РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **90 794** (13) **U1**

(51) МПК
C23C 14/06 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: **2009141155/22, 09.11.2009**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
09.11.2009

(45) Опубликовано: **20.01.2010**

Адрес для переписки:
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1, заместителю директора Центра А.Г. Старцеву

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

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное учреждение Российский научный центр "Курчатовский институт" (RU)

(54) ЛОПАТКА ТУРБОМАШИНЫ ИЗ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ С НАНОСЛОЙНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Формула полезной модели

1. Лопатка турбомашины из легированной стали с нанослойным покрытием, содержащая поверхностный слой основного материала, модифицированный ионной имплантацией и нанесенным на него многослойным покрытием, отличающаяся тем, что многослойное покрытие содержит чередующиеся слои металлов и соединений этих металлов с другими металлическими и неметаллическими материалами, а каждый слой покрытия выполнен толщиной от 10 до 30 нм и содержит слой толщиной от 1 до 9 нм полученный путем ионной имплантации ионами других металлических и неметаллических материалов, осуществленной непосредственно после нанесения каждого слоя, причем в качестве металлов слоев использованы Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu или их соединения, а в качестве имплантируемых ионов других металлических и неметаллических материалов Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их сочетание, при условии разнородности металлов, наносимых в качестве слоя, и металлов, имплантируемых в этот слой.

2. Лопатка турбомашины по п.1, отличающаяся тем, что после имплантаци ионов проведен постимплантационный отпуск, причем постимплантационный отпуск и нанесение нанослойного покрытия проведены в одном вакуумном объеме за один технологический цикл.

3. Лопатка турбомашины по любому из пп.1 и 2, отличающаяся тем, что ионная имплантация проведена при энергии ионов 0,2-50 кэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см^2, но не превышающей начало распыления материала слоя.

4. Лопатка турбомашины по любому из пп.1 и 2, отличающаяся тем, что ионная имплантация проведена в импульсном режиме.

RU 90794 U1

RU 90794 U1

5. Лопатка турбомашины по любому из пп.1 и 2, отличающаяся тем, что ионная имплантация проведена в непрерывном режиме.

6. Лопатка турбомашины по п.3, отличающаяся тем, что ионная имплантация проведена в импульсном режиме.

7. Лопатка турбомашины по п.3, отличающаяся тем, что ионная имплантация проведена в непрерывном режиме.

8. Лопатка турбомашины по любому из пп.1-2, 6, 7, отличающаяся тем, что суммарная толщина металлических слоев составляет 10-90% от общей толщины покрытия, а общая толщина покрытия составляет от 1,2 до 30 мкм.

9. Лопатка турбомашины по п.3, отличающаяся тем, что суммарная толщина металлических слоев составляет 10-90% от общей толщины покрытия, а общая толщина покрытия составляет от 1,2 до 30 мкм.

10. Лопатка турбомашины по п.4, отличающаяся тем, что суммарная толщина металлических слоев составляет 10-90% от общей толщины покрытия, а общая толщина покрытия составляет от 1,2 до 30 мкм.

11. Лопатка турбомашины по п.5, отличающаяся тем, что суммарная толщина металлических слоев составляет 10-90% от общей толщины покрытия, а общая толщина покрытия составляет от 1,2 до 30 мкм.

12. Лопатка турбомашины по любому из пп.1-2, 6, 7, 9-11, отличающаяся тем, что покрытие нанесено только на перо лопатки.

13. Лопатка турбомашины по любому из пп.1-2, 6, 7, 9-11, отличающаяся тем, что покрытие нанесено на хвостовик и перо лопатки.

14. Лопатка турбомашины по п.3, отличающаяся тем, что покрытие нанесено только на перо лопатки.

15. Лопатка турбомашины по п.4, отличающаяся тем, что покрытие нанесено только на перо лопатки.

16. Лопатка турбомашины по п.5, отличающаяся тем, что покрытие нанесено только на перо лопатки.

17. Лопатка турбомашины по п.8, отличающаяся тем, что покрытие нанесено только на перо лопатки.

18. Лопатка турбомашины по п.3, отличающаяся тем, что покрытие нанесено на хвостовик и перо лопатки.

19. Лопатка турбомашины по п.4, отличающаяся тем, что покрытие нанесено на хвостовик и перо лопатки.

20. Лопатка турбомашины по п.5, отличающаяся тем, что покрытие нанесено на хвостовик и перо лопатки.

