



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2009144424/02, 30.11.2009

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
30.11.2009

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 30.11.2009

(45) Опубликовано: 10.07.2011 Бюл. № 19

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2078148 C1, 27.04.1997. RU 2228387 C1,
10.05.2004. RU 2062303 C1, 20.06.1996. SU
1813315 A1, 07.05.1993. RU 2274526 C2,
20.04.2006. RU 2334384 C1, 27.09.2008. RU
2270259 C2, 20.02.2006.

Адрес для переписки:

450081, Республика Башкортостан, г.Уфа, ул.
Шота Руставели, 49, ООО "ПП ТСС", А.В.
Новикову

(72) Автор(ы):

Новиков Антон Владимирович (RU),
Мингажев Аскар Джамилевич (RU),
Смыслов Анатолий Михайлович (RU),
Смыслова Марина Константиновна (RU),
Быбин Андрей Александрович (RU),
Тарасюк Иван Васильевич (RU),
Кишалов Евгений Александрович (RU),
Егоров Антон Алексеевич (RU),
Дементьев Алексей Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной
ответственностью "Производственное
предприятие Турбинаспецсервис" (RU)

(54) ТЕПЛОЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И СПОСОБ ЕГО ПОЛУЧЕНИЯ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области машиностроения, а именно к теплозащитным покрытиям и способам их получения на рабочих и направляющих лопатках энергетических и транспортных турбин, в частности газовых турбин авиадвигателей. Способ включает формирование на защищаемой поверхности лопатки металлического подслоя, переходного металлокерамического слоя и внешнего керамического слоя. Переходный металлокерамический слой по его толщине формируют с пошаговым изменением

соотношения содержания металла к керамике от 1% до 20% весовых на шаг, с уменьшением количества металла по толщине переходного слоя от 100% до 0%, при толщине переходного слоя от 8 мкм до 100 мкм. Переходный металлокерамический слой формируют газотермическим напылением или его формируют вакуумными ионно-плазменными методами или магнетронными методами, или электроннолучевым испарением и конденсацией в вакууме. В результате получают покрытие с высокими эксплуатационными характеристиками. 2 н. и 35 з.п. ф-лы, 3 табл.

RU 2 4 2 3 5 5 0 C 1

RU 2 4 2 3 5 5 0 C 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(51) Int. Cl.
C23C 28/00 (2006.01)
C23C 14/00 (2006.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(21)(22) Application: **2009144424/02, 30.11.2009**

(24) Effective date for property rights:
30.11.2009

Priority:

(22) Date of filing: **30.11.2009**

(45) Date of publication: **10.07.2011 Bull. 19**

Mail address:

**450081, Respublika Bashkortostan, g.Ufa, ul.
Shota Rustaveli, 49, OOO "PP TSS", A.V.
Novikovu**

(72) Inventor(s):

**Novikov Anton Vladimirovich (RU),
Mingazhev Askar Dzhamilevich (RU),
Smyslov Anatolij Mikhajlovich (RU),
Smyslova Marina Konstantinovna (RU),
Bybin Andrej Aleksandrovich (RU),
Tarasjuk Ivan Vasil'evich (RU),
Kishalov Evgenij Aleksandrovich (RU),
Egorov Anton Alekseevich (RU),
Dement'ev Aleksej Vladimirovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju
"Proizvodstvennoe predpriyatie
Turbinaspets servis" (RU)**

(54) HEAT PROTECTING COVER FOR TURBINE BLADES AND PROCEDURE FOR ITS FABRICATION

(57) Abstract:

FIELD: machine building.

SUBSTANCE: procedure consists in forming metal under-layer in protected surface of blade, in forming transition metal-ceramic layer and external ceramic layer. Transition metal-ceramic layer along its thickness is formed with step-by step change of ratio of metal content to ceramics from 1 % to 20 % of weight per step and with reduction of metal amount by thickness of the transition layer from 100

% to 0 % at thickness of the transition layer from 8 mcm to 100 mcm. Transition metal-ceramic layer is formed with gas-thermal sputtering or it is formed by vacuum ion-plasma methods or magnetron methods or electron-ray evaporation and condensation in vacuum.

EFFECT: high operational characteristics of cover.

37 cl, 3 tbl, 1 ex

RU 2 4 2 3 5 5 0 C 1

RU 2 4 2 3 5 5 0 C 1

Изобретение относится к области машиностроения, а именно к теплозащитным покрытиям и способам их получения на рабочих и направляющих лопатках энергетических и транспортных турбин, и, в особенности, газовых турбин авиадвигателей.

5 Газотурбинные установки и двигатели находят все более широкое применение в современной технике: двигатели самолетов и вертолетов, судовые газотурбинные двигатели, энергетические ГТУ и газоперекачивающие агрегаты. К основным деталям, определяющим надежность, экономичность и ресурс их работы, относятся рабочие
10 лопатки турбины. Турбинные лопатки работают в достаточно жестких условиях: высокие температуры, агрессивные среды (кислород, сера, окислы ванадия и другие элементы), значительные знакопеременные механические нагрузки и резкие теплосмены. Существующие тенденции совершенствования турбомашин приводят к еще большему ужесточению указанных условий эксплуатации и к повышению
15 стоимости деталей. Все это требует применения на лопатках турбин более эффективных защитных покрытий.

Одним из путей повышения температуры в турбине при сохранении ресурса лопаток является применение теплозащитных покрытий (ТЗП). Керамические ТЗП,
20 при их достаточной толщине, могут ощутимо снизить теплоприток к основному материалу охлаждаемой лопатки и обеспечить ее работоспособность в условиях высоких температур.

Наиболее перспективным материалом для формирования теплозащитного слоя ТЗП является керамика на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом
25 иттрия ($ZrO_2 \cdot Y_2O_3$). Для обеспечения адгезии керамического слоя и защиты основного материала детали от окисления, ТЗП имеет жаростойкий подслоя.

