

**ОПИСАНИЕ
ИЗОБРЕТЕНИЯ
К ПАТЕНТУ**
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **19645**

(13) **С1**

(46) **2015.12.30**

(51) МПК

C 23C 14/00 (2006.01)

(54) **СПОСОБ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ
НА ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

(21) Номер заявки: а 20121864

(22) 2012.12.28

(43) 2014.08.30

(71) Заявитель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(72) Авторы: Иванов Игорь Аркадьевич; Нарушко Елена Олеговна; Орлова Екатерина Петровна; Федорцев Валерий Александрович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(56) RU 2430992 C2, 2011.

ВУ 14464 С1, 2011.

RU 2161661 С1, 2001.

RU 2171315 C2, 2001.

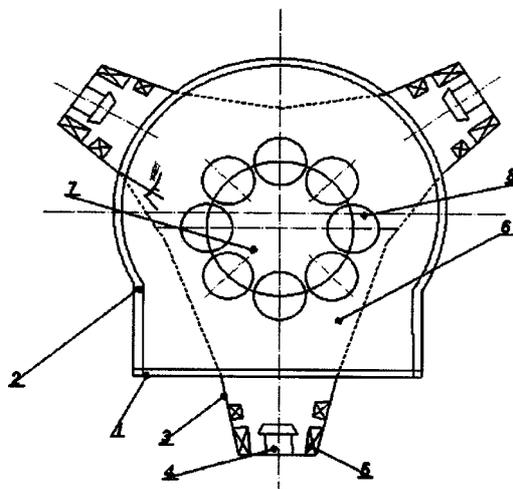
RU 2026412 С1, 1995.

US 5403629 А, 1995.

US 2006/060467 А1.

(57)

Способ нанесения износостойкого покрытия на лопатки компрессора газотурбинного двигателя, при котором лопатки предварительно полируют, очищают в ультразвуковой ванне, помещают в вакуумную камеру ионоплазменной установки и закрепляют на поворотном столе, осуществляют очистку ионами аргоновой газовой плазмы, образованной путем подачи на лопатки короткоимпульсного высокочастотного высоковольтного отрицательного потенциала смещения, после окончания ионной очистки меняют плазму аргона на плазму азота и осуществляют ионную имплантацию азота в поверхностный слой лопаток при тех же параметрах потенциала смещения, прерывают формирование плазмы азота, формируют плазму титана, очищают ее от макрочастиц и подают на лопатки потенциал смещения с теми же высокочастотными параметрами, обеспечивая имплантацию ионов



Фиг. 1

ВУ 19645 С1 2015.12.30

титана в поверхностный слой и разогрев лопаток до достижения лопатками температуры, необходимой для осаждения покрытия, при снижении потенциала смещения наносят на лопатки подслои титана, осаждают чередующиеся слои из нитрида титана и нитрида титан-алюминия, при этом слой нитрида осаждают при формировании плазмы азота, а слой нитрида титан-алюминия - титан-алюминиевой плазмы, **отличающийся** тем, что вращение поворотного стола осуществляют с помощью планетарного механизма, в котором отношение числа зубьев шестерни Z_{sh} к числу зубьев сателлита Z_s составляет 7,6.

Изобретение относится к области авиадвигателестроения, конкретно к повышению износостойкости, долговечности и надежности лопаток компрессора газотурбинных двигателей путем нанесения покрытий на их поверхности или изменения состава поверхностных слоев ионной имплантацией.

Известен способ нанесения износостойких покрытий на лопатки компрессора газотурбинного двигателя [1] путем осаждения чередующихся слоев из металлов и их нитридов с очисткой поверхности лопаток ионами аргона и ионной имплантацией в процессе осаждения. В данном способе при нанесении многослойного покрытия используют катодное распыление в среде инертного газа на постоянном токе.

Существенный недостаток катодного распыления в нанесении покрытий связан с очень низкой степенью ионизации продуктов катодного распыления, что значительно ухудшает качество наносимого покрытия. В первую очередь, это снижает плотность покрытия, его адгезионную прочность и износостойкость.

