РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11) 2 390 578 (13) C2

(51) МПК
C23C 14/06 (2006.01)
C23C 14/48 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: **2007141873/02, 12.11.2007**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.11.2007

(43) Дата публикации заявки: **20.05.2009**

(45) Опубликовано: **27.05.2010** Бюл. № **15**

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2161661 C1, 10.01.2001. RU 2046835 C1, 27.10.1995. RU 2269592 C2, 10.02.2006. RU 2294980 C1, 10.03.2007. RU 2228387 C2, 10.05.2004. EP 0264654 A1, 27.04.1988.**

Адрес для переписки:
450000, Республика Башкортостан, г.Уфа, ул. К. Маркса, 12, УГАТУ, каф. ТМ, А.М.Смыслову

(72) Автор(ы):
Смыслов Анатолий Михайлович (RU),
Смыслова Марина Константиновна (RU),
Мингажев Аскар Джамилевич (RU),
Дыбленко Юрий Михайлович (RU),
Селиванов Константин Сергеевич (RU),
Гордеев Вячеслав Юрьевич (RU),
Дыбленко Михаил Юрьевич (RU),
Рамазанов Альберт Нуруллаевич (RU),
Мингажева Алиса Аскаровна (RU)

(73) Патентообладатель(и):
ООО "НПП Уралавиаспецтехнология" (RU)

(54) СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ЭРОЗИОННО СТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ, СОДЕРЖАЩЕГО НАНОСЛОИ, ДЛЯ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

(57) Реферат:

Изобретение относится к способам нанесения нанослойных покрытий для защиты лопаток турбомашин из титановых сплавов. Способ получения эрозионно стойкого покрытия, содержащего нанослои, для лопаток турбомашин из титановых сплавов включает вакуумно-плазменное осаждение металлического подслоя и нанослоев из нитридов, карбидов и/или карбонитридов алюминия или из соединения титана, циркония и алюминия с азотом и/или углеродом. После осаждения подслоя и каждого нанослоя проводят его ионно-имплантационную обработку. Нанослои формируют при вращении лопаток вокруг собственной оси и относительно последовательно расположенных катодов. Ионно-имплантационную обработку осуществляют устройствами для имплантации ионов расположенными между катодами. Получается покрытие, обеспечивающее защиту лопаток турбомашин от солевой и газовой коррозии, газо-абразивной и капельно-ударной эрозии, при одновременном повышении их выносливости и циклической долговечности. 11 з.п. ф-лы, 4 табл.

RU 2390578 C2

RU 2390578 C2

RUSSIAN FEDERATION

(19) RU (11) 2 390 578 (13) C2

(51) Int. Cl.
C23C 14/06 (2006.01)
C23C 14/48 (2006.01)

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(21), (22) Application: **2007141873/02, 12.11.2007**

(24) Effective date for property rights:
12.11.2007

(43) Application published: **20.05.2009**

(45) Date of publication: **27.05.2010 Bull. 15**

Mail address:
450000, Respublika Bashkortostan, g.Ufa, ul. K. Marksa, 12, UGATU, kaf. TM, A.M.Smyslovu

(72) Inventor(s):
Smyslov Anatolij Mikhajlovich (RU),
Smyslova Marina Konstantinovna (RU),
Mingazhev Askar Dzhamilevich (RU),
Dyblenko Jurij Mikhajlovich (RU),
Selivanov Konstantin Sergeevich (RU),
Gordeev Vjacheslav Jur'evich (RU),
Dyblenko Mikhail Jur'evich (RU),
Ramazanov Al'bert Nurullaevich (RU),
Mingazheva Alisa Askarovna (RU)

(73) Proprietor(s):
OOO "NPP Uralaviaspetstekhnologija" (RU)

(54) PROCEDURE FOR PRODUCTION OF EROSION-RESISTANT COATING CONTAINING NANO-LAYERS FOR BLADES OF TURBO-MACHINES OUT OF TITANIUM ALLOYS

(57) Abstract:

FIELD: metallurgy.

