

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU<sup>(11)</sup> **148 616**<sup>(13)</sup> U1

(51) МПК

[F04D 29/30 \(2006.01\)](#)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: [2013158976/06](#), 30.12.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
30.12.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 30.12.2013

(45) Опубликовано: [10.12.2014](#) Бюл. № 34

Адрес для переписки:

394026, г. Воронеж, Московский пр-кт, 14,  
ГОУВПО "ВГТУ", патентный отдел

(72) Автор(ы):

Стогней Олег Владимирович (RU),  
Валюхов Сергей Георгиевич (RU),  
Бурыкин Валерий Евгеньевич (RU),  
Филатов Максим Сергеевич (RU),  
Черниченко Владимир Викторович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Воронежский государственный  
технический университет" (RU)

(54) КОМПРЕССОРНАЯ ЛОПАТКА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ

(57) Реферат:

Полезная модель относится к энергетическому турбиностроению и авиационному двигателестроению и может быть использована при конструировании и восстановлении газотурбинных компрессоров. Компрессорная лопатка газотурбинного двигателя с защитным покрытием содержит перо с нанесенным на его поверхности защитным покрытием. Защитное покрытие выполнено на основе оксида циркония, стабилизированного иттрием, и представляет собой наноструктурный материал, включающий градиентный переходной слой из градиентного нанокompозитного материала, содержащего две фазы: металлическую фазу с составом, соответствующим составу защищаемой поверхности, и диэлектрическую фазу, преимущественно, оксид циркония различной стехиометрии, нанесенную на упомянутую металлическую фазу. Соотношение фаз в переходном слое изменяется с возрастанием доли оксидной фазы по мере увеличения толщины пленки, обеспечивая при этом плавный переход от металлического материала к оксиду без межфазной границы макроскопического размера. Упомянутый градиентный переходный слой создан с использованием магнетронной системы с двумя магнетронами, причем при помощи первого магнетрона создан подслой с металлическим сплавом, состав которого соответствует составу лопатки, а при помощи второго магнетрона создан подслой из циркония с добавками стабилизирующих элементов, преимущественно, иттрия. Первоначальное распыление

указанных подслоев осуществлено в атмосфере аргона таким образом, что интенсивность атомного потока, сформированного от первого магнетрона, превышает интенсивность атомного потока от второго магнетрона. После формирования первичного сплошного металлического слоя, в рабочую камеру добавлен кислород, с образованием в напыляемой пленке оксида циркония при неокисленном никеле, с обеспечением при этом требуемой наноструктурированности получаемого покрытия, 1 н.п. ф-лы.

Полезная модель относится к энергетическому турбиностроению и авиационному двигателестроению и может быть использована при конструировании и восстановлении газотурбинных компрессоров.

Компрессорные лопатки газотурбинного двигателя при эксплуатации находятся в сложных условиях нагружения. На компрессорные лопатки действуют значительные вибрационные нагрузки (см. книгу Гецова Л.Б. «Материалы и прочность деталей газовых турбин». М., «Недра», 1996, с. 40). Кроме того, компрессорные лопатки подвержены воздействию пылевых и капельных примесей в цикловом воздухе (см. обзор Шуровского В.А. и Левыкина А.П. «Загрязнение и очистка проточных частей осевых компрессоров газотурбинных установок». М., ВНИИЭгазпром, 1986, в. 11, с. 10).

Указанные эксплуатационные условия приводят к усталостным разрушениям компрессорных лопаток, обусловленным воздействием на них циклических нагрузок и коррозионной усталостью поверхности лопаток (см. статью Тарасенко Ю.П. и др. «Оценка эксплуатационного состояния материала компрессорных лопаток». - Материаловедение и высокотемпературные технологии. 1999, вып. 1).

Для повышения сопротивления компрессорных лопаток эрозионному и коррозионному износу их рабочей поверхности применяют специальные защитные покрытия.

Известна компрессорная лопатка газотурбинного двигателя с нанесенным гальваническим способом никель-кадмиевым покрытием (см. статью Петухова А.Н. «Усталость замковых соединений лопаток компрессоров». - Труды ЦИАМ. 1987, №1213, с. 36).