Известен способ нанесения износостойких покрытий на лопатки компрессора газотурбинного двигателя [2] (прототип) путем осаждения чередующихся слоев металлов и их нитридов с очисткой поверхности лопаток ионами аргона и ионной имплантацией в процессе осаждения, при этом предварительно лопатки полируют, очищают в ультразвуковой ванне, а очистку ионами аргона осуществляют газовой плазмой, образованной путем подачи на лопатки короткоимпульсного высокочастотного высоковольтного отрицательного потенциала смещения, после окончания ионной очистки меняют плазму аргона на плазму азота и осуществляют ионную имплантацию азота в поверхностный слой лопаток при тех же параметрах потенциала смещения, далее прерывают формирование плазмы азота, формируют плазму титана, очищают ее от микрочастиц и подают на лопатки потенциал смещения с теми же высокочастотными параметрами, обеспечивая имплантацию ионов титана в поверхностный слой и разогрев лопаток при достижении лопатками температуры, необходимой для осаждения покрытия, затем снижением потенциала смещения наносят на лопатки подслои титана, затем осаждают чередующиеся слои из нитрида титана и нитрида титан-алюминия, при этом слой нитрида титана осаждают при формировании плазмы азота, а слой нитрида титан-алюминия - титан-алюминиевой плазмы.

Очистку ионами аргона осуществляют при давлении 1-2 Па подачей отрицательного короткоимпульсного высокочастотного потенциала смещения длительностью до 5 мкс с коэффициентом заполнения импульсов 0,5-0,6 при амплитуде потенциала смещения до 2-4 кВ.

Обработку лопаток ионами титана осуществляют при амплитуде потенциала смещения 1-2 кВ с достижением температуры 400-450 °С и последующим снижением потенциала смещения до 400-600 В в импульсно-периодическом режиме или до 200-300 В при постоянном потенциале.

Подслои титана и первый слой нитрида титана наносят толщиной 150-200 нм.

Лопатки полируют до шероховатости поверхности не выше Rz 0,63.

Осуществляют дополнительный нагрев лопаток инфракрасными обогревателями или путем периодического увеличения амплитуды потенциала смещения.

BY 19645 C1 2015.12.30

Нанесение чередующихся слоев покрытия осуществляют с применением одноэлементных катодов из Ti, Al и/или композиционных катодов - TiAl в среде реакционного газа - азота.

Слои TiAlN наносят со следующим стехиометрическим составом: Ti - 23-28 %, Al - 23-28 %, N - 44-54 %, а при структуре слоя TiN-Ti - 44-54 %, N - 56-46 %.

Состав многослойного покрытия получают при токах вакуумнодугового разряда на одноэлементных катодах: на Al - 75-83 А, на Ti - 100-115 А. Толщину покрытия наносят порядка до 10 мкм. Количество и толщину слоев, входящих в покрытие, задают скоростью перемещения изделий от одного источника плазмы к другому. Плазму очищают от микрокапельной фракции посредством плазменных фильтров.

Недостатком прототипа является неравномерность толщины наносимого покрытия, которая варьирует в интервале 4,7-5,5 мкм, что составляет порядка 15 %. Такое отклонение толщины не допустимо там, где требуется очень высокая точность (2-4 квалитеты) - в электронике или при эксплуатации в "тяжелых" условиях: $t \approx 1000$ °С, агрессивные вещества такие как соли, кислоты, реактивные газы и т.д.

Задача, решаемая изобретением, заключается в обеспечении равномерной толщины покрытия.

Поставленная задача решается в способе нанесения износостойкого покрытия на лопатки компрессора газотурбинного двигателя, при котором лопатки предварительно полируют, очищают в ультразвуковой ванне, помещают в вакуумную камеру ионоплазменной установки и закрепляют на поворотном столе, осуществляют очистку ионами аргоновой газовой плазмы, образованной путем подачи на лопатки короткоимпульсного высокочастотного высоковольтного отрицательного потенциала смещения, после окончания ионной очистки меняют плазму аргона на плазму азота и осуществляют ионную имплантацию азота в поверхностный слой лопаток при тех же параметрах потенциала смещения, прерывают формирование плазмы азота, формируют плазму титана, очищают ее от макрочастиц и подают на лопатки потенциал смещения с теми же высокочастотными параметрами, обеспечивая имплантацию ионов титана в поверхностный слой и разогрев лопаток до достижения лопатками температуры, необходимой для осаждения покрытия, при снижении потенциала смещения наносят на лопатки подслой титана, осаждают чередующиеся слои из нитрида титана и нитрида титан-алюминия, при этом слой нитрида осаждают при формировании плазмы азота, а слой нитрида титан-алюминия - титан-алюминиевой плазмы, отличающемся тем, что вращение поворотного стола осуществляют с помощью планетарного механизма, в котором отношение числа зубьев шестерни Z_{sh} к числу зубьев сателлита Z_s составляет 7,6.