RU 90794 U1

RU 90794 U1

Полезная модель относится к машиностроению и может быть использована в авиационной и энергетической промышленности для повышения надежности и ресурса работы турбомашин.

Известна лопатка, содержащая ионно-плазменное покрытие, полученная последовательным осаждением в вакууме на поверхность пера первого слоя конденсированного покрытия толщиной от 6 до 25 мкм и второго слоя покрытия толщиной от 4 до 12 мкм (Полищук И.Е. Структура и свойства газотермических покрытий на основе интерметаллидов системы никель-алюминий // Электронная микроскопия и прочность материалов: Сб. науч.тр. НАН Украины, Науч. Совет НАНУ по пробл. "Физика твердого тела". - Киев, 1998).

Лопатка турбомашины с подобным покрытием характеризуется высокой трудоемкостью ее получения (не менее 4 ч на садку) и материалоемкостью, при этом увеличение толщины покрытия приводит к существенному снижению ее усталостной и адгезионной прочности.

Известна также лопатка турбомашины с покрытием для защиты от газоабразивной и капельно-ударной эрозии, содержащая слои покрытия, полученные ионно-плазменным методом: первый слой из титана толщиной от 0,5 до 5,0 мкм, второй слой нитрида титана толщиной 6 мкм (Патент РФ №2165475, МПК^7 C23C 14/16, 30/00, C22C 19/05, 21/04, опубл. 20.04.2001).

Основным недостатком этого способа является обеспечение недостаточно высокой стойкости наносимого покрытия к солевой коррозии. Кроме того. при увеличении толщины покрытия (или каждого из слоев покрытия) происходит снижение усталостной и адгезионной прочности деталей с покрытиями, что ухудшает их эксплуатационные свойства.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату к заявляемому является лопатка турбомашины из легированной стали с нанослойным покрытием, содержащая поверхностный слой основного материала, модифицированный ионной имплантацией и нанесенным на него многослойным покрытием. При этом, покрытие на лопатке получено при предварительной обработке поверхности основного материала лопатки ионной имплантации ионами азота и постимплантационным отпуском, который совмещен с нанесением многослойного покрытия, а само многослойное покрытие нанесено многократным чередованием слоев титана и нитридов титана. (Патент РФ №2226227, МПК C23C 14/48, 27.03.2004).

Основным недостатком прототипа является недостаточная надежность защиты от коррозионного и эрозионного разрушения при одновременном повышении выносливости, циклической прочности, что особенно важно при эксплуатации компрессорных лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) и лопаток паровых турбин.

Техническим результатом заявляемой полезной модели является повышение стойкости покрытия к коррозионному и эрозионному разрушению при одновременном повышении выносливости и циклической долговечности защищаемых лопаток.

Технический результат достигается тем, что лопатка турбомашины из легированной стали с нанослойным покрытием, содержащая поверхностный слой основного материала, модифицированный ионной имплантацией и нанесенным на него многослойным покрытием, в отличие от прототипа многослойное покрытие содержит чередующиеся слои металлов и соединений этих металлов с другими металлическими и неметаллическими материалами, а каждый слой покрытия

выполнен толщиной от 10 нм до 30 нм и содержит слой толщиной от 1 нм до 9 нм полученный путем ионной имплантации ионами других металлических и неметаллических материалов, осуществленной непосредственно после нанесения каждого слоя, причем в качестве металлов слоев использованы Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu или их соединения, а в качестве имплантируемых ионов других металлических и неметаллических материалов Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их сочетание, при условии разнородности металлов, наносимых в качестве слоя и металлов, имплантируемых в этот слой.

Технический результат достигается также тем, что лопатка турбомашины содержит покрытие, в котором после имплантаци ионов проведен постимплантационный отпуск, причем постимплантационный отпуск и нанесение нанослойного покрытия проведены в одном вакуумном объеме за один технологический цикл.

Технический результат достигается также тем, что лопатка турбомашины содержит покрытие, в котором ионноя имплантация проведена при энергии ионов 0,2-50 КэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см^2, но не превышающей начало распыления материала слоя, причем ионная имплантация проведена в импульсном и/или непрерывном режиме.

Технический результат достигается также тем, что лопатка турбомашины содержит покрытие, в котором нанесены слои из металлов суммарной толщиной от 10-90% от общей толщины покрытия, а общая толщина покрытия составляет от 1,2 до 30 мкм.

