



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(51) МПК
C23C 28/00 (2006.01)
C23C 14/02 (2006.01)
C23C 14/22 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ(21)(22) Заявка: **2009144420/02**, 30.11.2009(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
30.11.2009

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **30.11.2009**(45) Опубликовано: **20.08.2011** Бюл. № 23(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),
Смыслова Марина Константиновна (RU),
Смыслов Анатолий Михайлович (RU),
Быбин Андрей Александрович (RU),
Кишалов Евгений Александрович (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

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

(54) ТЕПЛОЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ 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, и, в особенности, газовых турбин авиадвигателей. Способ включает формирование на защищаемой поверхности лопатки металлического подслоя из жаростойкого сплава, переходного металлокерамического слоя и внешнего керамического слоя из ZrO_2 , стабилизированного Y_2O_3 . Сначала наносят металлический подслой. На него наносят слой

высокотемпературного припоя, на который наносят керамический слой. После этого выполняют диффузионный отжиг при температуре, обеспечивающей получение жидкой фазы металла подслоя. Формируют переходный металлокерамический слой за счет смачивания керамического слоя металлом нижележащего высокотемпературного припоя на глубину, равную толщине переходного слоя. В результате повышается эксплуатационная прочность сцепления на границе переходный слой - внешний керамический слой при одновременном повышении выносливости и циклической прочности деталей с защитными покрытиями. 2 н. и 24 з.п. ф-лы, 3 табл.



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(51) Int. Cl.
C23C 28/00 (2006.01)
C23C 14/02 (2006.01)
C23C 14/22 (2006.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(21)(22) Application: **2009144420/02, 30.11.2009**

(24) Effective date for property rights:
30.11.2009

Priority:

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

(45) Date of publication: **20.08.2011 Bull. 23**

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),
Smyslova Marina Konstantinovna (RU),
Smyslov Anatolij Mikhajlovich (RU),
Bybin Andrej Aleksandrovich (RU),
Kishalov Evgenij Aleksandrovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

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

(54) HEAT RESISTANT COATING AND PROCEDURE FOR ITS FABRICATION

(57) Abstract:

FIELD: machine building.

SUBSTANCE: procedure consists in generation of metal sub-layer of heat resistant alloy, transition metal ceramic layer and external ceramic layer of ZrO₂, stabilised with Y₂O₃ on protected surface of blade. First there is applied a metal sub-layer. A layer of high-temperature solder is applied on the sub-layer, and the ceramic layer is applied on the layer of solder. Further, there is carried out

diffusion annealing at temperature facilitating production of liquid phase of sub-layer metal. There is formed transition metal-ceramic layer due to wetting ceramic layer with metal of a lower high temperature solder at depth equal to thickness of the transition layer.

EFFECT: increased operational hardness of cohesion at boundary of transition layer-external ceramic layer at simultaneous raise of durability and cyclic strength of parts with protective coating.

26 cl, 3 tbl

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, являются 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 к 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 С23С 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 №4904542 "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. Входящие 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 на рабочих поверхностях лопаток из никелевых или
50 кобальтовых жаропрочных сплавов турбин газотурбинных двигателей и энергетических установок, включающий формирование на защищаемой поверхности лопатки металлического подслоя из жаростойкого сплава, переходного металлокерамического слоя и внешнего керамического слоя из ZrO_2 ,

стабилизированного Y_2O_3 (патент РФ №2078148, МПК С23С 14/06, СПОСОБ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ НА ЛОПАТКУ ТУРБИНЫ. Оpubл. 27.04.1997).

Известный способ нанесения теплозащитного покрытия на лопатку турбины включает также предварительную абразивно-жидкостную обработку и обработку
5 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
10 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
15 №2228387. МПК С23С 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 эксплуатационная прочность 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, на рабочих поверхностях лопаток из никелевых или кобальтовых жаропрочных сплавов турбин газотурбинных двигателей и энергетических установок, включающем формирование на защищаемой поверхности лопатки металлического подслоя из жаростойкого сплава, переходного металлокерамического слоя и
35 внешнего керамического слоя из ZrO_2 , стабилизированного Y_2O_3 , в отличие от прототипа, на защищаемую поверхность лопатки сначала наносят металлический подслой, на него наносят слой высокотемпературного припоя, на который наносят керамический слой, после чего выполняют диффузионный отжиг при температуре, обеспечивающей получение жидкой фазы металла подслоя, и формируют переходный металлокерамический слой за счет смачивания керамического слоя металлом
40 высокотемпературного припоя на глубину, равную толщине переходного слоя, при этом, как вариант, в качестве высокотемпературного припоя используют сплав системы никель-хром-кремний.

