



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

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

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2008132496/22, 06.08.2008

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
06.08.2008

(45) Опубликовано: 10.05.2009

Адрес для переписки:
450039, Республика Башкортостан, г.Уфа, ул.
Сельская-Богородская, 2, а/я 66, ООО НПП
"Уралавиаспецтехнология"

(72) Автор(ы):

Смыслова Марина Константиновна (RU),
Дыбленко Юрий Михайлович (RU),
Мингажев Аскар Джамилевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной ответственностью
Научно-производственное предприятие
"Уралавиаспецтехнология" (RU)

(54) ЛОПАТКА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Формула полезной модели

1. Лопатка паровой турбины из титановых сплавов с защитным покрытием, содержащая поверхностный слой основного материала, модифицированный ионной имплантацией, и нанесенным на него многослойным покрытием, отличающаяся тем, что содержит поверхностный слой, модифицированный имплантацией ионами одного из следующих химических элементов: Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией.

2. Лопатка паровой турбины по п.1, отличающаяся тем, что многослойное покрытие содержит чередующиеся слои эрозионностойких и коррозионностойких материалов.

3. Лопатка паровой турбины по п.2, отличающаяся тем, что многослойное покрытие содержит чередующиеся слои Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu и их нитридов, боридов и карбидов.

4. Лопатка паровой турбины по п.3, отличающаяся тем, что толщина слоя составляет от 100 нм до 5 мкм при общей толщине покрытия от 10 до 100 мкм.

5. Лопатка паровой турбины по п.4, отличающаяся тем, что каждый металлический слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией.

6. Лопатка паровой турбины по п.4, отличающаяся тем, что каждый слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией.

7. Лопатка паровой турбины по п.4, отличающаяся тем, что каждый нитридный слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией.

8. Лопатка паровой турбины по п.4, отличающаяся тем, что каждый нитридный слой покрытия во время его нанесения обработан ионной имплантацией.

9. Лопатка паровой турбины по любому из пп.6-8, отличающаяся тем, что использованы слои покрытия, подвергнутые ионно-имплантационной обработке ионами Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией.

10. Лопатка паровой турбины по п.4, отличающаяся тем, что использованы титановые слои покрытия, подвергнутые имплантации ионами Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией.

11. Лопатка паровой турбины по любому из пп.1-8 и 10, отличающаяся тем, что покрытие подвергнуто постимплантационному отпуску, совмещенному с нанесением многослойного покрытия.

12. Лопатка паровой турбины по любому из п.п.1-8 и 10, отличающаяся тем, что содержит покрытие и/или его слои, подвергнутые ионной имплантации при энергии ионов от 0,2 до 50 КэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $2 \cdot 10^{18}$ ион/см².

13. Лопатка паровой турбины по п.9, отличающаяся тем, что покрытие подвергнуто постимплантационному отпуску, совмещенному с нанесением многослойного покрытия.

14. Лопатка паровой турбины по п.9, отличающаяся тем, что содержит покрытие и/или его слои, подвергнутые ионной имплантации при энергии ионов от 0,2 до 50 КэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $2 \cdot 10^{18}$ ион/см².

RU 8 2 7 0 3 U 1

RU 8 2 7 0 3 U 1

Полезная модель относится к машиностроению и может быть использована в авиационном двигателестроении и энергетическом турбостроении для защиты пера рабочих лопаток паровой турбины от газоабразивной и капельно-ударной эрозии, при одновременном повышении выносливости и циклической долговечности деталей.

Известна лопатка с покрытием для защиты от газоабразивной и капельно-ударной эрозии, включающее слои, 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, МПК⁷ C23C 14/16, 30/00, C22C 19/05, 21/04, опубл. 20.04.2001).

Основным недостатком этого покрытия является его недостаточно высокая стойкость к капельно-ударной, эрозии из-за малой толщины и твердости. При увеличении толщины покрытия происходит снижение усталостной прочности деталей и адгезионной прочности покрытий, что ухудшает эксплуатационные свойства деталей.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату к заявляемому является лопатка паровой турбины с защитным покрытием, содержащая поверхностный слой, модифицированный ионной имплантацией, и нанесенным на него многослойным покрытием (Патент РФ № 2226227, кл. C23C 14/48, опубл. 27.03.2004).

Основным недостатком аналога является обеспечение недостаточно надежной защиты изделия от пылевой и капельно-ударной эрозии при одновременном повышении выносливости, циклической прочности лопаток паровых турбин.

Техническим результатом заявляемой полезной модели является повышение стойкости лопатки из титановых сплавов с покрытием к пылевой и капельно-ударной эрозии при одновременном повышении выносливости, циклической прочности.