Сущность изобретения поясняется фигурами. Фиг. 1 - вакуумная камера. Корпус 1 выполнен в виде цилиндрической обечайки. Такая форма отличается простотой изготовления, рациональным расходом материала. Между наружной и внутренней стенками камеры находится полость 2 для циркуляции холодной/горячей воды, для нагрева или/охлаждения внутреннего пространства. К обечайке вакуумной камеры приварены корпуса 3, где расположены электродуговые испарители и генераторы металлической плазмы. Такая геометрия позволит сэкономить пространство рабочей зоны. Расположение испарителей под углом 120° формирует зону напыления 6, где располагается стол 7, с закрепленными на нем с помощью технологического оснащения лопатки 8, 9 - генератор газовой плазмы.

Фиг. 2 - график процесса осаждения покрытия на вращающуюся деталь.

Фиг. 3 - направление вращения детали.

Фиг. 4 - график влияния угла падения потока на поверхность лопатки.

Фиг. 5 - схема движения образца с фиксированным положением поверхности А.

Фиг. 6 - схема движения образца с чередованием поверхностей А-Б.

Фиг. 7 - схема планетарной передачи.

В вакуумной камере (фиг. 3) на поворотном столе 7 закрепляют лопатки 8 и подвергают очистке и обезгаживанию (в соответствии с [2]) при давлении 1-2 Па ионами аргона, извлекаемыми из плазмы газового источника 9. Длительность процесса очистки составляет 20-40 мин. При очистке на лопатки подают короткоимпульсный высокочастотный высоковольтный потенциал смещения с длительностью импульса 5 мкс, коэффициентом заполнения импульса 0,55 и амплитудой - 4 кВ. Далее осуществляют ионное азотирование поверхности. Азотирование поверхности изделия обеспечивается при формировании плазмы азота газовым источником, извлечением и ускорением ионов на лопатку, с подачей на нее периодического короткоимпульсного потенциала смещения при ее погружении в плазму.

Плазма вакуумной дуги проходит через плазменный фильтр и очищается от микрочастиц продуктов эрозии материала катода в катодном пятне. При этом на лопатки 8 подают от высоковольтного генератора 5 отрицательный импульсно-периодический потенциал смещения с параметрами: длительность импульса до 5 мкс с коэффициентом заполнения импульсов в пределах 0,55 и амплитудой напряжения смещения до - 4 кВ. Режим высокочастотной короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации обеспечивает динамическое изменение энергии ионов при их извлечении из плазмы, граничащей с лопаткой. Далее амплитуду потенциала смещения снижают до -400 В и сначала осаждают подслоем титана, а затем наносят слой нитрида титана той же толщины 150-200 нм. При этом температуру лопатки поддерживают на уровне 400-450 °С. В последующем наносят многослойное градиентное покрытие TiN/TiAlN, состоящее из наноразмерных слоев толщиной в пределах 150÷300 нм.

Температуру изделия перед нанесением покрытий и в процессе его формирования выбирают с учетом теплофизических характеристик материала лопаток, благоприятных условий протекания диффузионных процессов при формировании переходного слоя и условиями протекания плазмохимических реакций при формировании защитного покрытия, и поддерживают в диапазоне 400-450 °С. Формирование переходного подслоя, слоя нитрида титана и осаждение многослойного покрытия могут сопровождаться снижением температуры поверхности конденсации. Температуру лопаток поддерживают изменением амплитуды потенциала смещения, током магнитных катушек вакуумно-дугового испарителя, потенциалом смещения на электродах плазменных фильтров, током плазменных генераторов и током инфракрасных нагревателей. Формирование покрытий осуществляется в среде реакционного газа - азота - при давлении 1,0 Па.