Известно теплозащитное покрытие и способ его нанесения на лопатку турбины (патент РФ № 2325467, МПК C23C 4/10. Способ получения создающего термический
30 барьер покрытия. / Я.Вигрен, М.Ханссон. /Вольво аэро корп./ 2008), включающий предварительную обработку поверхности лопатки и нанесение связующего подслоя, жаростойкого слоя системы MeCrAlY и теплозащитного керамического слоя на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия.

Известно также теплозащитное покрытие и способ его нанесения на лопатку
35 турбины (патент США №4,904,542 "Многослойное коррозионно-стойкое покрытие"), включающий газотермическое нанесение многослойного покрытия, состоящего из чередующихся керамических и металлических слоев. Так же известно многослойное высокотемпературное покрытие, состоящее из керамических слоев, разделенных
40 металлическими слоями. Данное покрытие имеет ряд существенных недостатков. Входящая в его состав керамика образована путем плазменного напыления, что существенно снижает его термическую усталость и долговечность. Материал металлических слоев выбирается исходя из характеристик его стойкости к эрозии. Это
45 ведет к тому, что при наличии перепадов температуры как по толщине, так и по его поверхности в материале металлического слоя возникнут термические напряжения, которые будут переданы керамике, имеющей низкую прочность на растяжение.

Наиболее близким по технической сущности является теплозащитное покрытие и способ его получения, преимущественно для рабочих лопаток турбин газотурбинных
50 двигателей и энергетических установок, включающие формирование на защищаемой поверхности лопатки металлического подслоя, переходного металлокерамического слоя и внешнего керамического слоя (патент РФ №2078148). Известный способ нанесения теплозащитного покрытия на лопатку турбины включает также

предварительную абразивно-жидкостную обработку и обработку шлифпорошком, нанесение слоя жаростойкого покрытия из сплава на никелевой основе методом вакуумно-плазменной технологии, нанесение второго слоя из сплава на основе алюминия, легированного никелем 13-16% и иттрием 1,5-1,8%, вакуумный отжиг и подготовку поверхности перед нанесением третьего керамического слоя из диоксида циркония стабилизированного 7-9 мас.%, оксида иттрия ($ZrO_2 \cdot 7\% Y_2O_3$) и последующие дополнительные вакуумный диффузионный и окислительный отжиг.

Известен также способ подготовки поверхности детали под нанесение многослойного покрытия на металлические изделия методом катодного распыления, включающий ионную очистку и/или модификацию поверхности изделия (патент РФ №2228387. МПК C23C 14/06. Способ нанесения многослойного покрытия на металлические изделия. Оpubл. 2004 г.). Однако функциональным назначением ионно-имплантационной обработки поверхности в данном случае не является повышение жаростойкости слоя.

Основным недостатком прототипа является низкая эксплуатационная прочность сцепления на границе «переходный слой - внешний керамический слой», а также недостаточная выносливость и циклическая прочность деталей с покрытием, т.е. параметры, которые необходимо обеспечивать при эксплуатации рабочих лопаток турбин газотурбинных двигателей и установок.

Техническим результатом заявляемого способа является повышение эксплуатационной прочности сцепления на границе «переходный слой-внешний керамический слой» при одновременном повышении выносливости и циклической прочности деталей с защитными покрытиями.

Технический результат достигается тем, что в способе получения теплозащитного покрытия, преимущественно для рабочих лопаток турбин газотурбинных двигателей и энергетических установок, включающем формирование на защищаемой поверхности лопатки металлического подслоя, переходного металлокерамического слоя и внешнего керамического слоя, в отличие от прототипа, при формировании переходного металлокерамического слоя по его толщине проводят пошаговое изменение соотношения содержания металла к керамике, в диапазоне от 1% до 20% весовых на шаг, уменьшая количество металла по толщине переходного слоя от 100% до 0%, при толщине переходного слоя от 8 мкм до 150 мкм, причем, при формировании переходного металлокерамического слоя газотермическим напылением проводят пошаговое изменение соотношения содержания металла к керамике в диапазоне от 10% до 20% весовых на шаг, при величине шага от 4 мкм до 8 мкм, при толщине переходного слоя от 40 мкм до 150 мкм, а при формировании переходного металлокерамического слоя вакуумными ионно-плазменными методами и/или магнетронными методами, и/или электроннолучевым испарением и конденсацией в вакууме проводят пошаговое изменение соотношения содержания металла к керамике в диапазоне от 1% до 10% весовых на шаг, при величине шага от 0,08 мкм до 0,8 мкм, при толщине переходного слоя от 8 мкм до 100 мкм.

Технический результат достигается также тем, что в способе получения теплозащитного покрытия в качестве материала керамического слоя и керамики в переходном слое используют ZrO_2 стабилизированную Y_2O_3 в соотношении $Y_2O_3 - 5.9$ вес.%, ZrO_2 - остальное, при этом керамика дополнительно может содержать от 4% до 36% оксидов La, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb и их смесей, а в качестве материала металлического слоя используют жаростойкие сплавы на основе никеля и/или кобальта с добавками Cr, Al, Y, Yb, причем толщина металлического подслоя

составляет от 8 мкм до 60 мкм, а толщина керамического слоя составляет от 35 мкм до 400 мкм.

Технический результат достигается также тем, что в способе получения теплозащитного покрытия перед нанесением металлического подслоя проводят ионно-плазменную подготовку поверхности лопатки и ее ионно-имплантационную обработку ионами Nb, Pt, Yb, Y, La, Hf, Cr, Si или их сочетанием, при энергии ионов от 0,2 кэВ до 30 кэВ и дозе имплантации ионов от 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см², а на поверхность лопатки дополнительно наносят слой из Nb, Pt, Cr или их сочетания толщиной от 0,1 мкм до 2,0 мкм.