Технический результат достигается тем, что лопатка паровой турбины из титанового сплава с защитным покрытием, содержащая поверхностный слой, модифицированный ионной имплантацией, и нанесенным на него многослойным покрытием, в отличие от прототипа, лопатка имеет поверхностный слой, модифицированный имплантацией ионами одного из следующих химических элементов Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией.

Технический результат достигается также тем, что многослойное покрытие содержит чередующиеся слои эрозионностойких и коррозионностойких материалов в качестве материала которых использованы слои Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu и их нитридов, боридов и карбидов, причем толщина каждого слоя составляет от 100 нм до 5 мкм при общей толщине покрытия от 10 мкм до 100 мкм.

Технический результат достигается также тем, что покрытие может содержать следующие варианты слоев: каждый металлический слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией; каждый слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией; каждый нитридный слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией; каждый нитридный слой покрытия во время его нанесения обработан ионной имплантацией.

Технический результат достигается также тем, что использованы слои покрытия, со следующими характеристиками: все слои подвергнутые ионно-имплантационной обработке ионами Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией; титановые слои покрытия подвергнутые имплантации ионами Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией.

Технический результат достигается также тем, что использовано покрытие

подвергнутое постимплантационному отпуску, совмещенному с нанесением многослойного покрытия.

Технический результат достигается также тем, что лопатка содержит покрытие и/или его слои, подвергнутые ионной имплантации при энергии ионов от 0,2 до 50 КэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $2 \cdot 10^{18}$ ион/см².

Для исследования стойкости лопаток паровых турбин на газоабразивную и капельно-ударную эрозию, были изготовлены образцы из титанового сплава ВТ6, которые были подвергнуты (указанным в таблице 1) вариантам обработки, с целью получения защитных покрытий. Количество образцов группы бралось равным трем.

№ Группы образцов	Импантируемые ионы (в основу)	Импантируемые ионы (в покрытие)	Материал слоев и схема их чередования
1 (Прототип)	N	-	4(Ti-TiN-TiN)
2	N+Cr	N	4(Ti-TiN-TiN)
3	Y	N	4(Ti-TiN-TiN)
4	Yb	Y	4(Zr-ZrN-ZrN)
5	C	N	4(Zr-ZrN-ZrN)
6	B	Cr,	4(Ti-TiN-TiN)
7	Zr	Y	4(Zr-ZrN-ZrN)
8	Y+N	Cr	3(Cr-CrN-Cr-CrN)
9	Y+Zr	Zr	3(Zr-ZrN-Zr-ZrN)
10	Y+Zr+N	Zr	3(Zr-ZrN-Zr-ZrN)

Режимы обработки образцов и нанесения покрытия: ионная имплантация (ионами N, Cr, Y, Yb, C, B, Zr) с энергией E=0,2КэВ - 50 КэВ и дозой облучения D= $2 \cdot 10^{18}$ ион/см², с последующим постимплантационным отпуском в вакууме с одновременным нанесением ионно-плазменного многослойного покрытия (материал слоев и схема их чередования согласно таблицы №1) Толщины слоев во всех случаях составляли: первый слой - Me толщиной около 1 мкм, второй слой - нитрид Me толщиной около 2 мкм. Количество слоев во всех случаях бралось равным 12 при общей толщине покрытия от 19 до 21 мкм.

№ п/п	Потеря массы, мкм	Увеличение стойкости, раз	№ п/п	Потеря массы, мкм	Увеличение стойкости, раз
0	3,64	-	6	0,39	9,33
1	0,44	8,27	7	0,37	9,84
2	0,42	8,67	8	0,32	11,36
3	0,41	8,89	9	0,34	10,07
4	0,40	9,10	10	0,36	10,11
5	0,38	9,58			

№п/п	Увеличение стойкости, раз	№ п/п	Увеличение стойкости, раз
0	-	6	4,43
1	3,07	7	4,92
2	3,56	8	5,36
3	3,60	9	5,78
4	3,98	10	5,97
5	4,51		

Стойкость к пылевой эрозии исследовалась по методике ЦИАМ в пескоструйной установке 12Г-53 струйно-эжекторного типа. Для обдува использовался молотый кварцевый песок с плотностью 2650 кг/м³, твердость HV=12000 МПа. Обдув

производился при скорости воздушно-абразивного потока 195-210 м/с, температура потока 265-3 ПК, давление в приемной камере 0,115-0,122 МПа, время воздействия - 120 с, концентрация абразива в потоке до 2-3 г/м³, что несколько выше, чем концентрация пылевых частиц на входе в авиационный двигатель в реальных условиях. Результаты испытания приведены в табл.2. Из таблицы видно, что стойкость к пылевой эрозии у образца с предлагаемым покрытием, увеличилась, приблизительно в 8...10 раз.

