



(51) МПК
B23P 6/00 (2006.01)
C21D 6/00 (2006.01)
C22F 1/18 (2006.01)

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
 ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: **2009134565/02, 15.09.2009**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
15.09.2009

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **15.09.2009**

(43) Дата публикации заявки: **20.03.2011** Бюл. № 8

(45) Опубликовано: **27.07.2011** Бюл. № 21

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2316418 C1, 10.02.2008. RU 2235147 C1, 27.08.2004. SU 1655749 A1, 15.06.1991. DE 4225443 A1, 03.02.1994. GB 2114921 A, 01.09.1983.**

Адрес для переписки:

**450000, Республика Башкортостан, г.Уфа, ул.
 К. Маркса, 12, УГАТУ, ОИС, В.П.
 Ефремовой**

(72) Автор(ы):

**Смыслов Анатолий Михайлович (RU),
 Смыслова Марина Константиновна (RU),
 Мингажев Аскар Джамилевич (RU),
 Селиванов Константин Сергеевич (RU),
 Новиков Антон Владимирович (RU),
 Измайлова Наиля Федоровна (RU),
 Мингажева Алиса Аскаровна (RU),
 Дыбленко Михаил Юрьевич (RU),
 Тарасюк Иван Васильевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Государственное образовательное
 учреждение высшего профессионального
 образования "Уфимский государственный
 авиационный технический университет" (RU)**

(54) СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЛОПАТОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области машиностроения и может быть использовано в турбомашиностроении при восстановлении рабочих и направляющих лопаток паровых турбин, газоперекачивающих установок и компрессоров газотурбинных двигателей, изготовленных из титановых сплавов. Осуществляют удаление поверхностного дефектного слоя металла лопатки, термообработку путем нагрева и выдержки лопатки в вакууме для обеспечения процесса

дегазации металла лопатки и восстановления его дислокационной структуры с последующим охлаждением лопатки в вакууме до температуры окружающей среды. Нагрев осуществляют до температуры 300°C...500°C, а выдержку лопатки совмещают с электроимпульсной обработкой при плотности электрического тока от 10 МА/м² до 200 МА/м². Изобретение позволяет повысить эксплуатационные свойства лопаток в процессе их восстановления. 18 з.п. ф-лы, 7 табл.



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(51) Int. Cl.
B23P 6/00 (2006.01)
C21D 6/00 (2006.01)
C22F 1/18 (2006.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(21)(22) Application: **2009134565/02, 15.09.2009**

(24) Effective date for property rights:
15.09.2009

Priority:

(22) Date of filing: **15.09.2009**

(43) Application published: **20.03.2011 Bull. 8**

(45) Date of publication: **27.07.2011 Bull. 21**

Mail address:

**450000, Respublika Bashkortostan, g.Ufa, ul. K.
Marksa, 12, UGATU, OIS, V.P. Efremovoj**

(72) Inventor(s):

**Smyslov Anatolij Mikhajlovich (RU),
Smyslova Marina Konstantinovna (RU),
Mingazhev Askar Dzhamilovich (RU),
Selivanov Konstantin Sergeevich (RU),
Novikov Anton Vladimirovich (RU),
Izmajlova Nailja Fedorovna (RU),
Mingazheva Alisa Askarovna (RU),
Dyblenko Mikhail Jur'evich (RU),
Tarasjuk Ivan Vasil'evich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie
vysshego professional'nogo obrazovanija
"Ufimskij gosudarstvennyj aviatsionnyj
tehnicheskij universitet" (RU)**

(54) METHOD OF RECLAIMING OPERATING PROPERTIES OF VANES MADE FROM TITANIUM ALLOYS

(57) Abstract:

FIELD: process engineering.

SUBSTANCE: invention relates to machine building and may be used for recovery of operating performances of the vanes of steam turbines, gas transfer plants and gas turbine engines, made from titanium alloys. Proposed method comprises removing defective surface metal layer, holding the vane in vacuum and thermal treatment. The latter is

performed by heating the vane for vane metal degassing and reduction of its dislocation structure, and cooling down in vacuum to ambient temperature. Heating is performed to 300°C...500°C, vane curing is combined with electric pulse treatment at current density of 10 MA/m² to 200 MA/m².