Технический результат достигается также тем, что в способе получения теплозащитного покрытия нанесение металлических слоев покрытия осуществляют шликерным и/или гальваническим, и/или газотермическим, и/или вакуумными ионно-плазменными методами, и/или магнетронными методами, и/или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме, а керамического слоя проводят газотермическим и/или вакуумными ионно-плазменными методами, и/или магнетронными методами, и/или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме.

Технический результат достигается также тем, что в способе получения теплозащитного покрытия в качестве материала металлического подслоя используют жаростойкий сплав состава: Cr - от 18% до 34%; Al - от 3% до 16%; Y - от 0,2% до 0,7%; Ni - остальное, или состава: Cr - от 18% до 34%; Al - от 3% до 16%; Y - от 0,2% до 0,7%; Co - от 16% до 30%; Ni - остальное, или состава: Si - от 4,0% до 12,0%; Y - от 1,0 до 2,0%; Al - остальное.

Технический результат достигается также тем, что в способе получения теплозащитного покрытия после нанесения покрытия производят его диффузионный отжиг в вакууме не хуже 10^{-3} мм рт.ст. или среде защитного газа, выбирая температуру в диапазоне от 800°C до 1300°C, а в качестве лопатки турбины используются лопатки из никелевых или кобальтовых жаропрочных сплавов.

Технический результат достигается также тем, что в теплозащитном покрытии преимущественно для рабочих лопаток турбин газотурбинных двигателей и энергетических установок, содержащем металлический подслой, нанесенный на поверхность лопатки, переходный слой, содержащий металлическую и керамическую фазы, и нанесенный на переходный слой внешний керамический слой на основе ZrO₂ стабилизированный Y₂O₃, в отличие от прототипа, переходный металлокерамический слой выполнен многослойным при пошаговом уменьшении содержания металлической составляющей в каждом слое переходного слоя от 1% до 20% весовых в направлении перехода от металлического подслоя к керамическому слою, при уменьшении соотношения металла к керамике по толщине переходного слоя от 100% до 0% и толщине переходного слоя от 8 мкм до 150 мкм.

Технический результат достигается также тем, что теплозащитное покрытие включает переходный металлокерамический слой, полученный: или газотермическим напылением при пошаговом изменении соотношения содержания металла к керамике в диапазоне от 10% до 20% весовых на шаг, при величине шага от 4 мкм до 8 мкм, при толщине переходного слоя от 40 мкм до 150 мкм, или вакуумными ионно-плазменными методами и/или магнетронными методами, и/или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме, при пошаговом изменении соотношения содержания металла к керамике в диапазоне от 1% до 10% весовых на шаг, при величине шага от 0,08 мкм до 0,8 мкм, при толщине переходного слоя от 8 мкм до 100

мкм.

Технический результат достигается также тем, что в теплозащитном покрытии в качестве материала металлического подслоя использованы жаростойкие сплавы на основе никеля и/или кобальта с добавками Cr, Al, Y, Yb, причем толщина

5 металлического подслоя составляет от 8 мкм до 60 мкм, а металлический подслой нанесен на поверхность основного материала лопатки, подвергнутую ионно-имплантационной обработке ионами Nb, Pt, Yb, Y, La, Hf, Cr, Si или их сочетанием, при энергии ионов от 0,2 кэВ до 30 кэВ и дозе имплантации ионов от 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см².

Технический результат достигается также тем, что в теплозащитном покрытии толщина керамического слоя составляет от 35 мкм до 400 мкм, а в качестве материала керамического слоя и керамики в переходном слое использованы ZrO_2 стабилизированный Y_2O_3 в соотношении Y_2O_3 - 5...9 вес.%, ZrO_2 - остальное, кроме того, керамика дополнительно может содержать от 4% до 36% оксидов La, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb и их смесей.

15

В процессе эксплуатации лопаток турбин с теплозащитными покрытиями (ТЗП) в последних, на границе «подслой-керамический слой» возникает и растет оксидный слой, что приводит к отслоению внешнего керамического слоя. В этой связи,

20 эксплуатационные свойства теплозащитных покрытий главным образом и определяются адгезионной стойкостью системы «подслой-керамический слой». В то же время, покрытие, в котором металлическая составляющая подслоя, имеющая, с одной стороны качественное сцепление с основным материалом, а с другой - за счет внедрения в керамический слой на заданную глубину - хорошее сцепление с

25 керамическим слоем, сохраняющееся в процессе эксплуатации, имеет более высокие эксплуатационные свойства. При использовании ступенчатого пошагового переходного слоя, когда соотношение содержания керамики и металла изменяется по толщине переходного слоя от 100% металла до 100% керамики, увеличивая таким

30 образом площадь сцепления между керамической и металлической составляющими при создании слоистости переходного слоя, позволяет достичь ряда эффектов (повышение прочности сцепления металла с керамикой, в том числе и в процессе эксплуатации детали, снижение остаточных и эксплуатационных напряжений в

35 покрытии, усиление демпфирующих свойств покрытия, повышение стойкости к термоударам), повышающих эксплуатационные свойства деталей с теплозащитными покрытиями. Другими словами, повышенные эксплуатационные эффекты в предлагаемом покрытии объясняются следующими его преимуществами: анкерным соединением на границе «подслой-керамический слой», обеспечиваемым внедрением

40 металла в керамику; градиентный характер переходного слоя, обеспечивающий ступенчатый переход от металла к керамике; рост оксидной пленки на границе «металл-керамика» приводит к дополнительному сжатию охватываемой керамики металлической составляющей переходного слоя, внедренного в керамический слой, т.е. силы, возникающие на границе «металл-керамика», направлены не по нормали к

45 поверхности покрытия как в известных ТЗП, а в тангенциальном направлении.

Для оценки стойкости лопаток газовых турбин, с ТЗП, полученными по известному и предлагаемому способам, были проведены следующие испытания. Режимы и условия нанесения жаростойкого подслоя на образцы из никелевых и кобальтовых сплавов

50 (ЦНК-7, ЦНК-21, FSX-414, ЖС-6, ЖС-6У, ЭИ-893, U-5000) приведены в таблице 1.