Недостатками такой компрессорной лопатки являются ухудшенная технологичность низкоэкологичного гальванического нанесения защитного покрытия и слабая эффективность защиты от усталостных разрушений лопатки, в связи с невысоким сопротивлением покрытия коррозионной усталости и возможностью наводороживания поверхности, обуславливающего снижение выносливости и циклической долговечности.

Известна компрессорная лопатка газотурбинных двигателей с двухслойным защитным покрытием, состоящим из осажденных в вакууме первого слоя из сплава на основе никеля и второго слоя на основе алюминия и подвергнутым совместной с деталью термообработке (см. патент РФ №2165475, С23С 14/16, С23С 30/00, С22С 19/05, С22С 21/04, 2001).

Основными недостатками этой компрессорной лопатки являются усложнение технологии нанесения защитного покрытия в результате увеличения числа операций и недостаточно надежная защита лопатки от пылевой и капельно-ударной эрозии при одновременном повышении выносливости и циклической прочности, достигаемом при уменьшении общей толщины покрытия с 35-37 до 6-10 мкм.

Известна компрессорная лопатка с нанесенным в вакууме многослойным защитным покрытием, состоящим из многократно чередующихся слоев титана,  $\epsilon$ -нитрида титана и  $\alpha$ -нитрида титана, под которым расположен поверхностный слой лопатки, предварительно подвергнутый ионной имплантации ионами азота и

последующему совмещенному с нанесением многослойного покрытия постимплантационному отпуску при 400°C в течение 1-го часа (см. патент РФ №2226227, С23С 14/06, С23С 14/48, 2004).

Недостатками является усложненная технология нанесения защитного покрытия при недостаточно надежной защите лопатки от питтинговой коррозии ее поверхности в связи с увеличением общей толщины защитного покрытия до  $20 \pm 1$  мкм, повышающей вероятность эксплуатационного расслоения покрытия и развития коррозионной усталости в условиях воздействия значительных импульсных нагрузок.

Известна компрессорная лопатка газотурбинного двигателя с защитным покрытием, содержащая перо с нанесенным на его поверхности ионно-плазменным износостойким и коррозионностойким покрытием на основе адгезионного подслоя титана и полифункционального слоя нитрида титана, при этом под адгезионным подслоем титана расположен обладающий повышенной микротвердостью поверхностный слой материала пера, предварительно сформированный для сопротивления пластической деформации при эксплуатации в результате низкоэнергетической бомбардировки поверхности пера в вакууме ионами титана, с образованием этим поверхностным слоем материала пера и указанным ионно-плазменным покрытием слоисто-структурной рабочей поверхностной оболочки лопатки, обеспечивающей ее надежную эксплуатацию в условиях воздействия на лопатку вибрационных нагрузок и питтинговой коррозии поверхности лопатки (Патент РФ на полезную модель №63004, МПК: F04D 29/30, С23С 14/06, С23С 14/48 - прототип).

Указанная компрессорная лопатка содержит перо с обладающим повышенной микротвердостью поверхностным слоем материала пера из хромистой нержавеющей стали или титанового сплава, предварительно сформированным для сопротивления пластической деформации при эксплуатации в результате низкоэнергетической бомбардировки поверхности пера в вакууме ионами титана, и нанесенными на поверхности пера поочередно адгезионным подслоем титана и полифункциональным слоем нитрида титана.

Основными недостатками данного покрытия является недостаточно высокое значение адгезии и когезии, а также неизотропное распределение внутренних напряжений при циклических термонагрузках, что снижает жаропрочность и жаростойкость покрытия и снижает надежность ее работы и работы газотурбинного двигателя в целом.

Задачей предложенного технического решения является устранение указанных недостатков и создание компрессорной лопатки газотурбинного двигателя, применение которой позволит повысить надежность работы газотурбинного двигателя.