EFFECT: expanded operating performances after recovery.

19 cl, 7 tbl, 1 ex

Изобретение относится к области машиностроения и может быть использовано в турбомашиностроении при восстановлении рабочих и направляющих лопаток паровых турбин, газоперекачивающих установок и компрессоров газотурбинных двигателей, изготовленных из титановых сплавов.

5 Рабочие лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) и газотурбинной установки (ГТУ), а также паровых турбин в процессе эксплуатации подвергаются воздействиям значительных динамических и статических нагрузок, а также коррозионному и эрозионному разрушению. Исходя из предъявляемых к
10 эксплуатационным свойствам требований, для изготовления лопаток компрессора газовых турбин применяются титановые сплавы, которые по сравнению с техническим титаном имеют более высокую прочность, в том числе и при высоких температурах, сохраняя при этом достаточно высокую пластичность и коррозионную стойкость (например, титановые сплавы марок ВТ6, ВТ14, ВТ3-1, ВТ22 и др.).
15 Указанные сплавы широко применяются, например, для изготовления лопаток турбин, работающих в условиях газоабразивной и влажно-паровой среды, при температурах до 500-540°C.

Лопатки турбин из титановых сплавов обладают повышенной чувствительностью
20 к концентраторам напряжения. Поэтому дефекты, образующиеся в процессе эксплуатации деталей из этих сплавов, вызывают возникновение интенсивных процессов разрушения. Кроме того, при изготовлении или ремонте деталей из титановых сплавов необходимо учитывать ряд таких требований, как повышенное качество поверхности, увеличение радиусов перехода от одних сечений к другим и др.

25 Возникающий в процессе эксплуатации износ лопаток требует проведения либо их преждевременной замены, либо их восстановительного ремонта.

При длительной эксплуатации в поверхностном слое материала лопаток образуются различного рода дефекты и, кроме структурных изменений, происходит
30 ухудшение физико-механических свойств поверхности и основы материала из-за насыщения газами (примесями внедрения - кислородом, азотом, углеродом, водородом, которые резко снижают пластичность, причем наиболее сильное отрицательное действие оказывают примеси внедрения, особенно газы. При насыщении всего лишь 0,003% Н, 0,02% N или 0,7% О титан полностью теряет
35 способность к пластическому деформированию и хрупко разрушается. Особенно вреден водород, он малорастворим в α -титане и образует пластинчатые частицы гидрида, снижающего, в частности, ударную вязкость и отрицательно проявляющегося в испытаниях на замедленное разрушение). Поскольку физико-
40 механические свойства титана и титановых сплавов зависят от содержания примесей в металле, то при дальнейшей эксплуатации таких лопаток начинается ускоренный процесс разрушения (возникновение трещин, дефектов основы и др.), который приводит к сильному повреждению или разрушению лопатки.

В некоторых случаях лопатки, имеющие сильные повреждения, восстанавливают
45 сварочными методами с последующей механообработкой (например, приваркой вставки с последующей механообработкой [Патент РФ №2240215, МПК В23Р 6/00, 2004 г.] или [Патент РФ №2153965. Колосов В.И. Способ восстановления длины пера лопаток компрессора газотурбинного двигателя и устройство для его осуществления. МПК В23Р 6/00, 2000 г.]), в котором устанавливают и фиксируют лопатку в
50 охлаждаемом приспособлении, а затем осуществляют дуговую наплавку по торцу переменного профиля неплавящимся электродом в среде защитного газа с присадочной проволокой. Недостатки указанных способов ремонта - сложность

обеспечения величины усталостной прочности сварного соединения, сопоставимой с усталостной прочностью основного материала, и вследствие этого низкое качество восстановления эксплуатационных свойств лопаток.

5 Известен способ восстановления пера лопаток методом холодного вальцевания, по которому лопатка восстанавливается путем удлинения пера при вальцевании за счет использования допуска по толщине лопатки (Новые технологические процессы и надежность ГТД. Бюллетень, М., ЦИАМ, 1981, N 1 (25), с.15-16). Метод холодного вальцевания имеет ограничения по максимальному плюсовому допуску по толщине, а
10 вальцевание с минусовым допуском по толщине лопатки исключено.