Табл.1

№ Группы образцов	Ионы, имплантируемые в основу	Ионы, имплантируемые в покрытие	Металлический подслой	Состав сплава в переходном металлокерамическом слое	Дополнительный слой на поверхности лопатки			
1	2	3	4	5	6			
5	(Прот)	-	-	Co - 20% Cr - 30% Al - 13% Y - 0,6% Ni - ост.	Si - 12% Ni - 10% B - 1,6% Al - ост.	-		
10	1	Nb	Y + Pt	Cr - 18% Al - 5% Y - 0,2% Ni - ост.	Si - 4,0% Y - 1,0% Al - ост.	Nb, толщ. 0,1 мкм		
	2	Yb	Y + Cr					
	3	Yb + Nb	Y + Cr					
	4	Pt	Nb					
15	5	Y	Nb	Cr - 30% Al - 13% Y - 0,65% Ni - ост.	Si - 12,0% Y - 2,0% Al - ост.	Nb + Pt, толщ. 0,5 мкм		
	6	Y + Pt	Yb					
	7	Y + Cr	Yb			Nb, толщ. 2,0 мкм		
	8	Y + Cr	Pt					
	9	Hf + Nb	Y					
20	10	La + Nb + Y	Cr + Si	Cr - 22% Al - 11% Y - 0,5% Ni - ост.	Si - 6,0% Y - 1,5% Al - ост.	Pt, толщ. 0,1 мкм		
	11	Yb + Nb	Yb + Nb			Cr, толщ. 0,1 мкм		
	12	Si + Cr	Hf + Nb			Cr - 24% Al - 8% Y - 0,4% Ni - ост.	Si - 8,0% Y - 1,0% Al - ост.	Pt + Cr, толщ. 2,0 мкм
	13	Y	Y					
14	Pt	Nb						
25	15	Cr + Si	Pt	Cr - 26% Al - 10% Y - 0,3% Ni - ост.	Si - 10% Y - 2,0% Al - ост.	Pt, толщ. 2,0 мкм		
	16	Nb	Cr + Si					
	17	La	Hf			Cr, толщ. 2,0 мкм		
	18	La	La					
	19	Yb + Nb	Yb					
	20	Yb	Yb				Nb + Cr, толщ. 2,0 мкм	

Режимы обработки образцов и нанесения покрытия: ионная имплантация (Nb, Pt, Yb, Y, La, Hf, Cr, Si или их сочетанием) при энергии ионов от 0,2 кэВ до 30 кэВ и дозе имплантации ионов от 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см², (диффузионный отжиг: первый вариант - в вакууме не хуже 10^{-3} мм рт.ст.; второй вариант - в среде защитного газа; температура отжига: 800°C; 900°C; 1000°C; 1200°C; 1300°C). Материал слоев и схема их чередования - согласно таблице 1.

При формировании переходного металлокерамического слоя по его толщине проводили пошаговое изменение соотношения содержания металла к керамике (в весовых %): 1% ; 3%; 5%; 10%; 15%; 20% на шаг, уменьшая количество металла по толщине переходного слоя от 100% до 0%, при толщине переходного слоя от 8 мкм до 150 мкм. При формировании переходного металлокерамического слоя газотермическим напылением проводили пошаговое изменение соотношения содержания металла к керамике: 10% ; 15%; 20% весовых на шаг, при величине шага 4 мкм; 6 мкм; 8 мкм, при толщине переходного слоя 40 мкм; 60 мкм; 80 мкм; 100 мкм; 150 мкм. При формировании переходного металлокерамического слоя вакуумными ионно-плазменными и магнетронными методами, а также электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме, проводили пошаговое изменение соотношения содержания металла к керамике: 1%; 3%; 5% весовых на шаг, при величине шага: 0,08 мкм; 0,16 мкм; 0,5 мкм; 0,8 мкм, при толщине переходного слоя: 8 мкм; 16 мкм; 40 мкм; 80 мкм; 100 мкм.

Толщины слоев составляли: по способу-прототипу металлический подслой толщиной 20 мкм и 60 мкм, керамический слой 40 мкм и 400 мкм.

Толщина металлического подслоя составляет от 8 мкм до 60 мкм, а толщина

керамического слоя составляет от 35 мкм до 400 мкм.

При формировании по предлагаемому способу толщина металлического подслоя составляла: 8 мкм; 16 мкм; 40 мкм; 60 мкм. Использовался жаростойкий сплав составов: Cr - 18%, Al - 16%, Y - 0,7%, Ni - остальное; Cr - 26%, Al - 10%, Y - от 0,5%, Ni - остальное; Cr - 34%, Al - 3%, Y - от 0,2%, Ni - остальное; Cr - 18%, Al - 16%, Y - 0,5%, Co - 16%, Ni - остальное, Cr - от 28%; Al - 10%, Y - 0,7%, Co - 30%, Ni - остальное, Cr - 34%, Al - 3%; Y - 0,2%, Co - 26%, Ni - остальное; Si - 4,0%, Y - 2,0%; Al - остальное; Si - 12,0%; Y - 1,0%, Al - остальное; Si - 10,0%, Y - 1,6%, Al - остальное. Толщина керамического слоя составляла: 35 мкм; 60 мкм; 120 мкм; 300 мкм; 400 мкм. В качестве материала керамического слоя и керамики в переходном слое использовался ZrO_2 стабилизированный Y_2O_3 в соотношении Y_2O_3 - 5...9 вес.%, ZrO_2 - остальное. Кроме того, керамика дополнительно содержала добавки оксидов La, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb и их смесей в количестве: 4%; 20%; 36%.