Стойкость к капельно-ударной эрозии исследовалась по методике МЭИ (Московского энергетического института) на стенде "Эрозия" при соударении жидких частиц размером 800 мкм и скоростью $C_{уд}=300$ м/с.

Результаты исследования приведены в табл.3. Установлено, что стойкость к капельно-ударной эрозии у образцов с предлагаемыми покрытиями, увеличилась, приблизительно от 3 до 5 раз по сравнению с прототипом.

Дополнительно были проведены испытания на выносливость и циклическую прочность образцов из титанового сплава ВТ6 на воздухе. В результате эксперимента установлено следующее: условный предел выносливости (σ_{-1}) образцов в исходном состоянии (без покрытия) составляет 400 МПа, у образцов-прототипов до 480 МПа, с у образцов с предлагаемым покрытием - 540-560 МПа.

Повышение предела выносливости у обработанных образцов во всех видах испытаний указывает на то, что лопатка паровой турбины с защитным покрытием, содержащая поверхностный слой основного материала, модифицированный имплантацией ионами одного из следующих химических элементов Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией, и нанесенным на него многослойным покрытием, содержащим чередующиеся слои эрозионностойких и коррозионностойких материалов, в качестве которых использованы Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu и их нитридов, боридов и карбидов, при толщине слоя составляющего от 100 нм до 5 мкм при общей толщине покрытия от 10 мкм до 100 мкм, при использовании следующих вариантов слоев покрытия: каждый металлический слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией; каждый слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией; каждый нитридный слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией; каждый нитридный слой покрытия во время его нанесения обработан ионной имплантацией; подвергнутые ионно-имплантационной обработке ионами Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией; титановые слои покрытия подвергнутые имплантации ионами Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией; а также использование на лопатке покрытия подвергнутого постимплантационному отпуску, совмещенному с нанесением многослойного покрытия, а также использование на лопатке покрытия и/или его слоев, подвергнутых ионной имплантации при энергии ионов от 0,2 до 50 КэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $2 \cdot 10^{18}$ ион/см², значительно улучшает усталостные свойства лопаток.

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение предлагаемого покрытия при использовании упомянутых комбинаций слоев, обработанных ионной имплантацией позволяет увеличить по сравнению с прототипом стойкость лопатки из титановых сплавов с покрытием к пылевой и капельно-ударной эрозии при одновременном повышении выносливости, циклической прочности, что подтверждает заявленный технический результат.

(57) Реферат

Полезная модель направлена на повышение стойкости покрытия к солевой коррозии, пылевой и капельно-ударной эрозии при одновременном повышении выносливости, циклической прочности, снижении трудоемкости практической реализации и расширения диапазона свойств защитных покрытий. Указанный технический результат достигается тем, что лопатка паровой турбины из титановых сплавов с защитным покрытием, содержащая поверхностный слой, модифицированный имплантацией ионами одного из следующих химических элементов Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией, и нанесенным на него многослойным покрытием, из чередующиеся слоев эрозионностойких и коррозионностойких материалов. В качестве материалов слоев, использованы Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu и их нитриды, бориды и карбиды. Толщина каждого слоя покрытия составляет от 100 нм до 5 мкм при общей толщине покрытия от 10 мкм до 100 мкм. Покрытие может содержать следующие варианты слоев: каждый металлический слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией; каждый слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией; каждый нитридный слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией; каждый нитридный слой покрытия во время его нанесения обработан ионной имплантацией. В покрытии использованы слои, подвергнутые ионно-имплантационной обработке ионами Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией. 11 з.п.ф., 3 табл.

25

30

35

40

45

50

Реферат

Лопатка паровой турбины из титановых сплавов
с защитным покрытием

Полезная модель направлена на повышение стойкости покрытия к солевой коррозии, пылевой и капельно-ударной эрозии при одновременном повышении выносливости, циклической прочности, снижении трудоемкости практической реализации и расширения диапазона свойств защитных покрытий. Указанный технический результат достигается тем, что лопатка паровой турбины из титановых сплавов с защитным покрытием, содержащая поверхностный слой, модифицированный имплантацией ионами одного из следующих химических элементов Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией, и нанесенным на него многослойным покрытием, из чередующиеся слоев эрозионностойких и коррозионностойких материалов. В качестве материалов слоев, использованы Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu и их нитриды, бориды и карбиды. Толщина каждого слоя покрытия составляет от 100 нм до 5 мкм при общей толщине покрытия от 10 мкм до 100 мкм. Покрытие может содержать следующие варианты слоев: каждый металлический слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией; каждый слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией; каждый нитридный слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией; каждый нитридный слой покрытия во время его нанесения обработан ионной имплантацией. В покрытии использованы слои, подвергнутые ионно-имплантационной обработке ионами Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией. 11 з.п.ф., 3 табл.