Технический результат достигается также тем, что лопатка турбомашины содержит покрытие, в котором покрытие нанесено только на перо и/или хвостовик лопатки.

Для оценки стойкости лопаток паровых и газовых турбин на эрозионную и коррозионную стойкость были проведены следующие испытания образцов из стали 20Х13 с покрытием-прототипом и предлагаемым покрытием (табл.1).

Таблица 1

№Группы образцов	Имплантируемые ионы (в основу)	Имплантируемые ионы (в покрытие)	Толщина слоев: металлического/неметаллического или имплантированного	Материал слоев и схема их чередования
1 (Прототип)	N	-	1 мкм / 2 мкм	4(-Ti-TiN-TiN_2-)
2	N	N	20 нм / 8 нм	-Ti-TiN-Ti-TiN_2-
3	Y	N	10 нм / 8 нм	-Ti-TiN-Ti-TiN_2-
4	Yb	N	30 нм / 6 нм	-Zr-ZrN-Zr-ZrN_2-
5	Cr	B	30 нм /8 нм	-Zr-ZrB-Zr-
6	B	C	26 нм / 6 нм	-Ti-TiC-Ti-
7	Yb	C	26 нм /6 нм	-Zr-ZrC-Zr-
8	Y+N	C и N	22 нм / 8 нм	-Cr-CrN-Cr-CrC-
9	Y+Zr	B и N	16 нм /8 нм	-Zr-ZrB-Zr-_-ZrN-Zr- -ZrN-
10	Y+Zr+N	C и N	10 нм / 6 нм	-W-WN-W-WC-

Режимы обработки образцов и нанесения покрытия: ионная имплантация (ионами Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti) с энергией E=0,2КэВ -50КэВ и дозой облучения D= 2-10^{18} ион/см^2, как без отжига, так и с последующемим постимплантационным отпуском в вакууме при температуре 400°С в течение 1 ч с одновременным нанесением ионно-плазменного многослойного покрытия (материал слоев и схема их чередования, согласно, таблицы 1). Общая толщина покрытия составляла величину от 1, 2 до 30 мкм.

Стойкость к солевой коррозии исследовалась по ускоренной методике. Сущность методики испытания заключается в ускорении коррозионного процесса под влиянием

ионов хлора при высоких и быстроменяющихся температурах и относительной влажности воздуха, приближенных к условиям эксплуатации лопаток. В процессе испытаний производилось взвешивание образцов. Оценка коррозии производилась по потере массы образца. Образцы, обработанные по предлагаемому способу, характеризуется наименьшей потерей массы и минимальной площадью поверхности, пораженной коррозией (таблица 2).

Таблица 2.

Коррозионная стойкость.

№п/п	Результаты внешнего осмотра		Потеря массы, г
	До удаления продуктов коррозии	После удаления продуктов коррозии	
1.	Продукты коррозии по всему периметру образца	Точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении)	0,2210
2.	Продукты коррозии по всему периметру образца	Точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0355
3	Продукты коррозии по периметру образца	Отдельные точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0469
4	Продукты коррозии по отдельным участкам образца	Отдельные точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0462
5	Продукты коррозии по отдельным участкам образца	Редко расположенные мелкие точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0393
6	Продукты коррозии по отдельным участкам образца	Отдельные точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0405
7	Продукты коррозии по отдельным участкам образца	Редко расположенные мелкие точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0308
8	Продукты коррозии по отдельным участкам образца	Редко расположенные мелкие точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0298
9	Продукты коррозии по отдельным участкам образца	Редко расположенные мелкие точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0327
10	Продукты коррозии по отдельным участкам образца	Редко расположенные мелкие точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0281

Эрозионная стойкость образцов исследовалась по методике ЦИАМ (Технический отчет ЦИАМ "Экспериментальное исследование износостойкости вакуумных ионно-плазменных покрытий в запыленном потоке воздуха" №10790, 1987. - 37 с.) на пескоструйной установке 12Г-53 струйно-эжекторного типа. Для обдува использовался молотый кварцевый песок с плотностью ρ=2650 кг/м^3, твердость HV= 12000 МПа. Обдув производился при скорости воздушно-абразивного потока 195-210 м/с, температура потока 265-311 К, давление в приемной камере 0,115-0,122 МПа, время воздействия - 120 с, концентрация абразива в потоке до 2-3 г/м^3, что несколько выше, чем концентрация пылевых частиц на входе в авиационный двигатель в реальных условиях. Результаты испытания приведены в таблице 3. Из таблицы видно, что стойкость к эрозии у образца, обработанного по предлагаемой методике, увеличилась, приблизительно в 8…12 раз, а по сравнению с прототипом в 2…3 раза.