Были проведены испытания на выносливость и циклическую прочность образцов из никелевых и кобальтовых сплавов ЦНК-7, ЦНК-21, FSX-414, ЖС-6, ЖС-6У, ЭИ-893, U-5000 в условиях высоких температур (при 870-950°C) на воздухе. В результате проведенных испытаний было установлено следующее: условный предел выносливости (σ_{-1}) лопаток составляет:

1) по известному способу - никелевые сплавы в среднем 230-250 МПа, кобальтовые 220-235 МПа;

2) по предлагаемому способу никелевые сплавы в среднем 260-280 МПа, кобальтовые 250-265 МПа (таблица 2);

Табл.2		
№ группы образцов	Никелевые сплавы, МПа	Кобальтовые сплавы, МПа
1	2	3
1	270-290	240-260
2	260-275	240-265
3	260-280	250-275
4	275-295	250-270
5	270-285	250-270
6	275-290	245-260
7	260-280	240-260
8	270-280	250-260
9	275-290	240-260
10	270-285	250-270
11	275-290	250-270
12	275-290	245-265
13	270-285	250-270
14	275-285	250-265
15	270-285	260-275
16	285-300	245-265
17	275-290	250-270
18	270-285	245-265
19	260-280	250-270
20	270-285	240-255

Изотермическая жаростойкость покрытий оценивалась на образцах диаметром $d=10$ мм и длиной $l=30$ мм. Образцы покрытиями помещались в тигли и выдерживались на воздухе при температуре $T=1200^\circ\text{C}\pm 20^\circ\text{C}$. Жаростойкость покрытий оценивалась по характерному времени (τ) до появления первых очагов газовой коррозии или других

дефектов, которые определялись путем визуального осмотра через каждые 50 часов испытаний при температуре 1200°C. Взвешивание образцов вместе с окалиной производилось через 500 и 1000 ч испытаний, при этом определялась величина удельного прироста массы образца на единицу его поверхности по сравнению с исходным весом ΔP , г/м². Полученные результаты представлены в таблице 3.

Табл. 3				
№ группы образцов	Циклическая жаростойкость, цикл.	Изотермическая жаростойкость,		
		τ, ч	ΔP, г/м ²	
			500 ч	1000 ч
1	2	3	4	5
0	550	350	7,6	14,2
1	800	700	5,3	8,8
2	900	850	5,4	9,5
3	700	650	6,8	9,9
4	900	850	5,5	8,7
5	850	700	5,9	9,1
6	800	850	3,1	7,8
7	950	700	3,2	7,9
8	700	600	6,1	9,7
9	900	850	4,2	8,8
10	700	650	5,4	9,5
11	800	700	5,6	9,1
12	800	650	5,1	9,8
13	750	600	5,3	8,9
14	900	650	4,6	9,5
15	850	850	4,7	9,1
16	900	850	4,9	8,9
17	800	650	5,1	8,6
18	700	650	5,7	8,2
19	850	700	5,4	9,5
20	900	700	5,7	8,9

Оценка стойкости керамического слоя к отслоению в результате воздействия высоких температур и окисления границы «подслой-керамика» оценивалась по количеству циклов, которые выдерживали покрытия до разрушения керамического слоя. Цикл теплосмены представлял собой нагрев образца до 1150°C, температурную выдержку в течение 15 мин и охлаждение в воде до температуры 20°C. После каждого цикла теплосмены по наличию отслоений оценивалась стойкость покрытия. Данные по сравнительным испытаниям на термостойкость показали, что в среднем количество теплосмен до разрушения у покрытия-прототипа составило 22 цикла, а у покрытий, нанесенных по предлагаемому способу, от 45 до 56 циклов.

Повышение адгезионной прочности покрытий и предела выносливости лопаток из никелевых и кобальтовых сплавов с покрытиями (таблицы 2, 3) указывает на то, что при применении следующих вариантов получения теплозащитного покрытия: формирование на защищаемой поверхности лопатки металлического подслоя, переходного металлокерамического слоя и внешнего керамического слоя; при формировании переходного металлокерамического слоя по его толщине, проведении пошагового изменения соотношения содержания металла к керамике, в диапазоне от 1% до 20% весовых на шаг, уменьшая количество металла по толщине переходного слоя от 100% до 0%, при толщине переходного слоя от 8 мкм до 150 мкм; проведение при формировании переходного металлокерамического слоя газотермическим

