_i = H_i / \tau, \quad (3)$$

где H_i – суммарная толщина слоев, сформированных из i -го компонента в покрытии, нанесенном при вращении детали; τ – время формирования покрытия заданной толщины.

В качестве i -х компонентов используют нитриды, карбиды и/или карбонитриды титана, циркония, алюминия и нитриды, карбиды и/или

карбонитриды соединений этих металлов ($i = 1, 2, 3 \dots 20$).

2) для соотношения скорости осаждения (наращивания) i -х компонентов:

$$k = v_i / v_{i+1} = H_i / H_{i+1}, \quad (4)$$

где k – коэффициент, указывающий на необходимость превышения (снижения) скорости осаждения i -го компонента по сравнению со скоростью $(i+1)$ -го компонента; v_{i+1} – средняя скорость наращивания покрытия из $(i+1)$ -го компонента; H_{i+1} – суммарная толщина слоев, сформированных из $(i+1)$ -го компонента в покрытии, нанесенном при вращении детали.

Для повышения качества микрогеометрии поверхности лопатки перед нанесением покрытия осуществляют электролитно-плазменное полирование. Для этого лопатку погружают в водный раствор электролита и прикладывают к ней положительное по отношению к электролиту электрическое напряжение, под действием которого между поверхностью обрабатываемого изделия и электролитом образуется парогазовый слой, а процесс полирования осуществляют по крайней мере в три этапа, на первом из которых к обрабатываемой лопатке прикладывают электрическое напряжение от 120 до 170 В, выдерживают ее при этом напряжении в течение 0,3–0,8 мин., на втором этапе это напряжение увеличивают до 210–350 В, выдерживают лопатку при этом напряжении в течение 1,5–5,0 минут, затем осуществляют третий этап полирования лопатки. Для этого, не вынимая лопатку из электролита, отключают электрическое напряжение, удаляют лопатку из электролита, охлаждают лопатку, вновь прикладывают к ней положительное по отношению к электролиту электрическое напряжение от 210 до 350 В, погружают лопатку в электролит и ведут полирование течение 0,8–2,5 минут. В качестве электролита используют водный раствор солей со значением рН 4–9, причем в течение первого и второго этапов обработки обеспечивают непрерывную подачу электрического напряжения, включая момент перехода от первого этапа ко второму. Для исследования стойкости лопаток из титановых сплавов на солевую и газовую коррозии, газообразивную и капельно-ударную эрозию были изготовлены образцы из титанового сплава ВТ-1. Образцы были подвергнуты на экспериментальной вакуумно-плазменной установке нескольким вариантам обработки, указанным в табл. 1. Количество образцов группы баллось равным трем.

Таблица 1

Варианты вакуумно-плазменных покрытий

№ группы образцов	Ионы, имплантируемые в основу	Ионы, имплантируемые в покрытие	Материал слоев и схема их чередования
1*	N	–	-Ti-TiN-TiN-
2	N+Cr	N	-TiC-TiN-TiNC-
3	Y	N	-TiAlN-TiN-TiAlN-
4	Yb	Y	-ZrC-ZrN-ZrNC-ZrN-
5	C	N	-ZrTiN-ZrN-ZrCN-
6	B	Cr	-TiAlN-TiCN-TiN-TiCN-
7	Zr	Y	-ZrC-ZrN-ZrN-
8	Y+N	Cr	-ZrC-ZrCN-ZrN-
9	Y+Zr	Zr	-ZrAl-ZrN-ZrAl-ZrN-
10	Zr+N	Zr	-ZrC-ZrN-ZrC-ZrN-

Примечание: * – Прототип покрытия [6]

Режимы обработки образцов и нанесения покрытия: ионная имплантация (ионами N, Cr, Y, Yb, C, B, Zr) с энергией $E = 0,3-30$ кэВ и плотностью облучения $D = 3 \cdot 10^{19}$ ион/см² с последующим постимплантационным отпуском в вакууме при температуре 400 °С в течение 1 ч. Толщины слоев составляли: покрытие-прототип [6] первый слой – металл (Me) толщиной 1 мкм, второй слой – нитрид Me толщиной 2 мкм, при общем количестве слоев 16 при общей толщине покрытия 24 мкм. При формировании нанослойного покрытия [7] его общая толщина составляла 24 мкм, при толщинах нанослоев в диапазоне от 0,1 до 20 нанометров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Стойкость к солевой коррозии исследовалась по ускоренной методике ВИАМ. Сущность методики испытания заключается в ускорении коррозионного процесса под влиянием ионов хлора при высоких и быстроменяющихся температурах и относительной влажности воздуха, приближенных к условиям эксплуатации лопаток. Кроме этого, проводилась оценка глубины коррозионных повреждений общепринятым металлографическим методом на наклонных шлифах (табл. 2). Результаты коррозионных испытаний показали увеличение стойкости образцов с нанослойными покрытиями [7] по сравнению с традиционным [6] в 1,3–1,4 раза.

Стойкость к газоабразивной эрозии исследовалась по методике ЦИАМ [8] в пескоструйной установке «2Г-53» струйно-эжекторного типа. Для обдува использовался кварцевый песок с плотностью $\rho = 2650$ кг/м³, твердость HV 12000. Обдув производился при скорости воздушно-абразивного потока 195–210 м/с, температура потока 265–311К, давление в приемной камере 0,115–0,122 МПа, время воздействия 120 с, концентрация абразива в потоке до 2–3 г/м³,

что несколько выше, чем концентрация пылевых частиц на входе в авиационный двигатель в реальных условиях. Результаты испытания приведены в табл. 3.