Таблица 3.

Эрозионная стойкость

№п/п	Потеря массы, г	Увеличение стойкости, раз	№п/п	Потеря массы, г	Увеличение стойкости, раз
0	8,02	-	6	0,99	8,10
1 (Прототип)	2,07	3,87	7	0,81	9,90
2	0,93	8,62	8	0,95	8,44

3	0,85	9,43	9	0,78	10,28
4	0.94	8,53	10	0,64	12,53
5	0,72	11,13			

Результаты сравнительных испытаний на коррозионную и эрозионную стойкость образцов с покрытиями показали, что предлагаемая лопатка с нанослойным покрытием, по сравнению с прототипом, обладает более высокими эрозионной и коррозионной стойкостью.

Кроме того, были проведены испытания на выносливость и циклическую прочность образцов из стали 20Х13 на воздухе и коррозионной среде в соответствии с требованиями ГОСТ 9.302-88. В результате эксперимента установлено следующее: при испытаниях на воздухе условный предел выносливости (σ_{-1}) образцов в исходном состоянии (без покрытия) составляет 320 МПа, у образцов-прототипов - до 380 МПа, а по предлагаемому техническому решению 400 МПа; при испытаниях в коррозионной среде условный предел выносливости образцов в исходном состоянии (без покрытия) составляет 180 МПа, у образцов-прототипов - 320 МПа, по предлагаемому техническому решению - до 360 МПа.

Аналогичные результаты также были получены для образцов из материала ЭИ961 и 15Х11МФ.

Таким образом, проведенные сравнительные испытания показали, что предлагаемая лопатка турбомашины из легированной стали с нанослойным покрытием, содержащая поверхностный слой основного материала, модифицированный ионной имплантацией и нанесенным на него многослойным покрытием, которое содержит чередующиеся слои металлов и соединений этих металлов с другими металлическими и неметаллическими материалами, а каждый слой покрытия выполнен толщиной от 10 нм до 30 нм и содержит слой толщиной от 1 нм до 9 нм полученный путем ионной имплантации ионами других металлических и неметаллических материалов, осуществленной непосредственно после нанесения каждого слоя, причем в качестве металлов слоев использованы Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu или их соединения, а в качестве имплантируемых ионов других металлических и неметаллических материалов Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их сочетание, при условии разнородности металлов, наносимых в качестве слоя и металлов, имплантируемых в этот слой, обладает, по сравнению с прототипом, повышенными эксплуатационными свойствами, что подтверждает заявленный технический результат предлагаемой полезной модели - повышение стойкости покрытия к коррозионному и эрозионному разрушению при одновременном повышении выносливости и циклической долговечности защищаемых лопаток.

(57) Реферат

Полезная модель относится к машиностроению и может быть использована в авиационной и энергетической промышленности для повышения надежности и ресурса работы турбомашин. Полезная модель направлена на повышение стойкости покрытия к коррозионному и эрозионному разрушению при одновременном повышении выносливости и циклической долговечности защищаемых лопаток. Указанный технический результат достигается тем, что лопатка турбомашины из легированной стали с нанослойным покрытием, содержащая поверхностный слой основного материала, модифицированный ионной имплантацией и нанесенным на него многослойным покрытием, в отличие от прототипа многослойное покрытие содержит чередующиеся слои металлов и соединений этих металлов с другими

металлическими и неметаллическими материалами, а каждый слой покрытия выполнен толщиной от 10 нм до 30 нм и содержит слой толщиной от 1 нм до 9 нм полученный путем ионной имплантации ионами других металлических и неметаллических материалов, осуществленной непосредственно после нанесения каждого слоя, причем в качестве металлов слоев использованы Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu или их соединения, а в качестве имплантируемых ионов других металлических и неметаллических материалов Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их сочетание, при условии разнородности металлов, наносимых в качестве слоя и металлов, имплантируемых в этот слой. 1 н.п, 19 з.п.ф., 3 табл.