напылением пошагового изменения соотношения содержания металла к керамике в диапазоне от 10% до 20% весовых на шаг, при величине шага от 4 мкм до 8 мкм, при толщине переходного слоя от 40 мкм до 150 мкм, а при формировании переходного металлокерамического слоя вакуумными ионно-плазменными методами и/или магнетронными методами, и/или электроннолучевым испарением и конденсацией в вакууме, проведение пошагового изменения соотношения содержания металла к керамике в диапазоне от 1% до 10% весовых на шаг, при величине шага от 0,08 мкм до 0,8 мкм, при толщине переходного слоя от 8 мкм до 100 мкм; использование в качестве материала керамического слоя и керамики в переходном слое ZrO_2 стабилизированного Y_2O_3 в соотношении Y_2O_3 - 5...9 вес.%, ZrO_2 - остальное; дополнительное содержание в керамике от 4% до 36% оксидов La, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb и их смесей; использование в качестве материала металлического слоя жаростойких сплавов на основе никеля и/или кобальта с добавками Cr, Al, Y, Yb, при толщине металлического подслоя от 8 мкм до 60 мкм и толщине керамического слоя от 35 мкм до 400 мкм; проведение перед нанесением металлического подслоя ионно-плазменной подготовки поверхности лопатки и ее ионно-имплантационной обработки ионами Nb, Pt, Yb, Y, La, Hf, Cr, Si или их сочетанием, при энергии ионов от 0,2 кэВ до 30 кэВ и дозе имплантации ионов от 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см; дополнительное нанесение на поверхность лопатки слоя из Nb, Pt, Cr или их сочетания толщиной от 0,1 мкм до 2,0 мкм; нанесение металлических слоев покрытия шликерным и/или гальваническим, и/или газотермическим, и/или вакуумными ионно-плазменными методами, и/или магнетронными методами, и/или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме, а керамического слоя газотермическим и/или вакуумными ионно-плазменными методами, и/или магнетронными методами, и/или электроннолучевым испарением и конденсацией в вакууме; использование в качестве материала металлического подслоя жаростойкого сплава состава: Cr - от 18% до 34%; Al - от 3% до 16%; Y - от 0,2% до 0,7%; Ni - остальное, или состава: Cr - от 18% до 34%; Al - от 3% до 16%; Y - от 0,2% до 0,7%; Co - от 16% до 30%; Ni - остальное, или состава: Si - от 4,0% до 12,0%; Y - от 1,0 до 2,0%; Al - остальное; производство после нанесения покрытия его диффузионного отжига в вакууме не хуже 10^{-3} мм рт.ст. или в среде защитного газа, выбирая температуру в диапазоне от 800°C до 1300°C; использование в качестве лопатки турбины лопатки из никелевых или кобальтовых жаропрочных сплавов; выполнение в теплозащитном покрытии преимущественно для рабочих лопаток турбин газотурбинных двигателей и энергетических установок, содержащем металлический подслой, нанесенный на поверхность лопатки, переходного слоя, содержащего металлическую и керамическую фазы и нанесенного на переходный слой внешний керамический слой на основе ZrO_2 стабилизированный Y_2O_3 ; выполнение переходного металлокерамического слоя многослойным при пошаговом уменьшении содержания металлической составляющей в каждом слое переходного слоя от 1% до 20% весовых в направлении перехода от металлического подслоя к керамическому слою, при уменьшении соотношения металла к керамике по толщине переходного слоя от 100% до 0% и толщине переходного слоя от 8 мкм до 100 мкм; использование переходного металлокерамического слоя, полученного: или газотермическим напылением при пошаговом изменении соотношения содержания металла к керамике в диапазоне от 10% до 20% весовых на шаг, при величине шага от 4 мкм до 8 мкм, при толщине переходного слоя от 40 мкм до 150 мкм, или вакуумными ионно-плазменными методами, и/или магнетронными методами, и/или электроннолучевым испарением и конденсацией в вакууме, при пошаговом изменении соотношения

содержания металла к керамике в диапазоне от 1% до 10% весовых на шаг, при
 величине шага от 0,08 мкм до 0,8 мкм, при толщине переходного слоя от 8 мкм до 100
 мкм; использование в качестве материала металлического подслоя жаростойких
 сплавов на основе никеля и/или кобальта с добавками Cr, Al, Y, Yb, при толщине
 5 металлического подслоя от 8 мкм до 60 мкм; нанесение металлического подслоя на
 поверхность основного материала лопатки, подвергнутую ионно-имплантационной
 обработке ионами Nb, Pt, Yb, Y, La, Hf, Cr, Si или их сочетанием, при энергии ионов
 от 0,2 кэВ до 30 кэВ и дозе имплантации ионов от 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см²;
 10 использование в теплозащитном покрытии керамического слоя толщиной от 35 мкм
 до 400 мкм; использование в качестве материала керамического слоя и керамики в
 переходном слое ZrO₂ стабилизированного Y₂O₃ в соотношении Y₂O₃ - 5...9 вес.%,
 ZrO₂ - остальное; использование дополнительно в керамике от 4% до 36% оксидов La,
 15 Pr, Nd, Sm, Eu, Tb и их смесей, позволяют достичь технического результата
 заявляемого изобретения - повышения эксплуатационной прочности сцепления на
 границе «переходный слой-внешний керамический слой» при одновременном
 повышении выносливости и циклической прочности деталей с защитными покрытиями.

Формула изобретения

1. Способ получения теплозащитного покрытия, преимущественно для рабочих
 лопаток турбин газотурбинных двигателей и энергетических установок, включающий
 формирование на защищаемой поверхности лопатки металлического подслоя,
 25 переходного металлокерамического слоя и внешнего керамического слоя на
 основе ZrO₂, стабилизированного Y₂O₃, отличающийся тем, что переходный
 металлокерамический слой выполняют многослойным толщиной от 8 до 150 мкм из
 жаростойкого сплава на основе никеля и кобальта с добавками Cr, Al, Y, Yb, с
 пошаговым изменением соотношения содержания металлической составляющей в
 30 каждом слое от 1 до 20 вес.% в направлении перехода от металлического подслоя к
 керамическому слою и с уменьшением количества металлической составляющей к
 керамической составляющей от 100 до 0% по толщине переходного слоя.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что переходный металлокерамический слой
 35 формируют газотермическим напылением с пошаговым изменением соотношения
 содержания металла к керамике в диапазоне от 10 до 20 вес.% на шаг при величине
 шага от 4 до 8 мкм, при толщине переходного слоя от 40 до 150 мкм.

3. Способ по п.1, отличающийся тем, что переходный металлокерамический слой
 40 формируют вакуумными ионно-плазменными методами, или магнетронными
 методами, или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме и проводят
 пошаговое изменение соотношения содержания металла к керамике в диапазоне от 1
 до 10 вес.% на шаг при величине шага от 0,08 до 0,8 мкм, при толщине переходного
 слоя от 8 до 100 мкм.

4. Способ по любому из пп.1-3, отличающийся тем, что в качестве материала
 45 керамического слоя и керамики в переходном слое используют ZrO₂,
 стабилизированный Y₂O₃ в соотношении Y₂O₃ - 5...9 вес.%, ZrO₂ - остальное.

5. Способ по п.4, отличающийся тем, что керамика дополнительно содержит от 4
 до 36% оксидов La, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb и их смесей.

6. Способ по любому из пп.1-3, отличающийся тем, что в качестве материала
 50 металлического слоя используют жаростойкие сплавы на основе никеля и/или
 кобальта с добавками Cr, Al, Y, Yb, причем толщина металлического подслоя
 составляет от 8 до 60 мкм, а толщина керамического слоя составляет от 35 до 400 мкм.