Известен способ восстановления эксплуатационных свойств лопаток из легированной стали [Гонсеровский Ф.Г. Упрочнение и ремонт стальных паротурбинных лопаток после эрозионного износа // Электрические станции. - 1988. - №8. - С.38], включающий механическое удаление изношенной кромки, наплавку
15 восстанавливаемого участка, механическую обработку лопатки, а также способ восстановления эксплуатационных свойств рабочих лопаток [Технология ремонта рабочих лопаток паровых турбин / Хромченко Ф.А., Лаппа В.А., Федина И.В. и др. // Тяжелое машиностроение. - 1999. - №8. - С.17. Попов В.А. Восстановление
20 оборудования ТЭС наплавкой и напылением. - Тверь: Центр подготовки персонала ООО Тверьэнерго, 2000. С.241-243], включающий снятие лопаток с ротора, удаление защитных накладок, механическое удаление поврежденного участка кромки, многослойную наплавку восстанавливаемого участка кромки, печную термическую
25 обработку, механическую обработку лопатки и приварку стеллитовых защитных пластин.

Наиболее близким к предлагаемому является способ восстановления эксплуатационных свойств лопаток, включающий термообработку путем нагрева и
30 выдержки лопатки в вакууме для обеспечения процесса дегазации металла лопатки и восстановления его дислокационной структуры с последующим охлаждением лопатки до температуры окружающей среды (Заявка РФ №2006137914, МПК В23Р 6/00, В23К 9/04, 2006 г.). Указанный способ включает также удаление дефектных участков лопатки, восстановление ее геометрии наплавкой металла или сваркой и
35 последующую механическую обработку лопатки.

Основным недостатком аналогов и прототипа является высокая трудоемкость и низкое качество обработки лопаток, поскольку материал восстанавливаемой лопатки имеет необратимую степень деградации, а восстановление лопатки требует
40 проведения высокотемпературных наплавочных процессов.

Техническим результатом заявляемого способа является повышение эксплуатационных свойств лопаток из титановых сплавов в процессе их
45 восстановления.

Технический результат достигается тем, что в способе восстановления эксплуатационных свойств лопаток из титановых сплавов, включающем удаление
45 поверхностного дефектного слоя металла лопатки, термообработку путем нагрева и выдержки лопатки в вакууме для обеспечения процесса дегазации металла лопатки и восстановления его дислокационной структуры с последующим охлаждением лопатки в вакууме до температуры окружающей среды, в отличие от прототипа, нагрев
50 осуществляют до температуры 300°С...500°С, а выдержку лопатки при этой температуре совмещают с электроимпульсной обработкой при плотности электрического тока от 10 МА/м² до 200 МА/м², при этом время выдержки выбирают в зависимости от габаритных размеров изделия в пределах 0,2 ч до 2,5 ч.

Технический результат достигается также тем, что в способе восстановления эксплуатационных свойств лопаток из титановых сплавов после термообработки лопатки производят ее упрочняющую обработку поверхностным пластическим деформированием (ППД) микрошариками, после ППД лопатки производят ее электролитно-плазменное полирование или ионную имплантацию и постимплантационный отпуск.

Технический результат достигается также тем, что в способе восстановления эксплуатационных свойств лопаток из титановых сплавов после электролитно-плазменного полирования производят ионную имплантацию и постимплантационный отпуск, в качестве ионов для имплантации используют ионы Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацию, причем ионную имплантацию проводят при энергии ионов 0,2-30 кэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см².