Реферат

Лопатка турбомашины из легированной стали с нанослойным покрытием

Полезная модель относится к машиностроению и может быть использована в авиационной и энергетической промышленности для повышения надежности и ресурса работы турбомашин. Полезная модель направлена на повышение стойкости покрытия к коррозионному и эрозионному разрушению при одновременном повышении выносливости и циклической долговечности защищаемых лопаток. Указанный технический результат достигается тем, что лопатка турбомашины из легированной стали с нанослойным покрытием, содержащая поверхностный слой основного материала, модифицированный ионной имплантацией и нанесенным на него многослойным покрытием, в отличие от прототипа многослойное покрытие содержит чередующиеся слои металлов и соединений этих металлов с другими металлическими и неметаллическими материалами, а каждый слой покрытия выполнен толщиной от 10 нм до 30 нм и содержит слой толщиной от 1 нм до 9 нм полученный путем ионной имплантации ионами других металлических и неметаллических материалов, осуществленной непосредственно после нанесения каждого слоя, причем в качестве металлов слоев использованы Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu или их соединения, а в качестве имплантируемых ионов других металлических и неметаллических материалов Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их сочетание, при условии разнородности металлов, наносимых в качестве слоя и металлов, имплантируемых в этот слой. 1 н.п, 19 з.п.ф., 3 табл.

2009141155

МПК C23C14/06

Лопатка турбомашины из легированной стали с нанослойным покрытием

Полезная модель относится к машиностроению и может быть использована в авиационной и энергетической промышленности для повышения надежности и ресурса работы турбомашин.

Известна лопатка, содержащая ионно-плазменное покрытие, полученная последовательным осаждением в вакууме на поверхность пера первого слоя конденсированного покрытия толщиной от 6 до 25 мкм и второго слоя покрытия толщиной от 4 до 12 мкм (Полищук И.Е. Структура и свойства газотермических покрытий на основе интерметаллидов системы никель-алюминий // Электронная микроскопия и прочность материалов: Сб. науч.тр. НАН Украины, Науч. Совет НАНУ по пробл. "Физика твердого тела". - Киев, 1998).

Лопатка турбомашины с подобным покрытием характеризуется высокой трудоемкостью ее получения (не менее 4 ч на садку) и материалоемкостью, при этом увеличение толщины покрытия приводит к существенному снижению ее усталостной и адгезионной прочности.

Известна также лопатка турбомашины с покрытием для защиты от газоабразивной и капельно-ударной эрозии, содержащая слои покрытия, полученные ионно-плазменным методом: первый слой из титана толщиной от 0,5 до 5,0 мкм, второй слой нитрида титана толщиной 6 мкм (Патент РФ №2165475 , МПК^7 C 23 C 14/16, 30/00, C 22 C 19/05, 21/04, опубл. 20.04.2001).

Основным недостатком этого способа является обеспечение недостаточно высокой стойкости наносимого покрытия к солевой коррозии. Кроме того. при увеличении толщины покрытия (или каждого из слоев покрытия) происходит снижение усталостной и адгезионной

прочности деталей с покрытиями, что ухудшает их эксплуатационные свойства.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату к заявляемому является лопатка турбомашины из легированной стали с нанослойным покрытием, содержащая поверхностный слой основного материала, модифицированный ионной имплантацией и нанесенным на него многослойным покрытием. При этом, покрытие на лопатке получено при предварительной обработке поверхности основного материала лопатки ионной имплантации ионами азота и постимплантационным отпуском, который совмещен с нанесением многослойного покрытия, а само многослойное покрытие нанесено многократным чередованием слоев титана и нитридов титана. (Патент РФ № 2226227, МПК С 23 С 14/48, 27.03. 2004).

Основным недостатком прототипа является недостаточная надежность защиты от коррозионного и эрозионного разрушения при одновременном повышении выносливости, циклической прочности, что особенно важно при эксплуатации компрессорных лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) и лопаток паровых турбин.

Техническим результатом заявляемой полезной модели является повышение стойкости покрытия к коррозионному и эрозионному разрушению при одновременном повышении выносливости и циклической долговечности защищаемых лопаток.