SUBSTANCE: invention refers to procedure of applying coating of nano-layers for protection of turbo-machine blades out of aluminium alloys. The procedure of applying erosion-resistant coating of nano-layers on turbo-machine blades out of titanium alloys consists in vacuum-plasma precipitation of metallic under-layer and nano-layers out of nitrides, carbides and/or aluminium carbonitrides or out of compounds of titanium, zirconium and aluminium with nitrogen and/or carbon. Ionic-implantation treatment is performed upon precipitation of under-layer and each nan-layer. Nano-layers are formed with rotation of blades around their proper axles and relatively successive arranged cathodes. Ionic-implantation treatment is carried out with ionic-implantation facilities installed between cathodes.

EFFECT: production of coating facilitating protection of turbo-machines blades from salt and gas corrosion, gas-abrasive and drop-impact erosion at simultaneous raise of their resistance and cyclic operation life.

12 cl, 4 tbl, 1 ex

RU 2390578 C2

RU 2390578 C2

Изобретение относится к машиностроению и может быть использовано в авиационном двигателестроении и энергетическом турбостроении для защиты пера рабочих лопаток компрессора и турбины из титановых сплавов от солевой и газовой коррозии, газо-абразивной и капельно-ударной эрозии, при одновременном повышении выносливости и циклической долговечности.

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, ВТ 14, ВТ3-1, ВТ22 и др.). Указанные сплавы широко применяются, например, для изготовления 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 дефекты, образующиеся в процессе эксплуатации деталей из этих сплавов, вызывают возникновение интенсивных процессов разрушения. Кроме того, при изготовлении или ремонте деталей из титановых сплавов необходимо учитывать ряд таких требований, как повышенное качество поверхности, увеличение радиусов перехода от одних сечений к другим и др. В этой связи для защиты лопаток от коррозионно-эрозионного воздействия используют защитные покрытия.

Например, известен гальванический способ нанесения никель-кадмиевого (NiCd) покрытия на лопатки компрессора ГТД (Петухов А.Н. Усталость замковых соединений лопаток компрессоров. // Труды ЦИАМ №1213, 1987. - 36 с.).

Недостатками этого способа являются невысокая устойчивость к солевой коррозии, экологический вред гальванического производства, а также вероятность наводороживания поверхности, обусловливающего снижение выносливости и циклической долговечности.

Традиционные способы повышения стойкости лопаток к влажно-паровой эрозии - припайка и приварка стеллитовых пластин, электроискровое и кластерное упрочнение, плазменное, детонационное напыление, ТВЧ-закалка (А.С. СССР №1278469 F01D 25/28. Гонсеровский Ф.Г. Упрочнение и ремонт стальных паротурбинных рабочих лопаток после эрозионного износа. // Электрические станции №8, 1998, с.37-41) - малоприемлемы или неприменимы для титановых сплавов из-за большой их склонности к окислению при нагреве и последующему растрескиванию, в результате чего появляются недопустимые дефекты покрытия и поверхности (Жаропрочные титановые сплавы. / О.П.Солонина, С.Г.Глазунов. - М.: Металлургия, 1976. - 447 с.).

Известны способы повышения усталостной прочности металлов методом ионной имплантации (Повышение циклической прочности металлов и сплавов методом ионной имплантации. Владимиров Б.Г., Гусева М.И., Иванов С.М. и др. // Поверхность. Физика, химия, механика, №7, 1982, с.139-147). Сущность метода ионной имплантации заключается в облучении поверхности металлов ионами различных химических элементов с энергий от 300 эВ до 300 кэВ и дозой от 10^{16} до $2\cdot10^{19}$ ион/см^2.

Известен также способ модификации поверхности титановых сплавов (патент РФ №2117073, МПК C23C 14/48, 10.08.98, Бюл. №22), который включает в себя предварительную обработку ионами аргона с энергией 250-400 эВ, плотностью ионного тока 1-10 мА/см^2 и дозой (1-2)·10^{19} ион/см^2, имплантацию ионов азота с энергией 250-400 эВ, плотностью ионного тока 1-10 мА/см и дозой (1-2)·10^{19} ион/см^2 и последующий стабилизирующий отжиг.