Технический результат достигается также тем, что в способе восстановления эксплуатационных свойств лопаток из титановых сплавов в качестве завершающей операции обработки на лопатку наносят защитное покрытие, при этом в качестве вариантов обработки используют: при нанесении защитного покрытия производят дополнительную ионную имплантацию, а в качестве ионов для имплантации используют ионы Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацию; в качестве материала защитного покрытия используют соединения металлов с бором Me-B, азотом Me-N, углеродом Me-C, а также соединения металлов с углеродом и азотом Me-NC и азотом и бором Me-NB, где Me - Ti, Zr, TiZr, AlTiZr, AlTi, AlZr, B - бор, N - азот, C - углерод; наносят многослойное защитное покрытие из чередующихся слоев металлов Me и соединений металлов с бором Me-B, азотом Me-N, углеродом Me-C, а также соединений металлов с углеродом и азотом Me-NC и азотом и бором Me-NB, где Me - Ti, Zr, TiZr, AlTiZr, AlTi, AlZr, B - бор, N - азот, C - углерод; толщину слоев многослойного защитного покрытия выбирают из диапазонов: $\delta_{Me} = 0,10 \dots 10$ мкм, $\delta_{Me-B} = \delta_{Me-N} = \delta_{Me-C} = \delta_{Me-NC} = \delta_{Me-NB} = \delta_{Me-X} = 0,10 \dots 6$ мкм, где δ_{Me} - толщина слоя металла, δ_{Me-N} (δ_{Me-C} , δ_{Me-NC} , δ_{Me-NB} , δ_{Me-X}) - толщина слоя одного из соединений Me-B, Me-N, Me-C, Me-NC, Me-NB или их комбинации Me-X; нанесение защитного покрытия осуществляют вакуумными ионно-плазменными методами, и/или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме, и/или газотермическими методами - плазменным, детонационным, газопламенным напылением.

Воздействие мощных импульсов электрического поля (электрический ток плотности порядка от 10 МА/м² до 200 МА/м²) на деградированную структуру материала лопатки приводит к дополнительному локальному тепловому воздействию, особенно интенсивно проявляющемуся в области его структурных дефектов. Это приводит к значительной интенсификации процессов восстановления структуры материала и его дегазации в областях с повышенной плотностью дефектов, которые протекают без перегрева основной массы металла обрабатываемой детали. Кроме того, дополнительным преимуществом от использования импульсов электрического поля является эффект упрочнения [Зуев Л.Б., Соснин О.В., Подборонников С.Ф. и др. // ЖТФ. 2000. Т.70. Вып.3. С.24-26]. Наличие же значительных структурных изменений, возникших в процессе эксплуатации лопаток, позволяет указанному эффекту наиболее сильно проявиться именно на деградированном материале деталей.

Таким образом, нагрев лопатки до температуры 300°С...500°С и выдержка лопатки в вакууме при этой температуре с обеспечением процесса дегазации металла лопатки при ее совмещении с электроимпульсной обработкой, проводимой при плотности электрического тока от 10 МА/м² до 200 МА/м², последующее охлаждение лопатки до

температуры окружающей среды позволяют произвести дегазацию материала лопатки, а также восстановить или повысить его физико-механические и структурные свойства.

5 Кроме того, применение дополнительных методов упрочняющей обработки, модифицирования поверхностного слоя материала лопатки и нанесения защитных покрытий, в сочетании с улучшенными свойствами материала лопатки, а также устранение необходимости наплавки и размерной механообработки позволяют достичь эффекта предлагаемого технического решения - повышения
10 эксплуатационных свойств лопаток из титановых сплавов.

Применение указанных методов упрочнения, модифицирования и нанесения покрытий для способа-прототипа, в результате возникновения неоднородностей материала детали, связанных с необходимостью наплавки (нанесения) чужеродного материала и проведением размерной механообработки, не позволяет достичь такого же высокого технического результата по надежности как в заявляемом техническом
15 решении.

Для оценки стойкости лопаток, восстановленных по прототипу и предлагаемому способу, были проведены следующие исследования.

20 Режимы и условия восстановления лопаток из титановых сплавов ВТ6, ВТ3-1, охватывающие предлагаемый диапазон режимов термической выдержки в вакууме лопаток, приведены в таблицах 1-7. По способу-прототипу (А) использовалось две группы образцов. Первая группа образцов - группа «а» включала образцы с восстановленным наплавкой материалом с последующей защитно-упрочняющей
25 обработкой, вторая группа образцов прототипа - группа «в» включала образцы, исходное состояние которых было идентично образцам, подготовленным для обработки по предлагаемому способу. Наличие двух подгрупп образцов-прототипов позволило оценить влияние процесса термической выдержки лопатки в вакууме при ее совмещении с электроимпульсной обработкой на свойства восстановленных деталей.
30

Вторая группа образцов (В) включала образцы, подготовленные по предлагаемому способу - при воздействии электроимпульсной обработки при плотности электрического тока от 10 МА/м² до 200 МА/м².