Технический результат достигается тем, что лопатка турбомашины из легированной стали с нанослойным покрытием, содержащая поверхностный слой основного материала, модифицированный ионной имплантацией и нанесенным на него многослойным покрытием, в отличие от прототипа многослойное покрытие содержит чередующиеся слои металлов и соединений этих металлов с другими металлическими и неметаллическими материалами, а каждый слой покрытия выполнен

толщиной от 10 нм до 30 нм и содержит слой толщиной от 1 нм до 9 нм полученный путем ионной имплантации ионами других металлических и неметаллических материалов, осуществленной непосредственно после нанесения каждого слоя, причем в качестве металлов слоев использованы Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu или их соединения, а в качестве имплантируемых ионов других металлических и неметаллических материалов Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их сочетание, при условии разнородности металлов, наносимых в качестве слоя и металлов, имплантируемых в этот слой.

Технический результат достигается также тем, что лопатка турбомашины содержит покрытие, в котором после имплантаци ионов проведен постимплантационный отпуск, причем постимплантационный отпуск и нанесение нанослойного покрытия проведены в одном вакуумном объеме за один технологический цикл.

Технический результат достигается также тем, что лопатка турбомашины содержит покрытие, в котором ионноя имплантация проведена при энергии ионов 0,2-50 КэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см^2, но не превышающей начало распыления материала слоя, причем ионная имплантация проведена в импульсном и/или непрерывном режиме.

Технический результат достигается также тем, что лопатка турбомашины содержит покрытие, в котором нанесены слои из металлов суммарной толщиной от 10-90% от общей толщины покрытия, а общая толщина покрытия составляет от 1,2 до 30 мкм.

Технический результат достигается также тем, что лопатка турбомашины содержит покрытие, в котором покрытие нанесено только на перо и/ или хвостовик лопатки.

Для оценки стойкости лопаток паровых и газовых турбин на эрозионную и коррозионную стойкость были проведены следующие испытания образцов из стали 20Х13 с покрытием-прототипом и предлагаемым покрытием(табл. 1).

Таблица1

№ Группы образцов	Имплантируемые ионы (в основу)	Имплантируемые ионы (в покрытие)	Толщина слоев: металлического/ неметаллического или имплантированного	Материал слоев и схема их чередования
1 (Прото-тип)	N	-	1 мкм/ 2 мкм	4(-Ti-TiN-TiN_2-)
2	N	N	20 нм/ 8 нм	-Ti-TiN-Ti-TiN_2-
3	Y	N	10 нм/ 8 нм	- Ti-TiN-Ti-TiN_2-
4	Yb	N	30 нм/ 6 нм	- Zr-ZrN-Zr-ZrN_2-
5	Cr	B	30 нм/ 8 нм	-Zr-ZrB-Zr-
6	B	C	26 нм/ 6 нм	-Ti-TiC-Ti-
7	Yb	C	26 нм/ 6 нм	- Zr-ZrC-Zr-
8	Y+N	C и N	22нм/ 8 нм	- Cr-CrN-Cr-CrC -
9	Y+Zr	B и N	16нм/ 8 нм	-Zr-ZrB-Zr-ZrN-Zr- _-ZrN-
10	Y+Zr+N	C и N	10 нм/ 6 нм	-W-WN-W-WC-

Режимы обработки образцов и нанесения покрытия: ионная имплантация (ионами Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti) с энергией E=0,2КэВ – 50КэВ и дозой облучения $D=2\cdot10^{18}$ ион/см^2, как без отжига, так и с последующемим постимплантационным отпуском в вакууме при температуре 400°С в течение 1 ч с одновременным нанесением ионно-плазменного многослойного покрытия (материал слоев и схема их чередования, согласно, таблицы 1). Общая толщина покрытия составляла величину от 1, 2 до 30 мкм .

Стойкость к солевой коррозии исследовалась по ускоренной методике. Сущность методики испытания заключается в ускорении коррозионного

процесса под влиянием ионов хлора при высоких и быстроменяющихся температурах и относительной влажности воздуха, приближенных к условиям эксплуатации лопаток. В процессе испытаний производилось взвешивание образцов. Оценка коррозии производилась по потере массы образца. Образцы, обработанные по предлагаемому способу, характеризуется наименьшей потерей массы и минимальной площадью поверхности, пораженной коррозией (таблица 2).

Таблица 2 .

Коррозионная стойкость.