Основным недостатком известного способа является малая глубина упрочняемого модифицируемого слоя поверхности (до 4 мкм), которая не может обеспечить необходимую долговечность изделия при его эксплуатации в условиях влажно-паровой эрозии. Кроме того, к недостаткам относится невозможность обработки в единицу времени всего изделия (например, всей поверхности пера лопатки) из-за ограниченной площади генерируемого пучка плазмы (не более 510 мм на указанном в прототипе ионно-плазменном ускорителе "Вита"), что значительно меньше площади поверхности турбинной лопатки (4,5·10^5 мм^2), а также необходимость проведения дополнительной термообработки, увеличивающей технологический цикл.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату к заявляемому способу является способ обработки поверхности лопаток паровых турбин из титановых сплавов (патент РФ №2234556 МПК C23C 14/06, 2004.08.20), включающий в себя последовательное упрочнение поверхности изделия путем ионной имплантации азота и проведение стабилизирующего отжига, и проведение, после ионной имплантации ионно-плазменное нанесение покрытия нитрида титана при токе разряда от 90 до 110 А, напряжении разряда от 50 до 60 В и давлении азота от 10^{-1} до 4·10^{-1} Па, при этом ионную имплантацию, нанесение покрытия и стабилизирующий отжиг осуществляют в одном вакуумном объеме.

Основным недостатком прототипа является низкая степень надежности защиты лопаток из титановых сплавав от пылевой и капельно-ударной эрозии и недостаточная выносливость и циклическая прочность.

Техническим результатом заявляемого способа является повышение стойкости лопаток из титановых сплавов с покрытиями к солевой коррозии, пылевой и капельно-ударной эрозии при одновременном повышении выносливости и циклической прочности деталей с защитными покрытиями.

Технический результат достигается тем, что в способе получения эрозионно стойкого покрытия, содержащего нанослои, для лопаток турбомашин из титановых сплавов, включающий вакуумно-плазменное осаждение 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 в отличие от прототипа 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.

Технический результат достигается также тем, что в способе получения эрозионно стойкого покрытия ионно-имплантационную обработку проводят ионами легирующих элементов Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией, в частности при энергии ионов 0,2-300 кэВ и плотности ионов 10^{10} до 5·10^{20} ион/см^2.

Технический результат достигается также тем, что в способе получения эрозионно стойкого покрытия проводят взаимное экранирование потоков распыляемого

материала, при помощи экранов, расположенных между катодами и устройствами имплантируемых ионов.

Технический результат достигается также тем, что в способе получения эрозионно стойкого покрытия при осаждении нанослоев используют составные катоды, содержащие либо титан и цирконий, либо титан, алюминий и цирконий.

Технический результат достигается также тем, что в способе получения эрозионно стойкого покрытия перед нанесением металлического подслоя поверхность лопатки подвергают имплантации ионами легирующих элементов при энергии ионов 0,2-300 кэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $5\cdot10^{20}$ ион/см^2 и постимплантационному отжигу, при этом в качестве ионов легирующих элементов используют ионы Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацию, а имплантацию, постимплантационный отжиг и нанесение покрытия производят в одном вакуумном объеме за один технологический цикл.

Технический результат достигается также тем, что в способе получения эрозионно стойкого покрытия толщины нанослоев выбирают в диапазоне от 0,1 до 20 нанометров.

Технический результат достигается также тем, что в способе получения эрозионно стойкого покрытия толщину нанослоя регулируют путем изменения при осаждении времени половины оборота детали вокруг собственной оси и средней скорости осаждения осаждаемого компонента по следующим зависимостям:

$t_i=v_i\,\tau_i$, где t_i - толщина нанослоя покрытия, сформированная из i-го компонента, τ_i - время половины оборота детали вокруг собственной оси, обеспечивающее формирование нанослоя из i-го компонента; $v_i=H_i/\tau$ -средняя скорость осаждения покрытия из i-го компонента, образующего нанослой покрытия, где H_i - суммарная толщина слоев, сформированных из i-го компонента в покрытии, нанесенном при вращении детали, τ - время формирования покрытия, при этом в качестве i-х компонентов используют нитриды, карбиды и/или карбонитриды алюминия или соединение титана, циркония и алюминия с азотом и/или углеродом (i=1,2,3…20),

$v_i/v_{i+1}=H_i/H_i/H_{i+1}$, где v_{i+1} - средняя скорость осаждения нанослоя из (i+1)-го компонента, H_{i+1} - суммарная толщина нанослоев, сформированных из (i+1)-го компонента в покрытии, нанесенном при вращении детали.