Решение поставленной задачи достигается тем, что в предложенной компрессорной лопатке газотурбинного двигателя с защитным покрытием, содержащей перо с нанесенным на его поверхности защитным покрытием, согласно предложенному техническому решению, защитное покрытие выполнено на основе оксида циркония, стабилизированного иттрием, и представляет собой наноструктурный материал, включающий градиентный переходной слой из градиентного нанокompозитного материала, содержащего две фазы: металлическую фазу с составом, соответствующим составу защищаемой поверхности, и диэлектрическую фазу, преимущественно, оксид циркония различной стехиометрии, нанесенную на упомянутую металлическую фазу, причем соотношение фаз в переходном слое изменяется с возрастанием доли оксидной фазы по мере увеличения толщины пленки, обеспечивая при этом плавный переход от металлического материала к оксиду без межфазной границы макроскопического размера, при этом упомянутый градиентный переходной слой создан с использованием магнетронной системы с двумя магнетронами, причем при помощи первого магнетрона создан

подслои с металлическим сплавом, состав которого соответствует составу лопатки, а при помощи второго магнетрона создан подслои из циркония с добавками стабилизирующих элементов, преимущественно, иттрия, причем первоначальное распыление указанных подслоев осуществлено в атмосфере аргона таким образом, что интенсивность атомного потока, сформированного от первого магнетрона, превышает интенсивность атомного потока от второго магнетрона, при этом, после формирования первичного сплошного металлического слоя, в рабочую камеру добавлен кислород, с образованием в напыляемой пленке оксида циркония при неокисленном никеле, с обеспечением при этом требуемой наноструктурированности получаемого покрытия.

Технический результат заявляемой полезной модели - улучшение технологичности и снижение трудоемкости изготовления лопатки при обеспечении надежного ресурса работы лопатки в условиях воздействия знакопеременных нагрузок.

Предложенная компрессорная лопатка газотурбинного двигателя с оксидным покрытием на основе оксида циркония, стабилизированного иттрием, может быть получена следующим образом.

Для получения указанного покрытия используется магнетронная система с двумя магнетронами. При помощи первого магнетрона распыляют мишень, состав которой соответствует составу компрессорной лопатки, а при помощи второго магнетрона распыляют мишень из циркония с добавками стабилизирующих элементов, например, иттрия. Первоначальное распыление мишеней осуществляется в атмосфере аргона, причем интенсивность атомного потока, сформированного от никелевой мишени, превышает интенсивность атомного потока от циркониевой мишени. После формирования первичного сплошного металлического слоя в рабочую камеру добавляется кислород, после чего процесс напыления приобретает характер реактивного - в напыляемой пленке начинает образовываться оксид. В силу различных значений энергий связи в оксиде никеля и оксиде циркония в формирующемся покрытии происходит образование оксида циркония, в то время как никель остается неокисленным.

Таким образом, в результате одновременного распыления никелевого сплава и циркония в смешанной кислородно-аргонной атмосфере происходит напыление композитного материала металл-оксид. В процессе напыления парциальное давление кислорода плавно увеличивается до давления порядка  $1,5 \cdot 10^{-3}$  Па, а мощность магнетрона, распыляющего металлический сплав, уменьшают вплоть до его полного отключения. После этого продолжают напыление чистого оксида циркония до достижения им требуемой толщины.

В этом случае, в покрытии образуется переходной слой из градиентного нанокompозитного материала, содержащего две фазы: металлическую фазу с составом, соответствующим составу защищаемой поверхности, и диэлектрическую фазу, собственно оксид циркония различной стехиометрии, при этом соотношение фаз в переходном слое обеспечивается не постоянным, а переменным, с возрастанием доли оксидной фазы по мере увеличения толщины пленки. В результате создания такого градиентного слоя формируется плавный переход от металлического материала к оксиду без межфазной границы макроскопического размера, при этом сформированный градиентный слой является не только композитным, но и наноструктурированным, поскольку характерные размеры включений каждой фазы составляют от единиц до нескольких десятков нанометров, в зависимости от объемной доли фазы.

Полученная наноструктурированность не только повышает механическую прочность покрытия, но и приводит к изотропному распределению внутренних напряжений при циклических термонагрузках, что повышает жаропрочность и жаростойкость покрытия.

Использование предложенного технического решения позволит создать наноструктурное композитное покрытие из оксида циркония, применение которого позволит сформировать плавный переход от металлического материала к оксиду без межфазной границы макроскопического размера, что, в конечном итоге, позволит повысить механическую прочность покрытия, и приведет к изотропному распределению внутренних напряжений при циклических термонагрузках, что позволит повысить жаропрочность и жаростойкость покрытия.