2008132496

МПК C23C14/06, C23C14/48

**ЛОПАТКА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С
ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ**

Полезная модель относится к машиностроению и может быть использована в авиационном двигателестроении и энергетическом турбостроении для защиты пера рабочих лопаток паровой турбины от газоабразивной и капельно-ударной эрозии, при одновременном повышении выносливости и циклической долговечности деталей.

Известна лопатка с покрытием для защиты от газоабразивной и капельно-ударной эрозии, включающее слои, 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, МПК⁷ С 23 С 14/16, 30/00, С 22 С 19/05, 21/04, опубл. 20.04.2001).

Основным недостатком этого покрытия является его недостаточно высокая стойкость к капельно-ударной, эрозии из-за малой толщины и твердости. При увеличении толщины покрытия происходит снижение усталостной прочности деталей и адгезионной прочности покрытий, что ухудшает эксплуатационные свойства деталей.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату к заявляемому является лопатка паровой турбины с защитным покрытием, содержащая поверхностный слой, модифицированный ионной имплантацией, и нанесенным на него многослойным покрытием (Патент РФ № 2226227, кл. С 23 С 14/48, опубл. 27.03. 2004).

Основным недостатком аналога является обеспечение недостаточно надежной защиты изделия от пылевой и капельно-ударной эрозии при одновременном повышении выносливости, циклической прочности лопаток паровых турбин.

Техническим результатом заявляемой полезной модели является

повышение стойкости лопатки из титановых сплавов с покрытием к пылевой и капельно-ударной эрозии при одновременном повышении выносливости, циклической прочности.

Технический результат достигается тем, что лопатка паровой турбины из титанового сплава с защитным покрытием, содержащая поверхностный слой, модифицированный ионной имплантацией, и нанесенным на него многослойным покрытием, в отличие от прототипа, лопатка имеет поверхностный слой, модифицированный имплантацией ионами одного из следующих химических элементов Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией.

Технический результат достигается также тем, что многослойное покрытие содержит чередующиеся слои эрозионностойких и коррозионностойких материалов в качестве материала которых использованы слои Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu и их нитридов, боридов и карбидов, причем толщина каждого слоя составляет от 100 нм до 5 мкм при общей толщине покрытия от 10 мкм до 100 мкм.

Технический результат достигается также тем, что покрытие может содержать следующие варианты слоев: каждый металлический слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией; каждый слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией; каждый нитридный слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией; каждый нитридный слой покрытия во время его нанесения обработан ионной имплантацией.

Технический результат достигается также тем, что использованы слои покрытия, со следующими характеристиками: все слои подвергнутые ионно-имплантационной обработке ионами Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией; титановые слои покрытия подвергнутые имплантации ионами Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией.

Технический результат достигается также тем, что использовано покрытие подвергнутое постимплантационному отпуску, совмещенному с

нанесением многослойного покрытия.

Технический результат достигается также тем, что лопатка содержит покрытие и/или его слои, подвергнутые ионной имплантации при энергии ионов от 0,2 до 50 КэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $2 \cdot 10^{18}$ ион/см².

Для исследования стойкости лопаток паровых турбин на газоабразивную и капельно-ударной эрозию, были изготовлены образцы из титанового сплава ВТ6, которые были подвергнуты (указанным в таблице 1) вариантам обработки, с целью получения защитных покрытий. Количество образцов группы бралось равным трем.

Табл.1

№ Группы образцов	Имплантируемые ионы (в основу)	Имплантируемые ионы (в покрытие)	Материал слоев и схема их чередования
1(Прототип)	N	-	4(Ti-TiN-TiN)
2	N+Cr	N	4(Ti-TiN-TiN)
3	Y	N	4(Ti-TiN-TiN)
4	Yb	Y	4(Zr-ZrN-ZrN)
5	C	N	4(Zr-ZrN-ZrN)
6	B	Cr,	4(Ti-TiN-TiN)
7	Zr	Y	4(Zr-ZrN-ZrN)
8	Y+N	Cr	3(Cr-CrN-Cr-CrN)
9	Y+Zr	Zr	3(Zr-ZrN-Zr-ZrN)
10	Y+Zr+N	Zr	3(Zr-ZrN-Zr-ZrN)