Технический результат достигается также тем, что в способе получения эрозионно стойкого покрытия перед нанесением покрытия проводят полирование поверхности пера лопатки электролитно-плазменной обработкой, причем электролитно-плазменную обработку могут проводить путем погружения лопатки в электролит, представляющий собой водный раствор солей со значением pH 4…9, прикладывания к ней электрического напряжения 120-170 В, выдержки в электролите лопатки в течение 0,3-0,8 мин, последующего увеличения напряжения до 210-350 В, выдержки лопатки при этом напряжении в течение 1,5-5 минут, отключения напряжения, удаления лопатки из электролита, проведения ее охлаждения, прикладывание к лопатке напряжения 210-350 В, погружения лопатки в электролит и выдержки в течение 0,8-2,5 минут, при этом обработку проводят при приложении к лопатке положительного по отношению к электролиту напряжения с образованием между поверхностью обрабатываемого изделия и электролитом парогазового слоя.

Для исследования стойкости лопаток паровых и газовых турбин на солевую и газовую коррозии, газоабразивную и капельно-ударной эрозию, были изготовлены образцы из титанового сплава ВТ -1, которые были подвергнуты (указанным в таблице 1) вариантам обработки, с целью получения защитных покрытий. Количество

образцов группы бралось равным трем.

Таблица 1

№ Группы образцов	Ионы, имплантируемые в основу	Ионы, имплантируемые в покрытие	Материал слоев и схема их чередования
1 (Прототип)	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-

Режимы обработки образцов и нанесения покрытия: ионная имплантация (ионами N, Cr, Y, Ib, C,B, Zr) с энергией E=300 эВ - 30 КэВ и плотностью облучения Д=310^{19} ион/см^2 (при имплантации ионов в основу постимплантационный отпуск в вакууме при температуре 400С в течение 1 ч). Материал слоев и схема их чередования - согласно таблицы 1. Толщины слоев составляли: по способу-прототипу первый слой - Ме толщиной 1 мкм, второй слой - нитрид Ме толщиной 2 мкм, при общем количестве слоев 16 при общей толщине покрытия 24 мкм. При формировании по предлагаемому способу общая толщина покрытия составляла также величину 24 мкм, при толщинах нанослоев в диапазоне от 0,1 до 20 нанометров.

Стойкость к солевой коррозии исследовалась по ускоренной методике Всероссийского института авиационных материалов. 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 покрытиями, нанесенными по предлагаемому способу по сравнению с прототипом в 1,3…1,4 раза.

Таблица 2

Оценка глубины коррозионных повреждений

№ п/п	Толщина покрытия, мкм	Глубина повреждения покрытия, мкм	Глубина повреждения основного материала, мкм
1	Около 20	Повреждение покрытия до основного материала	1,3
2		Повреждение покрытия до 1,1 мкм	нет
3		Повреждение покрытия до 1,7 мкм	нет
4		Повреждение покрытия до 1,1 мкм	нет
5		Повреждение покрытия до 0,8 мкм	нет
6		Повреждение покрытия до 1,5 мкм	нет
7		Повреждение покрытия до 1,6 мкм	нет
8		Повреждение покрытия до 2 мкм	нет
9		Повреждение покрытия до 1,8 мкм	нет
10		Повреждение покрытия до 1,3 мкм	нет

Таблица 3

Стойкость к пылевой эрозии

№ п/п	Потеря массы, мкм	Увеличение стойкости, раз	№ п/п	Потеря массы, мкм	Увеличение стойкости, раз
0	2,12	-	6	0,32	6,63
1	0,61	3,47	7	0,29	7,31
2	0,38	5,57	8	0,34	6,23
3	0,31	6,84	9	0,35	6,06
4	0,42	5,05	10	0,29	7,31
5	0,24	8,33			