7. Способ по п.4, отличающийся тем, что в качестве материала металлического слоя используют жаростойкие сплавы на основе никеля и/или кобальта с добавками Cr, Al, Y, Yb, причем толщина металлического подслоя составляет от 8 до 60 мкм, а толщина керамического слоя составляет от 35 до 400 мкм.

5 8. Способ по любому из пп.1-3, 5 и 7, отличающийся тем, что перед нанесением металлического подслоя проводят ионно-плазменную подготовку поверхности лопатки и ее ионно-имплантационную обработку ионами Nb, Pt, Yb, Y, La, Hf, Cr, Si или их сочетанием при энергии ионов от 0,2 до 30 кэВ и дозе имплантации ионов от 10¹⁰ до 5·10²⁰ ион/см².

10 9. Способ по п.4, отличающийся тем, что перед нанесением металлического подслоя проводят ионно-плазменную подготовку поверхности лопатки и ее ионно-имплантационную обработку ионами Nb, Pt, Yb, Y, La, Hf, Cr, Si или их сочетанием при энергии ионов от 0,2 до 30 кэВ и дозе имплантации ионов от 10¹⁰ до 5·10²⁰ ион/см².

15 10. Способ по п.6, отличающийся тем, что перед нанесением металлического подслоя проводят ионно-плазменную подготовку поверхности лопатки и ее ионно-имплантационную обработку ионами Nb, Pt, Yb, Y, La, Hf, Cr, Si или их сочетанием при энергии ионов от 0,2 до 30 кэВ и дозе имплантации ионов от 10¹⁰ до 5·10²⁰ ион/см².

20 11. Способ по любому из пп.1-3, 5, 7, 9 и 10, отличающийся тем, что перед нанесением металлического подслоя на поверхность лопатки дополнительно наносят слой из Nb, Pt, Cr или их сочетания толщиной от 0,1 до 2,0 мкм.

25 12. Способ по п.4, отличающийся тем, что перед нанесением металлического подслоя на поверхность лопатки дополнительно наносят слой из Nb, Pt, Cr или их сочетания толщиной от 0,1 до 2,0 мкм.

13. Способ по п.6, отличающийся тем, что перед нанесением металлического подслоя на поверхность лопатки дополнительно наносят слой из Nb, Pt, Cr или их сочетания толщиной от 0,1 до 2,0 мкм.

30 14. Способ по п.8, отличающийся тем, что перед нанесением металлического подслоя на поверхность лопатки дополнительно наносят слой из Nb, Pt, Cr или их сочетания толщиной от 0,1 до 2,0 мкм.

35 15. Способ по любому из пп.1-3, 5, 7, 9, 10 и 12-14, отличающийся тем, что нанесение металлических слоев покрытия осуществляют шликерным, или гальваническим, или газотермическим, или вакуумными ионно-плазменными методами, или магнетронными методами, или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме, а керамического слоя проводят газотермическим или вакуумными ионно-плазменными методами, или магнетронными методами, или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме.

40 16. Способ по п.4, отличающийся тем, что нанесение металлических слоев покрытия осуществляют шликерным, или гальваническим, или газотермическим, или вакуумными ионно-плазменными методами, или магнетронными методами, или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме, а керамического слоя проводят газотермическим, или вакуумными ионно-плазменными методами, или магнетронными методами, или электроннолучевым испарением и конденсацией в вакууме.

45 17. Способ по п.6, отличающийся тем, что нанесение металлических слоев покрытия осуществляют шликерным, или гальваническим, или газотермическим, или вакуумными ионно-плазменными методами, или магнетронными методами, или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме, а керамического слоя проводят газотермическим, или вакуумными ионно-плазменными методами, или

магнетронными методами, или электроннолучевым испарением и конденсацией в вакууме.

18. Способ по п.8, отличающийся тем, что нанесение металлических слоев покрытия осуществляют шликерным, или гальваническим, или газотермическим или вакуумными ионно-плазменными методами или магнетронными методами или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме, а керамического слоя проводят газотермическим или вакуумными ионно-плазменными методами или магнетронными методами или электроннолучевым испарением и конденсацией в вакууме.

19. Способ по п.11, отличающийся тем, что нанесение металлических слоев покрытия осуществляют шликерным, или гальваническим, или газотермическим, или вакуумными ионно-плазменными методами, или магнетронными методами, или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме, а керамического слоя проводят газотермическим, или вакуумными ионно-плазменными методами, или магнетронными методами, или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме.

20. Способ по любому из пп.1-3, отличающийся тем, что в качестве материала металлического подслоя используют жаростойкий сплав состава: Cr - от 18 до 34%; Al - от 3 до 16%; Y - от 0,2 до 0,7%; Ni - остальное или состава: Cr - от 18 до 34%; Al - от 3 до 16%; Y - от 0,2 до 0,7%; Co - от 16 до 30%; Ni - остальное или состава: Si - от 4,0 до 12,0%; Y - от 1,0 до 2,0%; Al - остальное, при этом толщина жаростойкого слоя составляет от 10 до 60 мкм.

21. Способ по любому из пп.7, 9, 10, 12-14 и 16-19, отличающийся тем, что в качестве жаростойкого сплава используют сплавы состава: Cr - от 18 до 34%; Al - от 3 до 16%; Y - от 0,2 до 0,7%; Ni - остальное или состава: Cr - от 18 до 34%; Al - от 3 до 16%; Y - от 0,2 до 0,7%; Co - от 16 до 30%; Ni - остальное или состава: Si - от 4,0 до 12,0%; Y - от 1,0 до 2,0%; Al - остальное.

22. Способ по п.6, отличающийся тем, что в качестве материала металлического подслоя используют жаростойкий сплав состава: Cr - от 18 до 34%; Al - от 3 до 16%; Y - от 0,2 до 0,7%; Ni - остальное или состава: Cr - от 18 до 34%; Al - от 3 до 16%; Y - от 0,2 до 0,7%; Co - от 16 до 30%; Ni - остальное или состава: Si - от 4,0 до 12,0%; Y - от 1,0 до 2,0%; Al - остальное.