№ п/п	Результаты внешнего осмотра		Потеря массы, г
	До удаления продуктов коррозии	После удаления продуктов коррозии	
1.	Продукты коррозии по всему периметру образца	Точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении)	0,2210
2.	Продукты коррозии по всему периметру образца	Точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0355
3	Продукты коррозии по периметру образца	Отдельные точечные повреждения по всей поверх.образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0469
4	Продукты коррозии по отдельным участкам образца	Отдельные точечные повреждения по всей поверх.образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0462
5	Продукты коррозии по отдельным участкам образца	Редко расположенные мелкие точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0393
6	Продукты коррозии по отдельным участкам образца	Отдельные точечные повреждения по всей поверх.образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0405
7	Продукты коррозии по отдельным участкам образца	Редко расположенные мелкие точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0308
8	Продукты коррозии по отдельным участкам образца	Редко расположенные мелкие точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0298
9	Продукты коррозии по отдельным участкам образца	Редко расположенные мелкие точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0327
10	Продукты коррозии по отдельным участкам образца	Редко расположенные мелкие точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении)	0,0281

Эрозионная стойкость образцов исследовалась по методике ЦИАМ (Технический отчет ЦИАМ "Экспериментальное исследование износостойкости вакуумных ионно-плазменных покрытий в запыленном потоке воздуха" №10790, 1987.-37с.) на пескоструйной установке 12Г-53 струйно-эжекторного типа. Для обдува использовался молотый кварцевый песок с плотностью ρ=2650 кг/м^3, твердость HV=12000 МПа. Обдув производился при скорости воздушно-абразивного потока 195-210 м/с, температура потока 265-311К, давление в приемной камере 0,115-0,122 МПа, время воздействия - 120 с, концентрация абразива в потоке до 2-3 г/м^3, что несколько выше, чем концентрация пылевых частиц на входе в авиационный двигатель в реальных условиях. Результаты испытания приведены в таблице 3. Из таблицы видно, что стойкость к эрозии у образца, обработанного по предлагаемой методике, увеличилась, приблизительно в 8..12 раз, а по сравнению с прототипом в 2…3 раза.

Таблица 3.

Эрозионная стойкость

№ п/п	Потеря массы, г	Увеличение стойкости, раз	№ п/п	Потеря массы, г	Увеличение стойкости, раз
0	8,02	–	6	0,99	8,10
1 (Прототип)	2,07	3,87	7	0,81	9,90
2	0,93	8,62	8	0,95	8,44
3	0,85	9,43	9	0,78	10,28
4	0.94	8,53	10	0,64	12,53
5	0,72	11,13			

Результаты сравнительных испытаний на коррозионную и эрозионную стойкость образцов с покрытиями показали, что предлагаемая лопатка с нанослойным покрытием, по сравнению с прототипом, обладает более высокими эрозионной и коррозионной стойкостью.

Кроме того, были проведены испытания на выносливость и циклическую прочность образцов из стали 20Х13 на воздухе и коррозионной среде в соответствии с требованиями ГОСТ 9.302-88. В результате эксперимента установлено следующее: при испытаниях на воздухе условный предел выносливости (σ_{-1}) образцов в исходном состоянии (без покрытия) составляет 320 МПа, у образцов- прототипов - до 380 МПа, а по предлагаемому техническому решению 400МПа; при испытаниях в коррозионной среде условный предел выносливости образцов в исходном состоянии (без покрытия) составляет 180 МПа, у образцов-прототипов– 320 МПа, по предлагаемому техническому решению - до 360 МПа.

Аналогичные результаты также были получены для образцов из материала ЭИ961 и 15Х11МФ.

Таким образом, проведенные сравнительные испытания показали, что предлагаемая лопатка турбомашины из легированной стали с нанослойным покрытием, содержащая поверхностный слой основного материала, модифицированный ионной имплантацией и нанесенным на него многослойным покрытием, которое содержит чередующиеся слои металлов и соединений этих металлов с другими металлическими и неметаллическими материалами, а каждый слой покрытия выполнен толщиной от 10 нм до 30 нм и содержит слой толщиной от 1 нм до 9 нм полученный путем ионной имплантации ионами других металлических и неметаллических материалов, осуществленной непосредственно после нанесения каждого слоя, причем в качестве металлов слоев использованы Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu или их соединения, а в качестве имплантируемых ионов других металлических и неметаллических материалов Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их сочетание, при условии разнородности металлов, наносимых в качестве слоя и металлов, имплантируемых в этот слой, обладает, по сравнению с прототипом, повышенными эксплуатационными свойствами,

что подтверждает заявленный технический результат предлагаемой полезной модели – повышение стойкости покрытия к коррозионному и эрозионному разрушению при одновременном повышении выносливости и циклической долговечности защищаемых лопаток.