35

Табл. 1											
№	Марка стали	Режимы восстановления лопаток									
		Способ-прототип (Вариант А1 - «а» и «в»)				Предлагаемый способ (Вариант В1)					
		Т, °С	Среда	τ, выд., час	V _{охл.} , °С/мин	Т, °С	Среда	τ _{выд.} , час	V _{охл.}	I, МА/м ²	
40	1	ВТ6	500	Вакуум	0,2	25	500	Вакуум	0,2	25	10
	2	ВТ3-1	500		0,2		500		0,2		

45

Табл.2											
№	Марка стали	Режимы восстановления лопаток									
		Способ-прототип (Вариант А1 - «а» и «в»)				Предлагаемый способ (Вариант В1)					
		Т, °С	Среда	τ _{выд.} , час	V _{охл.} , °С/мин	Т, °С	Среда	τ _{выд.} , час	V _{охл.}	I, МА/м ²	
50	1	ВТ6	500	Вакуум	0,5	25	500	Вакуум	0,5	25	100
	2	ВТ3-1	500		0,5		500		0,5		

Табл.3										
--------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

5

№	Марка стали	Режимы восстановления лопаток								
		Способ-прототип (Вариант А1 - «а» и «в»)				Предлагаемый способ (Вариант В1)				
		Т, °С	Среда	$\tau_{\text{выд.}}$ час	$V_{\text{охл.}}$ °С/мин	Т, °С	Среда	$\tau_{\text{выд.}}$ час	$V_{\text{охл.}}$	I, МА/м ²
1	ВТ6	450	Вакуум	1,5	10	450	Вакуум	1,5	10	200
2	ВТЗ-1	450		1,5		450		1,5		

10

Табл.4

№	Марка стали	Режимы восстановления лопаток								
		Способ-прототип (Вариант А1 - «а» и «в»)				Предлагаемый способ (Вариант В1)				
		Т, °С	Среда	$\tau_{\text{выд.}}$ час	$V_{\text{охл.}}$ °С/мин	Т, °С	Среда	$\tau_{\text{выд.}}$ час	$V_{\text{охл.}}$	I, МА/м ²
1	ВТ6	400	Вакуум	1,5	20	400	Вакуум	1,5	20	140
2	ВТЗ-1	400		1,5		400		1,5		

15

Табл.5

№	Марка стали	Режимы восстановления лопаток								
		Способ-прототип (Вариант А1 - «а» и «в»)				Предлагаемый способ (Вариант В1)				
		Т, °С	Среда	$\tau_{\text{выд.}}$ час	$V_{\text{охл.}}$ °С/мин	Т, °С	Среда	$\tau_{\text{выд.}}$ час	$V_{\text{охл.}}$	I, МА/м ²
1	ВТ6	350	Вакуум	1	15	350	Вакуум	1	15	80
2	ВТЗ-1	350		1		350		1		

20

Табл.6

№	Марка стали	Режимы восстановления лопаток								
		Способ-прототип (Вариант А1 - «а» и «в»)				Предлагаемый способ (Вариант В1)				
		Т, °С	Среда	$\tau_{\text{выд.}}$ час	$V_{\text{охл.}}$ °С/мин	Т, °С	Среда	$\tau_{\text{выд.}}$ час	$V_{\text{охл.}}$	I, МА/м ²
1	ВТ6	300	Вакуум	2,5	20	300	Вакуум	2,5	20	80
2	ВТЗ-1	300		2,5		300		2,5		

25

Табл.7

№	Марка стали	Режимы восстановления лопаток								
		Способ-прототип (Вариант А1 - «а» и «в»)				Предлагаемый способ (Вариант В1)				
		Т, °С	Среда	$\tau_{\text{выд.}}$ час	$V_{\text{охл.}}$ °С/мин	Т, °С	Среда	$\tau_{\text{выд.}}$ час	$V_{\text{охл.}}$	I, МА/м ²
1	ВТ6	250	Вакуум	0,5	25	250	Вакуум	0,5	25	8
2	ВТЗ-1	250		0,5		250		0,5		