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
50 от 0,2 кэВ до 30 кэВ и дозе имплантации ионов от 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см², а в качестве керамического слоя используют ZrO_2 , стабилизированную Y_2O_3 , в соотношении Y_2O_3 - 5...9% вес., ZrO_2 - остальное, при этом, как вариант, толщина переходного слоя составляет от 6 мкм до 35 мкм.

Технический результат достигается также тем, что в способе получения теплозащитного покрытия перед нанесением металлического подслоя 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 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.

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, при этом толщина жаростойкого слоя составляет от 10 до 60 мкм, причем на жаростойкий слой наносят слой высокотемпературного припоя толщиной от 3 мкм до 40 мкм.

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.

Технический результат достигается также тем, что в теплозащитном покрытии на рабочих поверхностях лопаток из никелевых или кобальтовых жаропрочных сплавов турбин газотурбинных двигателей и энергетических установок, состоящем из нанесенного на защищаемую поверхность лопатки металлического подслоя из жаростойкого сплава, переходного металлического слоя из ZrO_2 , стабилизированного Y_2O_3 , в отличие от прототипа, переходный металлокерамический слой получен смачиванием керамического слоя металлом высокотемпературного припоя на глубину, равную толщине переходного слоя.

Технический результат достигается также тем, что в теплозащитном покрытии содержится металлический жаростойкий слой из 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, при этом толщина жаростойкого слоя составляет от 10 до 60 мкм, причем переходный слой образован путем нанесения на жаростойкий слой слоя из высокотемпературного припоя толщиной от 3 мкм до 40 мкм, с его последующим расплавлением при термообработке покрытия, смачиванием части керамического слоя, прилегающего к металлическому подслою, с образованием переходного металлокерамического слоя толщиной от 6 мкм до 35 мкм при затвердевании высокотемпературного припоя в процессе его охлаждения.

Технический результат достигается также тем, что в теплозащитном покрытии содержится поверхностный слой лопатки из кобальтового или никелевого жаропрочного сплава, модифицированный имплантацией ионами Nb, Pt, Yb, Y, La, Hf, Cr, Si или их сочетанием, при энергии ионов от 0,2 кэВ до 30 кэВ при дозе имплантации ионов от 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см², а в качестве керамического слоя используют ZrO_2 ,

стабилизированную Y_2O_3 , в соотношении $Y_2O_3 - 5...9\%$ вес., ZrO_2 - остальное при толщине керамического слоя от 40 мкм до 380 мкм.

Известные теплозащитные покрытия (ТЗП) имеют преимущественно эквидистантную покрываемой поверхности лопатки границу между керамическим и металлическим слоем. В процессе эксплуатации при возникновении и росте оксидного слоя (постоянно растущего оксидного слоя) на границе «подслой - керамический слой» в силу ряда известных факторов начинается отслоение внешнего керамического слоя. В этой связи, эксплуатационные свойства теплозащитных покрытий главным образом и определяются адгезионной стойкостью системы «подслой - керамический слой». В то же время при использовании конструкции покрытия, в котором металлическая составляющая подслоя, имеющая качественное сцепление с основным материалом, обеспечивает в то же время хорошее сцепление с керамическим слоем за счет «анкерного» эффекта, внедряясь в керамический слой на заданную глубину. Таким образом, граница между керамическим и металлическим слоями переориентировывается из «преимущественно эквидистантной покрываемой поверхности» (как в известных покрытиях), в «преимущественно перпендикулярную покрываемой поверхности». Это позволяет достичь следующих преимуществ: анкерное соединение, обеспечиваемое внедрением металла в керамику; градиентный характер переходного слоя, обеспечивающий плавный 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 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 (ЦНК-7, ЦНК-21, FSX-414, ЖС-6, ЖС-6У, ЭИ-893, U-5000) приведены в таблице 1.