Стойкость к пылевой эрозии исследовалась по методике ЦИАМ (Технический отчет ЦИАМ "Экспериментальное исследование износостойкости вакуумных ионно-плазменных покрытий в запыленном потоке воздуха" №10790, 1987.-37 с.) в пескоструйной установке 12Г-53 струйно-эжекторного типа. Для обдува использовался молотый кварцевый песок с плотностью р=2650 кг/м^3, твердость HV= 12000 МПа. Обдув производился при скорости воздушно-абразивного потока 195-210 м/с, температура потока 265-3 ПК, давление в приемной камере 0,115-0,122 МПа, время воздействия - 120 с, концентрация абразива в потоке до 2-3 г/м, что несколько выше, чем концентрация пылевых частиц на входе в авиационный двигатель в реальных условиях. Результаты испытания приведены в табл.3. Из таблицы видно, что стойкость к пылевой эрозии у образца, обработанного по предлагаемой методике, увеличилась приблизительно в 4,9…8,8 раз, а по сравнению с 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 $C_{уд}$=300 м/с.

Результаты исследования приведены в табл.4.

Таблица 4

Стойкость к капельно-ударной эрозии.

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

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 были проведена оценка усталостной прочности лопаток паровых турбин из титанового сплава ТС5, обработанных по способу-прототипу и предлагаемому способу (при наработке $2\cdot10^7$ циклов, МПа). Пос способу-прототипу усталостная прочность составила 260 МПа, по предлагаемому 275 МПа.

Повышение, по сравнению с прототипом, стойкости к пылевой эрозии (в 1,5…2,5 раза), стойкости к капельно-ударной эрозии (1,5…2,1 раза), повышение коррозионной стойкости, а также предела выносливости у обработанных образцов во всех видах испытаний указывает на то, что указанные эффекты достигается за счет использования следующих существенных признаков заявляемого изобретения: вакуумно-плазменное осаждение металлического подслоя и нанослоев из нитридов, карбидов и/или карбонитридов алюминия или соединения титана, циркония и алюминия с азотом и/или углеродом; проведение после осаждения подслоя и каждого

нанослоя его ионно-имплантационную обработки; формирование нанослоев при вращении лопаток вокруг собственной оси и относительно последовательно расположенных катодов; осуществление ионно-имплантационной обработки устройствами для имплантации ионов, расположенными между катодами; проведение ионной имплантации ионами легирующих элементов Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией, в частности, при энергии ионов 0,2-300 кэВ и плотности ионов 10^{10} до $5\cdot10^{20}$ ион/см^2; проведение взаимного экранирования потоков распыляемого материала при помощи экранов, расположенных между катодами и устройствами имплантируемых ионов; использование при осаждении нанослоев составных катодов, содержащих либо титан и цирконий, либо титан, алюминий и цирконий; обработка перед нанесением металлического подслоя поверхности лопатки имплантации ионами легирующих элементов при энергии ионов 0,2-300 кэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $5\cdot10^{20}$ ион/см^2 и постимплантационному отжигу, используя в качестве ионов легирующих элементов ионы Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацию, проведение имплантации, постимплантационного отжига и нанесения покрытия в одном вакуумном объеме за один технологический цикл; выбор толщины нанослоев в диапазоне от 0,1 до 20 нанометров; регулирование толщины нанослоя путем изменения при осаждении времени половины оборота детали вокруг собственной оси и средней скорости осаждения осаждаемого компонента по следующим зависимостям:

$t_i=v_i\,\tau_i$, где t_i - толщина нанослоя покрытия, сформированная из i-го компонента, τ_i - время половины оборота детали вокруг собственной оси, обеспечивающее формирование нанослоя из i-го компонента; $v_i=H_i/\tau$ - средняя скорость осаждения покрытия из i-го компонента, образующего нанослой покрытия, где H_i - суммарная толщина слоев, сформированных из i-го компонента в покрытии, нанесенном при вращении детали, τ - время формирования покрытия, при этом в качестве i-х компонентов используют нитриды, карбиды и/или карбонитриды алюминия или соединение титана, циркония и алюминия с азотом и/или углеродом (i=1,2,3…20),