30

35

40

Анализ результатов сравнительных испытаний показал, что наилучшие свойства восстановленных лопаток обеспечивает предлагаемый способ восстановления деталей. Образцы, обработанные по предлагаемому способу, характеризуются

лучшими эксплуатационными свойствами и наименьшим количеством дефектов материала детали (при реализации режимов обработки по табл.7 эффекта не наблюдалось).

Были также проведены испытания на выносливость и циклическую прочность лопаток в условиях эксплуатационных температур (при 300-450°С) на воздухе. В результате эксперимента было установлено следующее: условный предел выносливости лопаток (после ремонта) составляет:

А. После восстановления и механообработки лопаток:

1) по способу-прототипу:

- группа «а» - 290-325 МПа;

- группа «в» - 240-255 МПа;

2) по предлагаемому способу - в среднем 415-430 МПа;

Б. После обработки микрошариками:

1) по способу-прототипу:

- группа «а» - 315-440 МПа;

- группа «в» - 250-270 МПа;

2) по предлагаемому способу - в среднем 425-440 МПа;

В. После имплантации ионов Cr, Y, Yb, C, B, Zr:

1) по способу-прототипу:

- группа «а» 334-352 МПа;

- группа «в» 290-305 МПа;

2) по предлагаемому способу - в среднем 455-470 МПа;

Г. После обработки микрошариками и имплантации ионов Cr, Y, Yb, C, B, Zr:

1) по способу-прототипу:

- группа «а» 345-360 МПа;

- группа «в» 295-310 МПа;

2) по предлагаемому способу - в среднем 485-490 МПа;

Д. После обработки микрошариками и имплантации ионов Cr, Y, Yb, C, B, Zr и нанесения защитного покрытия

1) по способу-прототипу:

- группа «а» 330-344 МПа;

- группа «в» 290-300 МПа;

2) по предлагаемому способу - в среднем 470-485 МПа;

Е. После обработки микрошариками и имплантации ионов Cr, Y, Yb, C, B, Zr и нанесения защитного многослойного покрытия

1) по способу-прототипу:

- группа «а» 335-345 МПа;

- группа «в» 290-300 МПа;

2) по предлагаемому способу - в среднем 475-485 МПа.

Повышение предела выносливости у восстановленных и обработанных лопаток во всех видах проведенных испытаний указывает на то, что при применении одного из следующих вариантов проведения дополнительной упрочняющей обработки восстановленной лопатки и нанесения покрытия: упрочняющая обработка микрошариками; ионная имплантация ионами одного из следующей группы химических элементов: Cr, Y, Yb, C, B, Zr или их комбинации; постимплантационный отпуск; нанесение покрытия (соединения металлов с бором Me-B, азотом Me-N, углеродом Me-C, а также соединения металлов с углеродом и азотом Me-NC и азотом и бором Me-NB, где Me - Ti, Zr, TiZr, AlTiZr, AlTi, AlZr, B - бор, N - азот, C - углерод, или нанесение многослойного защитного покрытия из чередующихся слоев металлов Me и соединений металлов с бором Me-B, азотом Me-N, углеродом Me-C, а также соединений металлов с углеродом и азотом Me-NC и азотом и бором Me-NB, где Me - Ti, Zr, TiZr, AlTiZr, AlTi, AlZr, B - бор, N - азот, C - углерод), полученного, либо вакуумными ионно-плазменными методами, и/или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме, и/или газотермическими методами - плазменным, детонационным, газопламенным напылением, позволяют достичь технического результата заявляемого способа - снижения трудоемкости процесса и

повышения эксплуатационных свойств лопаток из легированных сталей за счет восстановления свойств материала детали еще до начала возникновения процессов интенсивного разрушения детали. При этом снижение трудоемкости восстановления лопаток связано с удалением из технологии ремонта лопаток таких наиболее трудоемких и дорогих процессов, как процессов наплавки, размерной механообработки и связанных с ними операций контроля.