Таблица 1						
№ Группы образцов	Ионы, имплантируемые в основу	Ионы, имплантируемые в покрытие	Внутренний слой	Внешний слой	Дополнительный слой на поверхности лопатки	Дополнительный слой на внутреннем слое
1	2	3	4	5	6	7
(Прот)	-	-	Co - 20% Cr - 30% Al - 13% Y - 0,6% Ni - ост.	Si - 12% Ni - 10% В - 1,6% Al - ост.	-	-
1	Nb	Y+Pt	Cr - 18%	Si - 4,0%	Nb, толщ. 0,1 мкм	Nb, толщ. 0,1 мкм
2	Yb	Y+Cr	Al - 5%	Y - 1,0%		Pt, толщ. 0,1 мкм
3	Yb+Nb	Y+Cr	Y - 0,2%	Al - ост.		
4	Pt	Nb	Ni - ост.			
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	Nb, толщ. 2,0 мкм
6	Y+Pt	Yb			Nb, толщ. 2,0 мкм	Cr, толщ. 0,1 мкм
7	Y+Cr	Yb				
8	Y+Cr	Pt			Pt, толщ. 0,1 мкм	Pt+Cr, толщ. 2,0 мкм
9	Hf+Nb	Y	Cr - 22% Al - 11%, Y - 0,5%,	Si - 6,0% Y - 1,5% Al - ост.		
10	La+Nb+Y	Cr+Si				

	11	Yb+Nb	Yb+Nb	Ni - ост.		Cr, толщ. 0,1 мкм	Nb+Cr, толщ. 2,0 мкм
	12	Si+Cr	Hf+Nb				
	13	Y	Y	Cr - 24% Al - 8%, Y - 0,4% Ni - ост.	Si - 8,0% Y - 1,0% Al - ост.	Pt+Cr, толщ. 2,0 мкм	Pt, толщ. 2,0 мкм
5	14	Pt	Nb				
	15	Cr+Si	Pt				
	16	Nb	Cr+Si				
	17	La	Hf	Cr - 26% Al - 10%, Y - 0,3%,	Si - 10% Y - 2,0% Al - ост.	Cr, толщ. 2,0 мкм	Pt, толщ. 0,1 мкм
	18	La	La				
10	19	Yb+Nb	Yb	Ni - ост.		Nb+Cr, толщ. 2,0 мкм	Cr, толщ. 2,0 мкм
	20	Yb	Yb				

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 в вакууме при температуре 400°C в течение 1 ч). Материал слоев и схема их чередования - согласно таблицы 1. Толщины слоев составляли: по способу-прототипу внутренний слой - толщиной 40 мкм и 80 мкм, внешний слой - 80 мкм и 40 мкм. При формировании по предлагаемому способу толщина жаростойкого слоя составляла от 10 мкм до 60 мкм (10 мкм, 25 мкм, 35 мкм, 40 мкм, 50 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. На жаростойкий слой наносили слой высокотемпературного припоя толщиной от 3 мкм до 40 мкм (3 мкм, 8 мкм, 20 мкм, 30 мкм, 40 мкм). Толщина переходного слоя составляла от 6 мкм до 35 мкм (средняя толщина: 6 мкм, 14 мкм, 22 мкм, 28 мкм, 35 мкм), толщина керамического слоя от 40 мкм до 380 мкм (средняя толщина: 40 мкм, 80 мкм, 120 мкм, 260 мкм, 320 мкм, 380 мкм). В качестве высокотемпературного припоя использовали сплав системы никель-хром-кремний. Были использованы также следующие припои: ПР-ДГ24Н5 (ВПр-2); ПР-ДН29Г28К5СР (ВПр-4); ПР-Н58Р; ПР-Н58Ф; ПР-НГ18ХМД (ВПр-33); ПР-НГ34К10 (ВПр-7).

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 260-285 МПа, кобальтовые - 250-270 МПа (таблица 2);

№ группы образцов	Никелевые сплавы, МПа	Кобальтовые сплавы, МПа
1	2	3
1	260-280	240-250
2	265-285	250-270
3	270-290	250-270
4	270-295	250-265
5	270-290	250-270

5	6	275-295	245-265
	7	260-285	250-270
	8	270-290	250-265
	9	275-295	240-255
	10	270-290	250-275
	11	275-290	250-275
	12	285-300	245-270
	13	270-290	250-275
	14	275-290	250-265
10	15	260-280	260-275
	16	285-300	245-275
	17	275-295	250-270
	18	270-285	245-270
	19	260-280	250-275
	20	285-300	240-250

15

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±20°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.