$v_i/v_{i+1}=H_i/H_{i+1}$, где V_{i+1} - средняя скорость осаждения нанослоя из (i+1)-го компонента,

H_{i+1} - суммарная толщина нанослоев, сформированных из (i+1)-го компонента в покрытии, нанесенном при вращении детали; проведение перед нанесением покрытия полирования поверхности пера лопатки электролитно-плазменной обработкой; проведением электролитно-плазменной обработки путем погружения лопатки в электролит, представляющий собой водный раствор солей со значением pH 4…9, прикладывания к ней электрического напряжения 120-170 В, выдержки в электролите лопатки в течение 0,3-0,8 мин, последующего увеличения напряжения до 210-350 В, выдержки лопатки при этом напряжении в течение 1,5-5 минут, отключения напряжения, удаления лопатки из электролита, проведения ее охлаждения, прикладывания к лопатке напряжения 210-350 В, погружения лопатки в электролит и выдержки в течение 0,8-2,5 минут, обработкой при приложении к лопатке положительного по отношению к электролиту напряжения с образованием между поверхностью обрабатываемого изделия и электролитом парогазового слоя.

Аналогичные результаты также были получены для образцов из титановых сплавов ВТ6, ВТ 14, ВТ3-1,

Таким образом, проведенные лабораторные исследования показали, что применение предлагаемого способа получения эрозионно стойкого покрытия, содержащего нанослои, для лопаток турбомашин из титановых сплавов при

различных сочетаниях материалов, наносимых из последовательно расположенных катодов и источников, а также расположенных в промежутках между ними источников имплантитуемых ионов позволяет увеличить по сравнению с прототипом стойкость к солевой коррозии, пылевой (до 1,5 раз), капельной эрозии (до 2,1 раза), к пылевой эрозии (в 2,5 раза), что подтверждает заявленный технический результат к пылевой эрозии (в 1,5…2,5 раза).

Пример конкретной реализации способа

Обработку поверхности лопаток паровых турбин по описываемому способу проводят после всех формообразующих механических обработок, включая полирование. Лопатку тщательно обезжиривают в ультразвуковой ванне и протирают бензино-ацетоновой смесью. Для удаления остатков влаги лопатку подвергают термообработке в сушильном шкафу при температуре от 60 до 65°С. После сушки лопатку устанавливают в вакуумную камеру, где создают вакуум не ниже $2 \cdot 10^4$ Па и проводят очистку ионами аргона в течение 12 мин, нанесением подслоя титана толщиной 0,5 мкм с последующей ионной имплантацией азота по режиму:

Имплантируемый ион Азот

Энергия ионов 300-1000 эВ

Плотность ионного тока 5-10 мА/см^2

Доза имплантации ионов 310 ион/см

После этого в том же рабочем пространстве проводят вакуумный постимплантационный отпуск при температуре 400С в течение 1 ч. Нанесение ионно-плазменного нанослойного покрытия на основе нитрида титана и алюмонитрида титана с последовательным чередованием слоев (-TiAlN-TiN-TiAlN-) Средняя толщина нанослоев колеблется в диапазоне от 10 до 18 нанометров. Суммарная толщина слоев нитрида титана составляет 8 мкм, а алюмонитрида титана - 10,5 мкм, при общей толщине покрытия 19 мкм (0,5 мкм - толщина подслоя титана). После нанесения каждого нанослоя титана производят имплантацию ионов азота по режиму: энергия ионов 300-1000 эВ, доза имплантации ионов $5 \cdot 10^{18}$ ион/см^2. Нанесение указанных слоев производят до доведения толщины нанослойного покрытия до величины 19 мкм. Режимы при нанесении покрытия: ток 1=140 А, напряжение U=140 В. Используемые материалы катодов - Ti, Al. Режимы при нанесении покрытия: для титана - ток 1=120…140 А, напряжение U=140 В, для алюминия - ток 1=80…90 А, напряжение U=140 В.