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение предлагаемого способа восстановления эксплуатационных свойств лопаток из титановых сплавов позволяет увеличить по сравнению с прототипом условный предел выносливости (σ_{-1}) в среднем с 290-325 МПа до 415-430 МПа, а при применении дополнительных вариантов упрочняющей обработки и нанесения покрытий до 470-485 МПа, что подтверждает заявленный технический результат (повышение эксплуатационных свойств лопаток из титановых сплавов). При этом простое использование упрочняющих видов обработки для способа-прототипа не позволяет достичь поставленного технического результата.

Пример реализации способа.

После дефектации ремонтной лопатки, изготовленной из титанового сплава ВТ9, ее дефектный поверхностный слой удаляли механической обработкой шлифованием, затем лопатку помещали в вакуумную камеру установки, создавали вакуум (вакуум $6 \cdot 10^{-2}$ Па), осуществляли нагрев лопатки до температуры 500°C , выдержку при этой температуре в течение 1,2 часа, ее электроимпульсную обработку при плотности электрического тока 70 MA/m^2 и охлаждение в вакууме до температуры окружающей среды (28°C). В результате выдержки в вакууме произошла дегазация дефектных участков металла лопатки и восстановление дислокационной структуры металла, что сказалось на повышении эксплуатационных свойств детали.

Ионная имплантация. Обработку поверхности лопаток по предлагаемому способу проводили в следующей последовательности. После дефектации лопатки, удаления дефектного поверхностного слоя, нагрева лопатки в вакууме ($4 \cdot 10^{-2}$ Па) и выдержки при заданной температуре нагрева (300°C), совмещенной с электроимпульсной обработкой (200 MA/m^2), проводили дополнительную упрочняющую обработку поверхностным пластическим деформированием (ППД) микрошариками и электролитно-плазменное полирование. Затем лопатку тщательно обезжировали в ультразвуковой ванне и протирали бензиноацетоновой смесью. Для удаления остатков влаги лопатку подвергали нагреву в сушильном шкафу до температуры 60°C - 65°C . После сушки лопатку помещали в вакуумную камеру установки для ионной имплантации, где создавали вакуум не ниже $2 \cdot 10^{-4}$ Па и проводили очистку ионами аргона в течение 12 мин с последующей ионной имплантационной обработкой по режиму: имплантируемый ион Cr; энергия ионов 300-1000 эВ; плотность ионного тока $5\text{-}10 \text{ mA/cm}^2$; доза имплантации ионов $3 \cdot 10^{19}$ ион/ cm^2 . После этого в том же рабочем пространстве установки проводили вакуумный постимплантационный отпуск при температуре 400°C в течение 1 ч. Постимплантационный отпуск совмещали с нанесением ионно-плазменного покрытия нитрида титана (режимы нанесения покрытия: ток $I=140 \text{ A}$, напряжение $U=140 \text{ B}$).

Формула изобретения

1. Способ восстановления эксплуатационных свойств лопаток из титановых сплавов, включающий удаление поверхностного дефектного слоя металла лопатки,

термообработку путем нагрева и выдержки лопатки в вакууме для обеспечения процесса дегазации металла лопатки и восстановления его дислокационной структуры с последующим охлаждением лопатки в вакууме до температуры окружающей среды, отличающийся тем, что нагрев осуществляют до температуры 300-500°C, а выдержку лопатки совмещают с электроимпульсной обработкой при плотности электрического тока от 10 до 200 МА/м².

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что время выдержки выбирают в зависимости от габаритных размеров изделия в пределах от 0,2 до 2,5 ч.

3. Способ по п.1, отличающийся тем, что после термообработки в вакууме лопатки производят ее упрочняющую обработку поверхностным пластическим деформированием (ППД) микрошариками.

4. Способ по п.3, отличающийся тем, что после ППД лопатки производят ее электролитно-плазменное полирование.

5. Способ по п.3, отличающийся тем, что после ППД лопатки производят ионную имплантацию и постимплантационный отпуск.

6. Способ по п.4, отличающийся тем, что после электролитно-плазменного полирования производят ионную имплантацию и постимплантационный отпуск.