20

25

Таблица 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	7,4	13,1	
1	750	650	6,0	9,3	
2	700	600	5,6	9,4	
3	800	700	6,2	9,8	
35	4	900	750	5,3	8,9
	5	850	700	5,8	9,2
	6	900	850	3,7	7,8
	7	950	850	3,3	7,9
	8	700	600	6,1	9,7
40	9	900	850	4,2	8,8
	10	800	700	5,6	10,1
	11	900	800	4,3	8,9
	12	750	650	5,7	9,9
	13	750	600	5,9	10,2
45	14	900	800	4,6	9,8
	15	850	750	4,8	9,5
	16	900	850	4,5	8,9
	17	800	700	5,3	8,6
	18	800	650	5,6	8,9
50	19	850	700	5,4	9,5
	20	800	700	5,8	9,7

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 24 цикла, а у покрытий, нанесенных по предлагаемому способу, - от 38 до 52 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 из жаростойкого сплава, переходного металлокерамического слоя и внешнего керамического слоя из ZrO_2 , стабилизированного Y_2O_3 , при нанесении на защищаемую поверхность лопатки сначала металлического подслоя, нанесение на него слоя высокотемпературного припоя, на который наносят керамический слой, после чего выполняют диффузионный отжиг при температуре, обеспечивающей получение жидкой фазы металла подслоя; формирование переходного металлокерамического слоя за счет смачивания керамического слоя металлом высокотемпературного припоя на глубину, равную толщине переходного слоя; использование в качестве металла нижележащего слоя высокотемпературного припоя системы никель-хром-кремний; 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/см²; использование в качестве керамического слоя ZrO_2 , стабилизированного Y_2O_3 , в соотношении Y_2O_3 - 5...9% вес., ZrO_2 - остальное, при толщине керамического слоя от 40 мкм до 380 мкм, а переходного слоя от 6 мкм до 35 мкм; дополнительное нанесение перед нанесением металлического подслоя 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, или газотермическим, или вакуумными ионно-плазменными методами, или магнетронными методами, или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме, а керамического слоя - газотермическим или вакуумными ионно-плазменными методами, или магнетронными методами, или электронно-лучевым 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, при толщине жаростойкого слоя от 10 до 60 мкм, при нанесении на жаростойкий слой слоя высокотемпературного припоя толщиной от 3 мкм до 40 мкм; диффузионный отжиг покрытия в вакууме не хуже 10⁻³ мм рт.ст. или среде защитного газа, при температуре от 800°C до 1300°C; использование в теплозащитном покрытии, состоящем из нанесенного на защищаемую поверхность лопатки металлического подслоя из жаростойкого сплава, переходного металлического слоя из ZrO_2 , стабилизированного Y_2O_3 , при получении переходного металлокерамического слоя смачиванием керамического слоя металлом высокотемпературного припоя на глубину, равную толщине переходного слоя; использование в покрытии металлического жаростойкого слоя из 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 -
 5 остальное, или состава: Si - от 4,0% до 12,0%; Y - от 1,0 до 2,0%; Al - остальное, при
 толщине жаростойкого слоя от 10 до 60 мкм, при переходном слое, образованном
 путем нанесения на жаростойкий слой слоя из высокотемпературного припоя
 10 толщиной от 3 мкм до 40 мкм, с его последующим расплавлением при термообработке
 покрытия, смачиванием части керамического слоя, прилежащего к металлическому
 подслою, с образованием переходного металлокерамического слоя толщиной от 6
 15 мкм до 35 мкм при затвердевании высокотемпературного припоя в процессе его
 охлаждения; использование поверхностного слоя лопатки из кобальтового или
 никелевого жаропрочного сплава, модифицированного имплантацией ионами Nb, Pt,
 Yb, Y, La, Hf, Cr, Si или их сочетанием, при энергии ионов от 0,2 кэВ до 30 кэВ при дозе
 имплантации ионов от 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см², использование в качестве керамического
 20 слоя ZrO₂, стабилизированного Y₂O₃, в соотношении Y₂O₃ - 5..9% вес., ZrO₂ -
 остальное - 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 на рабочих поверхностях лопаток
 из никелевых или кобальтовых жаропрочных сплавов турбин газотурбинных
 25 двигателей и энергетических установок, включающий формирование на защищаемой
 поверхности лопатки металлического подслоя из жаростойкого сплава, переходного
 металлокерамического слоя и внешнего керамического слоя из ZrO₂,
 стабилизированного Y₂O₃, отличающийся тем, что на защищаемую поверхность
 лопатки сначала наносят металлический подслой, на него наносят слой
 30 высокотемпературного припоя, на который наносят керамический слой, после чего
 выполняют диффузионный отжиг при температуре, обеспечивающей получение
 жидкой фазы металла подслоя, и формируют переходный металлокерамический слой
 за счет смачивания керамического слоя металлом нижележащего
 35 высокотемпературного припоя на глубину, равную толщине переходного слоя.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что в качестве высокотемпературного припоя
 используют сплав системы никель-хром-кремний.