Таблица 2

Глубина коррозионных повреждений образцов с различными вариантами вакуумно-плазменных покрытий толщиной 20 мкм

№ группы образцов	Глубина повреждения покрытия после коррозионных испытаний, мкм	Глубина повреждения основного материала, мкм
1	до основного материала	1,3
2	1,1	нет
3	1,7	
4	1,1	
5	0,8	
6	1,5	
7	1,6	
8	2,0	
9	1,8	
10	1,3	

Из таблицы видно, что стойкость к газоабразивной эрозии у образца, обработанного по предлагаемому способу, увеличилась приблизительно в 4,9–8,8 раз, а по сравнению с покрытием-прототипом в 1,5–2,5 раза. Стойкость к капельно-ударной эрозии исследовалась по методике МЭИ (Московского энергетического института) на стенде «Эрозия» при соударении жидких частиц размером 800 мкм и скоростью 300 м/с. Результаты исследования приведены в табл. 4. Установлено, что стойкость к капельно-ударной эрозии у образцов, обработанных по предлагаемому способу, увеличилась приблизительно от 1,5 до 2,1 раз по сравнению с прототипом.

Дополнительно была проведена оценка усталостной прочности образцов из материала ло-

патов паровых турбин, титанового сплава ТС5, обработанных по способу-прототипу и предлагаемому способу (при наработке 2·10⁷ циклов). По способу-прототипу усталостная прочность составила 260 МПа, по предлагаемому – 275 МПа. Аналогичные результаты также были получены для образцов из титановых сплавов ВТ6, ВТ14, ВТЗ-1.

Таблица 3

Стойкость к газоабразивной эрозии

№ группы образцов	Потеря массы, мкм	Увеличение стойкости, раз
1	0,61	3,47
2	0,38	5,57
3	0,31	6,84
4	0,42	5,05
5	0,24	8,33
6	0,32	6,63
7	0,29	7,31
8	0,34	6,23
9	0,35	6,06
10	0,29	7,31

Таблица 4

Стойкость к капельно-ударной эрозии

№ группы образцов	Увеличение стойкости, раз
1	3,57
2	6,12
3	5,15
4	5,76
5	5,33
6	5,92
7	7,08
8	7,12
9	7,32
10	7,54

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные лабораторные исследования показали, что нанослойные покрытия [7] с различным сочетанием материалов, наносимых из последовательно расположенных катодов и расположенных в промежутках между ними источников имплантируемых ионов, позволяют увеличить по сравнению с существующим покрытием [6] стойкость к солевой коррозии (до 1,5 раз), капельно-ударной эрозии (до 2,1 раза), газоабразивной эрозии (в 2,5 раза).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонсеровский Ф. Г. А.С. СССР №1278469, МПК F 01 D 25/28. Рабочая лопатки влажно-паровой турбины. Бюл. № 47, 1986.
2. Гонсеровский Ф. Г. Упрочнение и ремонт стальных паротурбинных рабочих лопаток после эрозионного износа // Электрические станции. 1998. № 8. С. 37–41.

3. Солонина О. П., Глазунов С. Г. Жаропрочные титановые сплавы. М.: Metallurgy, 1976. 447 с.

4. Повышение циклической прочности металлов и сплавов методом ионной имплантации / Б. Г. Владимиров [и др.] // Поверхность. Физика, химия, механика. 1982. № 7. С. 139–147.

5. Патент РФ № 2117073 МПК С 23 С 14/48. Способ модификации поверхности титановых сплавов / М. И. Гусева [и др.] // Бюл. №22, 1998 г.

6. Патент РФ № 2234556 МПК С 23 С 14/06. Способ обработки поверхности лопаток паровых турбин из титановых сплавов / А. М. Смыслов [и др.]. 2004 г.

7. Патент РФ № 2390578, МПК С 23 С 14/06. Способ получения эрозионно стойкого покрытия, содержащего нанослой, для лопаток турбомашин из титановых сплавов / А. М. Смыслов [и др.] // Бюл. № 15, 2010.

8. Экспериментальное исследование износостойкости вакуумных ионно-плазменных покрытий в запыленном потоке воздуха: технич. отчет ЦИАМ №10790, 1987. 37 с.

ОБ АВТОРАХ

Смыслов Анатолий Михайлович, зав. каф. технол. машиностроения. Дипл. инж.-технол. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по производству двигателей ЛА (УГАТУ, 1993). Иссл. в обл. ионно-имплант. и вакуумно-плазм. модиф. поверхности.

Мингажев Аскар Джамильевич, доц. той же каф. Дипл. инж. по машинам и аппаратам хим. пр-ва (УНИ, 1976). Канд. техн. наук по техн. летательн. аппаратов и двигателей (УГАТУ, 1987). Иссл. в обл. жаростойких и термобарьерных покрытий применит. к деталям авиац. техн.

Смыслова Марина Константиновна, доц. каф. оборуд. и техн. сварочн. пр-ва. Дипл. инж. техн. машиностр. (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по техн. машиностр. (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. высокотвердых вакуумных ионно-плазмен. покрытий.

Селиванов Константин Сергеевич, доц., ст. науч. сотр. НИЧ каф. технологии машиностр. Дипл. инженер по технол. машиностр. (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по технологии машиностроения (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. физ.-хим., структурно-фазового состояния и эксплуатац. свойств поверхности детали после ее ионно-импл., вакуумно-плазменного модифицирования.

Мингажев Аскар Джамильевич, доц. той же каф. Дипл. инж. по машинам и аппаратам хим. пр-ва (УНИ, 1976). Канд. техн. наук по техн. летательн. аппаратов и двигателей (УГАТУ, 1987). Иссл. в обл. жаростойких и термобарьерных покрытий применит. к деталям авиац. техн.