7. Способ по п.5, отличающийся тем, что в качестве ионов для имплантации используют ионы Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинации.

8. Способ по п.6, отличающийся тем, что в качестве ионов для имплантации используют ионы Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинации.

9. Способ по п.7, отличающийся тем, что ионную имплантацию проводят при энергии ионов 0,2-30 кэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см².

10. Способ по п.8, отличающийся тем, что ионную имплантацию проводят при энергии ионов 0,2-30 кэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см².

11. Способ по любому из пп.1-10, отличающийся тем, что в качестве завершающей операции обработки на лопатку наносят защитное покрытие.

12. Способ по п.11, отличающийся тем, что при нанесении защитного покрытия производят дополнительную ионную имплантацию, а в качестве ионов для имплантации используют ионы Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацию.

13. Способ по п.11, отличающийся тем, что в качестве материала защитного покрытия используют соединения металлов с бором Me-B, азотом Me-N, углеродом Me-C, а также соединений металлов с углеродом и азотом Me-NC и азотом и бором Me-NB, где Me - Ti, Zr, TiZr, AlTiZr, AlTi, AlZr, B - бор, N - азот, C - углерод.

14. Способ по п.12, отличающийся тем, что в качестве материала защитного покрытия используют соединения металлов с бором Me-B, азотом Me-N, углеродом Me-C, а также соединений металлов с углеродом и азотом Me-NC и азотом и бором Me-NB, где Me - Ti, Zr, TiZr, AlTiZr, AlTi, AlZr, B - бор, N - азот, C - углерод.

15. Способ по п.11, отличающийся тем, что наносят многослойное защитное покрытие из чередующихся слоев металлов Me и соединений металлов с бором Me-B, азотом Me-N, углеродом Me-C, а также соединений металлов с углеродом и азотом Me-NC и азотом и бором Me-NB, где Me - Ti, Zr, TiZr, AlTiZr, AlTi, AlZr, B - бор, N - азот, C - углерод.

16. Способ по п.12, отличающийся тем, что наносят многослойное защитное покрытие из чередующихся слоев металлов Me и соединений металлов с бором Me-B, азотом Me-N, углеродом Me-C, а также соединений металлов с углеродом и азотом Me-NC и азотом и бором Me-NB, где Me - Ti, Zr, TiZr, AlTiZr, AlTi, AlZr, B - бор, N - азот, C - углерод.

17. Способ по п.15, отличающийся тем, что толщину слоев многослойного защитного покрытия выбирают из диапазонов: $\delta_{Me}=0,10 \dots 10$ мкм, $\delta_{Me-V}=\delta_{Me-N}=\delta_{Me-C}=\delta_{Me-NC}=\delta_{Me-NB}=\delta_{Me-X}=0,10 \dots 6$ мкм, где δ_{Me} - толщина слоя металла, δ_{Me-V} (δ_{Me-N} , δ_{Me-C} , δ_{Me-NC} , δ_{Me-NB} , δ_{Me-X}) - толщина слоя одного из соединений Me-V, Me-N, Me-C, Me-NC, Me-NB или их комбинации Me-X.

18. Способ по п.16, отличающийся тем, что толщину слоев многослойного защитного покрытия выбирают из диапазонов: $\delta_{Me}=0,10 \dots 10$ мкм, $\delta_{Me-V}=\delta_{Me-N}=\delta_{Me-C}=\delta_{Me-NC}=\delta_{Me-NB}=\delta_{Me-X}=0,10 \dots 6$ мкм, где δ_{Me} - толщина слоя металла, δ_{Me-V} (δ_{Me-N} , δ_{Me-C} , δ_{Me-NC} , δ_{Me-NB} , δ_{Me-X}) - толщина слоя одного из соединений Me-V, Me-N, Me-C, Me-NC, Me-NB или их комбинации Me-X.

19. Способ по любому из пп.12-18, отличающийся тем, что нанесение защитного покрытия осуществляют вакуумными ионно-плазменными методами, и/или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме, и/или газотермическими методами - плазменным, детонационным, газопламенным напылением.

20

25

30

35

40

45

50