3. Способ по любому из пп.1, 2, отличающийся тем, что перед нанесением
 металлического подслоя проводят ионно-плазменную подготовку поверхности
 40 лопатки и ее ионно-имплантационную обработку ионами Nb, Pt, Yb, Y, La, Hf, Cr, Si
 или их сочетанием, при энергии ионов 0,2 - 30 кэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} -
 $5 \cdot 10^{20}$ ион/см², а в качестве керамического слоя используют ZrO₂,
 стабилизированную Y₂O₃ в соотношении Y₂O₃ 5 - 9 вес.%, ZrO₂ - остальное, причем
 45 толщина керамического слоя составляет 40 - 380 мкм.

4. Способ по любому из пп.1-2, отличающийся тем, что толщина переходного слоя
 составляет 6 - 35 мкм.

5. Способ по п.3, отличающийся тем, что толщина переходного слоя составляет 6 -
 35 мкм.

6. Способ по любому из пп.1-2, отличающийся тем, что перед нанесением
 50 металлического подслоя на поверхность лопатки дополнительно наносят слой из Nb,
 Pt, Cr или их сочетания толщиной 0,1 - 2,0 мкм.

7. Способ по п.3, отличающийся тем, что перед нанесением металлического подслоя

на поверхность лопатки дополнительно наносят слой из Nb, Pt, Cr или их сочетания толщиной 0,1 - 2,0 мкм.

5 8. Способ по любому из пп.1-2, 5, 7, отличающийся тем, что нанесение металлических слоев покрытия осуществляют шликерным, 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
10 вакууме.

9. Способ по п.3, отличающийся тем, что нанесение металлических слоев покрытия осуществляют шликерным, или газотермическим, или вакуумными ионно-плазменными методами, или магнетронными методами, или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме, а керамического слоя проводят
15 газотермическим, или вакуумными ионно-плазменными методами, или магнетронными методами, или электроннолучевым испарением и конденсацией в вакууме.

10. Способ по п.4, отличающийся тем, что нанесение металлических слоев покрытия осуществляют шликерным, 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
20 вакууме.

11. Способ по п.6, отличающийся тем, что нанесение металлических слоев покрытия осуществляют шликерным, 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
25 вакууме.

12. Способ по любому из пп.1-2, 5, 8-11, отличающийся тем, что в качестве материала металлического подслоя используют жаростойкий сплав состава: Cr 18 - 34%; Al 3 - 16%; Y 0,2 - 0,7%; Ni - остальное или состава: Cr 18 - 34%; Al 3 - 16%; Y 0,2 - 0,7%; Co 16 - 30%; Ni - остальное или состава: Si 4,0 - 12,0%; Y 1,0 - 2,0%; Al - остальное, при этом толщина жаростойкого слоя составляет 10 - 60 мкм, причем на жаростойкий слой наносят слой высокотемпературного припоя толщиной 3 - 40 мкм.
35
40

13. Способ по п.3, отличающийся тем, что в качестве материала металлического подслоя используют жаростойкий сплав состава: Cr 18 - 34%; Al 3 - 16%; Y 0,2 - 0,7%; Ni - остальное или состава: Cr 18 - 34%; Al 3 - 16%; Y 0,2 - 0,7%; Co 16 - 30%; Ni - остальное или состава: Si 4,0 - 12,0%; Y 1,0 - 2,0%; Al - остальное, при этом толщина жаростойкого слоя составляет 10 - 60 мкм, причем на жаростойкий слой наносят слой высокотемпературного припоя толщиной 3 - 40 мкм.
45

14. Способ по п.4, отличающийся тем, что в качестве материала металлического подслоя используют жаростойкий сплав состава: Cr 18 - 34%; Al 3 - 16%; Y 0,2 - 0,7%; Ni - остальное или состава: Cr 18 - 34%; Al 3 - 16%; Y 0,2 - 0,7%; Co 16 - 30%; Ni - остальное или состава: Si 4,0 - 12,0%; Y 1,0 - 2,0%; Al - остальное, при этом толщина жаростойкого слоя составляет 10 - 60 мкм, причем на жаростойкий слой наносят слой высокотемпературного припоя толщиной 3 - 40 мкм.
50