Формула изобретения

1. Способ получения эрозионно стойкого покрытия, содержащего нанослои, для лопаток турбомашин из титановых сплавов, включающий вакуумно-плазменное осаждение металлического подслоя и нанослоев из нитридов, карбидов и/или карбонитридов алюминия или из соединения титана, циркония и алюминия с азотом и/или углеродом, при этом после осаждения подслоя и каждого нанослоя проводят его ионно-имплантационную обработку, отличающийся тем, что 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.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что ионно-имплантационную обработку проводят ионами легирующих элементов Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией.

3. Способ по п.1, отличающийся тем, что имплантацию ионов легирующих

элементов проводят при энергии ионов 0,2-300 кэВ и плотности ионов 10^{10} до $5\cdot10^{20}$ ион/см^2.

4. Способ по п.2, отличающийся тем, что имплантацию ионов легирующих элементов проводят при энергии ионов 0,2-300 кэВ и плотности ионов от 10^{10} до $5\cdot10^{20}$ ион/см^2.

5. Способ по любому из пп.1-4, отличающийся тем, что проводят взаимное экранирование потоков распыляемого материала при помощи экранов, расположенных между катодами и устройствами имплантируемых ионов.

6. Способ по любому из пп.1-4, отличающийся тем, что при осаждении нанослоев используют составные катоды, содержащие титан и цирконий.

7. Способ по любому из пп.1-4, отличающийся тем, что при осаждении нанослоев используют составные катоды, содержащие титан, алюминий и цирконий.

8. Способ по любому из пп.1-4, отличающийся тем, что перед нанесением металлического подслоя поверхность лопатки подвергают имплантации ионами легирующих элементов при энергии ионов 0,2-300 кэВ и дозе имплантации ионов от 10^{10} до $5\cdot10^{20}$ ион/см^2 и постимплантационному отжигу, при этом в качестве ионов легирующих элементов используют ионы Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацию, а имплантацию, постимплантационный отжиг и нанесение покрытия проводят в одном вакуумном объеме за один технологический цикл.

9. Способ по любому из пп.1-4, отличающийся тем, что толщины нанослоев выбирают в диапазоне от 0,1 до 20 нанометров.

10. Способ по п.9, отличающийся тем, что толщину нанослоя регулируют путем изменения при осаждении времени половины оборота детали вокруг собственной оси и средней скорости осаждения осаждаемого компонента по следующим зависимостям:

$t_i=v_i\tau_i$, где t_i - толщина нанослоя покрытия, сформированная из i-го компонента, τ_i - время половины оборота детали вокруг собственной оси, обеспечивающее формирование нанослоя из i-го компонента, $v_i=H_i/\tau$ - средняя скорость осаждения покрытия из i-го компонента, образующего нанослой покрытия, где H_i - суммарная толщина слоев, сформированных из i-го компонента в покрытии, нанесенном при вращении детали, τ - время формирования покрытия, при этом в качестве i-х компонентов используют нитриды, карбиды и/или карбонитриды алюминия или соединение титана, циркония и алюминия с азотом и/или углеродом (i=1,2,3…20), $v_i/v_{i+1}=H_i/H_{i+1}$, где v_{i+1} - средняя скорость осаждения нанослоя из (i+1)-го компонента, H_{i+1} - суммарная толщина нанослоев, сформированных из (i+1)-го компонента, в покрытии, нанесенном при вращении детали.

11. Способ по любому из пп.1-4, отличающийся тем, что перед нанесением покрытия проводят полирование поверхности пера лопатки электролитно-плазменной обработкой.

12. Способ по п.11, отличающийся тем, что электролитно-плазменную обработку проводят путем погружения лопатки в электролит, представляющий собой водный раствор солей со значением pH 4-9, прикладывания к ней электрического напряжения 120-170 В, выдержки в электролите лопатки в течение 0,3-0,8 мин, последующего увеличения напряжения до 210-350 В, выдержки лопатки при этом напряжении в течение 1,5-5 мин, отключения напряжения, удаления лопатки из электролита, проведения ее охлаждения, прикладывания к лопатке напряжения 210-350 В, погружения лопатки в электролит и выдержки в течение 0,8-2,5 мин, при этом обработку проводят при приложении к лопатке положительного по отношению к

электролиту напряжения с образованием между поверхностью обрабатываемого изделия и электролитом парогазового слоя.