23. Способ по п.8, отличающийся тем, что в качестве материала металлического подслоя используют жаростойкий сплав состава: Cr - от 18 до 34%; Al - от 3 до 16%; Y - от 0,2 до 0,7%; Ni - остальное или состава: Cr - от 18 до 34%; Al - от 3 до 16%; Y - от 0,2 до 0,7%; Co - от 16 до 30%; Ni - остальное или состава: Si - от 4,0 до 12,0%; Y - от 1,0 до 2,0%; Al - остальное.

24. Способ по п.11, отличающийся тем, что в качестве материала металлического подслоя используют жаростойкий сплав состава: Cr - от 18 до 34%; Al - от 3 до 16%; Y - от 0,2 до 0,7%; Ni - остальное или состава: Cr - от 18 до 34%; Al - от 3 до 16%; Y - от 0,2 до 0,7%; Co - от 16 до 30%; Ni - остальное или состава: Si - от 4,0 до 12,0%; Y - от 1,0 до 2,0%; Al - остальное.

25. Способ по п.15, отличающийся тем, что в качестве материала металлического подслоя используют жаростойкий сплав состава: Cr - от 18 до 34%; Al - от 3 до 16%; Y - от 0,2 до 0,7%; Ni - остальное или состава: Cr - от 18 до 34%; Al - от 3 до 16%; Y - от 0,2 до 0,7%; Co - от 16 до 30%; Ni - остальное или состава: Si - от 4,0 до 12,0%; Y - от 1,0 до 2,0%; Al - остальное.

26. Способ по любому из пп.1-3, 5, 7, 9, 10, 12-14, 16-19 и 22-25, отличающийся тем,

что после нанесения покрытия производят его диффузионный отжиг в вакууме не ниже 10^{-3} мм рт.ст. или среде защитного газа, выбирая температуру в диапазоне от 800 до 1300°C .

5 27. Способ по п.6, отличающийся тем, что после нанесения покрытия производят его диффузионный отжиг в вакууме не ниже 10^{-3} мм рт.ст. или среде защитного газа, выбирая температуру в диапазоне от 800 до 1300°C .

10 28. Способ по п.8, отличающийся тем, что после нанесения покрытия производят его диффузионный отжиг в вакууме не хуже 10^{-3} мм рт.ст. или среде защитного газа, выбирая температуру в диапазоне от 800 до 1300°C .

29. Способ по п.11, отличающийся тем, что после нанесения покрытия производят его диффузионный отжиг в вакууме не ниже 10^{-3} мм рт.ст. или среде защитного газа, выбирая температуру в диапазоне от 800 до 1300°C .

15 30. Способ по п.15, отличающийся тем, что после нанесения покрытия производят его диффузионный отжиг в вакууме не ниже 10^{-3} мм рт.ст. или среде защитного газа, выбирая температуру в диапазоне от 800 до 1300°C .

20 31. Способ по любому из пп.1-3, 5, 7, 9, 10, 12-14, 16-19, 22-25 и 27-30, отличающийся тем, что в качестве лопатки турбины используются лопатки из никелевых или кобальтовых жаропрочных сплавов.

25 32. Теплозащитное покрытие, преимущественно для рабочих лопаток турбин газотурбинных двигателей и энергетических установок, содержащее металлический подслоя, нанесенный на поверхность лопатки, переходный слой, содержащий металлическую и керамическую фазы и нанесенный на переходный слой внешний керамический слой на основе ZrO_2 , стабилизированный Y_2O_3 , отличающееся тем, что переходный металлокерамический слой выполнен многослойным толщиной от 8 до 150 мкм из жаростойкого сплава на основе никеля и кобальта с добавками Cr, Al, Y, Yb с пошаговым изменением соотношения содержания металлической составляющей в каждом слое от 1 до 20 вес.% в направлении перехода от металлического подслоя к керамическому слою и с уменьшением количества металлической составляющей к керамической составляющей от 100 до 0% по толщине переходного слоя.

35 33. Теплозащитное покрытие по п.32, отличающееся тем, что переходный металлокерамический слой получен газотермическим напылением с пошаговым изменением соотношения содержания металла к керамике в диапазоне от 10 до 20 вес.% на шаг при величине шага от 4 до 8 мкм, при толщине переходного слоя от 40 до 100 мкм.

40 34. Теплозащитное покрытие по п.32, отличающееся тем, что переходный металлокерамический слой получен вакуумными ионно-плазменными методами, или магнетронными методами, или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме с пошаговым изменением соотношения содержания металла к керамике в диапазоне от 1 до 10 вес.% на шаг, при величине шага от 0,08 до 0,8 мкм, при толщине переходного слоя от 8 до 100 мкм.

45 35. Теплозащитное покрытие по п.32, отличающееся тем, что в качестве материала металлического подслоя использованы жаростойкие сплавы на основе никеля и/или кобальта с добавками Cr, Al, Y, Yb, причем толщина металлического подслоя составляет от 8 до 60 мкм, а металлический подслоя нанесен на поверхность основного материала лопатки, подвергнутую ионно-имплантационной обработке ионами Nb, Pt, Yb, Y, La, Hf, Cr, Si или их сочетанием, при энергии ионов от 0,2 до 30

кэВ и дозе имплантации ионов от 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см².

36. Теплозащитное покрытие по любому из пп.32-35, отличающееся тем, что толщина керамического слоя составляет от 35 до 400 мкм, а в качестве материала керамического слоя и керамики в переходном слое использован ZrO_2 , стабилизированный Y_2O_3 в соотношении Y_2O_3 - 5...9 вес.%, ZrO_2 - остальное.

37. Теплозащитное покрытие по п.36, отличающееся тем, что керамика дополнительно содержит от 4 до 36% оксидов La, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb и их смесей.

10

15

20

25

30

35

40

45

50