Режимы обработки образцов и нанесения покрытия: ионная имплантация (ионами N, Cr, Y, Yb, C, B, Zr) с энергией $E=0,2\text{КэВ} - 50\text{КэВ}$ и дозой облучения $D=2 \cdot 10^{18}$ ион/см², с последующим постимплантационным отпуском в вакууме с одновременным нанесением ионно-плазменного многослойного покрытия (материал слоев и схема их чередования согласно таблицы №1) Толщины слоев во всех случаях составляли: первый слой - Me толщиной около 1 мкм, второй слой - нитрид

Ме толщиной около 2 мкм. Количество слоев во всех случаях бралось равным 12 при общей толщине покрытия от 19 до 21 мкм.

Таблица 2.

Стойкость к пылевой эрозии.

№ п/п	Потеря массы, мкм	Увеличение стойкости, раз	№ п/п	Потеря массы, мкм	Увеличение стойкости, раз
0	3,64	–	6	0,39	9,33
1	0,44	8,27	7	0,37	9,84
2	0,42	8,67	8	0,32	11,36
3	0,41	8,89	9	0,34	10,07
4	0,40	9,10	10	0,36	10,11
5	0,38	9,58			

Таблица 3.

Стойкость к капельно-ударной эрозии

№ п/п	Увеличение стойкости, раз	№ п/п	Увеличение стойкости, раз
0	–	6	4,43
1	3,07	7	4,92
2	3,56	8	5,36
3	3,60	9	5,78
4	3,98	10	5,97
5	4,51		

Стойкость к пылевой эрозии исследовалась по методике ЦИАМ в пескоструйной установке 12Г-53 струйно-эжекторного типа. Для обдува использовался молотый кварцевый песок с плотностью 2650 кг/м³, 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 $2-3 \text{ г/м}^3$, что несколько выше, чем концентрация пылевых частиц на входе в авиационный двигатель в реальных условиях. Результаты испытания приведены в табл.2. Из таблицы видно, что стойкость к пылевой эрозии у образца с предлагаемым покрытием, увеличилась, приблизительно в 8..10 раз.

Стойкость к капельно-ударной эрозии исследовалась по методике МЭИ (Московского энергетического института) на стенде “Эрозия” при соударении жидких частиц размером 800 мкм и скоростью $C_{уд}=300 \text{ м/с}$.

Результаты исследования приведены в табл.3. Установлено, что стойкость к капельно-ударной эрозии у образцов с предлагаемыми покрытиями, увеличилась, приблизительно от 3 до 5 раз по сравнению с прототипом.

Дополнительно были проведены испытания на выносливость и циклическую прочность образцов из титанового сплава ВТ6 на воздухе. В результате эксперимента установлено следующее: условный предел выносливости (σ_1) образцов в исходном состоянии (без покрытия) составляет 400 МПа, у образцов-прототипов до 480 МПа, с у образцов с предлагаемым покрытием – 540-560 МПа.

Повышение предела выносливости у обработанных образцов во всех видах испытаний указывает на то, что лопатка паровой турбины с защитным покрытием, содержащая поверхностный слой основного материала, модифицированный имплантацией ионами одного из следующих химических элементов Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией, и нанесенным на него многослойным покрытием, содержащим чередующиеся слои эрозионностойких и коррозионностойких материалов, в качестве которых использованы Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu и их нитридов, боридов и карбидов, при толщине слоя составляющего от 100 нм до 5 мкм при общей толщине покрытия от 10 мкм до 100 мкм, при использовании следующих вариантов слоев покрытия: каждый металлический слой покрытия после его нанесения обработан

ионной имплантацией; каждый слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией; каждый нитридный слой покрытия после его нанесения обработан ионной имплантацией; каждый нитридный слой покрытия во время его нанесения обработан ионной имплантацией; подвергнутые ионно-имплантационной обработке ионами Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией; титановые слои покрытия подвергнутые имплантации ионами Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацией; а также использование на лопатке покрытия подвергнутого постимплантационному отпуску, совмещенному с нанесением многослойного покрытия, а также использование на лопатке покрытия и/или его слоев, подвергнутых ионной имплантации при энергии ионов от 0,2 до 50 КэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $2 \cdot 10^{18}$ ион/см², значительно улучшает усталостные свойства лопаток.

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение предлагаемого покрытия при использовании упомянутых комбинаций слоев, обработанных ионной имплантацией позволяет увеличить по сравнению с прототипом стойкость лопатки из титановых сплавов с покрытием к пылевой и капельно-ударной эрозии при одновременном повышении выносливости, циклической прочности, что подтверждает заявленный технический результат.