15. Способ по п.6, отличающийся тем, что в качестве материала металлического подслоя используют жаростойкий сплав состава: Cr 18 - 34%; Al 3 - 16%; Y 0,2 - 0,7%; Ni - остальное или состава: Cr 18 - 34%; Al 3 - 16%; Y 0,2 - 0,7%; Co 16 - 30%; Ni - остальное или состава: Si 4,0 - 12,0%; Y 1,0 - 2,0%; Al - остальное, при этом толщина жаростойкого слоя составляет 10 - 60 мкм, причем на жаростойкий слой наносят слой высокотемпературного припоя толщиной 3 - 40 мкм.

16. Способ по п.8, отличающийся тем, что в качестве материала металлического подслоя используют жаростойкий сплав состава: Cr 18 - 34%; Al 3 - 16%; Y 0,2 - 0,7%; Ni - остальное или состава: Cr 18 - 34%; Al 3 - 16%; Y 0,2 - 0,7%; Co 16 - 30%; Ni - остальное или состава: Si 4,0 - 12,0%; Y 1,0 - 2,0%; Al - остальное, при этом толщина жаростойкого слоя составляет 10 - 60 мкм, причем на жаростойкий слой наносят слой высокотемпературного припоя толщиной 3 - 40 мкм.

17. Способ по п.12, отличающийся тем, что в качестве материала металлического подслоя используют жаростойкий сплав состава: Cr 18 - 34%; Al 3 - 16%; Y 0,2 - 0,7%; Ni - остальное или состава: Cr 18 - 34%; Al 3 - 16%; Y 0,2 - 0,7%; Co 16 - 30%; Ni - остальное или состава: Si 4,0 - 12,0%; Y 1,0 - 2,0%; Al - остальное, при этом толщина жаростойкого слоя составляет 10 - 60 мкм, причем на жаростойкий слой наносят слой высокотемпературного припоя толщиной 3 - 40 мкм.

18. Способ по любому из пп.1-2, 5, 7-11, 13-17, 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 800 - 1300°C.

19. Способ по п.3, 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 800 - 1300°C.

20. Способ по п.4, 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 800 - 1300°C.

21. Способ по п.6, 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 800 - 1300°C.

22. 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 800 - 1300°C.

23. Способ по п.12, 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 800 - 1300°C.

24. Теплозащитное покрытие на рабочих поверхностях лопаток из никелевых или кобальтовых жаропрочных сплавов турбин газотурбинных двигателей и энергетических установок, состоящее из нанесенного на защищаемую поверхность лопатки металлического подслоя из жаростойкого сплава, переходного металлического слоя из ZrO_2 , стабилизированного Y_2O_3 , отличающийся тем, что переходный металлокерамический слой получен смачиванием керамического слоя металлом высокотемпературного припоя на глубину, равную толщине переходного слоя.

25. Теплозащитное покрытие по п.24, отличающееся тем, что оно содержит металлический жаростойкий слой из сплава состава: Cr 18 - 34%; Al 3 - 16%; Y 0,2 - 0,7%; Ni - остальное или состава: Cr 18 - 34%; Al 3 - 16%; Y 0,2 - 0,7%; Co 16 - 30%; Ni -

остальное или состава: Si 4,0 - 12,0%; Y 1,0 - 2,0%; Al - остальное, при этом толщина жаростойкого слоя составляет 10 - 60 мкм, причем переходный слой образован путем нанесения на жаростойкий слой слоя из высокотемпературного припоя толщиной 3 - 40 мкм, с его последующим расплавлением при термообработке покрытия, смачиванием части керамического слоя, прилежащего к металлическому подслою, с образованием переходного металлокерамического слоя толщиной 6 - 35 мкм при затвердевании высокотемпературного припоя в процессе его охлаждения.

26. Теплозащитное покрытие по п.24, отличающееся тем, что оно содержит поверхностный слой лопатки из кобальтового или никелевого жаропрочного сплава, модифицированный имплантацией ионами Nb, Pt, Yb, Y, La, Hf, Cr, Si или их сочетанием, при энергии ионов 0,2 - 30 кэВ при дозе имплантации ионов 10^{10} - $5 \cdot 10^{20}$ ион/см², а в качестве керамического слоя используют ZrO₂, стабилизированную Y₂O₃ в соотношении Y₂O₃ 5 - 9 вес.%, ZrO₂ - остальное.