Формирование многослойного покрытия производят перемещением изделий от одного вакуумно-дугового генератора металлической плазмы к другому. Стехиометрический состав наносимого многослойного ионно-плазменного покрытия, содержащего TiAlN, содержит: Ti - 25 %, Al - 24 %, N - 49 %, а для слоя TiN-Ti - 49 %, N - 49 %. Следует отметить, что требуемый состав многослойного покрытия получен при токе вакуумно-дугового разряда на одноэлементных катодах: на Al - 80 А, на Ti - 110 А. Кроме того, толщину покрытия наносят порядка до 10 мкм при средней толщине чередующихся слоев 150-300 нм. Толщину отдельных слоев покрытия задают скоростью перемещения вращающихся вокруг своей оси лопаток от одного вакуумно-дугового испарителя к другому. Равномерность по толщине обеспечивается планетарным механизмом с отношением зубьев шестерни к числу зубьев сателлита, равным 7,6. Данное решение позволит лопатке, пройдя полный круг вращения вокруг центра поворотного стола, быть обращенной к испарителю новой стороной.

Осаждение многослойного покрытия осуществляли как при постоянном потенциале смещения амплитудой -300 В, так и при импульсно-периодическом потенциале смещения амплитудой -600 В.

Установлено, что покрытия рабочих лопаток TiN и TiAlN имеют равномерную толщину по поверхности лопаток в пределах 4,8-5,0 мкм. Покрытие состоит из 22 чередующихся по составу слоев толщиной ~230 нм с четким их разделением. Кромки лопаток сохраняют четкую геометрическую форму без признаков оплавления.

ВУ 19645 С1 2015.12.30

Некоторые дополнительные пояснения предложенного способа нанесения покрытия.

Плазменный поток дугового разряда является аксиально-симметричным, расходящимся по мере удаления от рабочей поверхности катода. Распределение плотности расширяющейся плазмы при эрозионном испарении подчиняется закону косинуса, т.е. зависит от угла между геометрической осью испарителя и радиус-вектором, связывающим точку на поверхности основы, а также от расстояния от поверхности изделия до испарителя.

Сопоставление полученных результатов показывает, что скорость роста покрытия значительно падает с увеличением угла, образованного нормалью к поверхности объекта и осью испарителя.

Процесс осаждения покрытия на поверхность вращающегося объекта является периодическим. Осаждение покрытия на элементарный участок поверхности детали простой геометрической формы наблюдается в течение некоторого времени. В течение такого же отрезка времени осаждения нет (фиг. 2, 3).

На скорость роста покрытий влияет и угол падения потока на поверхность конденсации (фиг. 4).

Таким образом, плотность на оси потока максимальна, а в направлении, перпендикулярном оси, равна нулю. Данный эффект создает неравномерность в наносимом покрытии, что отрицательно сказывается на качестве готового изделия особенно в электронике, в машиностроении при производстве ответственных деталей, где необходима высокая точность, в авиастроении, приборостроении и др.

Процесс осаждения покрытия на поверхности вращающегося объекта является периодическим. Осаждение покрытия на элементарный участок поверхности детали простой геометрической формы наблюдается в течение некоторого времени.

В течение такого же отрезка времени осаждения нет. В этом случае планетарная траектория движения детали может обеспечить автоматическое достижение равномерности осаждения покрытий с достаточно высокой точностью.

Однако необходимо следить за тем, чтобы, пройдя полный оборот, образец был обращен каждый раз новой стороной к оси источника испарения.

Результаты измерений толщины покрытия весовым способом

Сводная таблица результатов измерений толщины покрытия весовым способом		
Способы нанесения покрытий	Отношение масс образцов $\left(\frac{mA}{mB}\right)$	Неравномерность толщины покрытия, %
Неконтролируемое вращение изделия	по прототипу [2]	15
Фиксированное положение поверхности А (фиг. 5)	1,2	20
Чередование поверхностей А-Б (фиг. 6)	1,02	2
Изменение положения А на 90°	расчет [3]	0

Допустим время t , в течение которого шестерня обошла полный оборот, а сателлит оббежал по ее поверхности расстояние до первоначального положения (фиг. 7). Тогда:

$$N_{sh} = \frac{2\pi}{w_{sh}},$$
$$N_s = \frac{2\pi}{w_s},$$

где N_{sh} - число оборотов шестерни,
 N_s - число оборотов сателлита,
 w_{sh} - угловая скорость шестерни,
 w_s - угловая скорость сателлита.

Запишем формулы для вычисления угловых скоростей шестерни и сателлита соответственно, затем выразим из них линейную скорость.

$$w_{sh} = \frac{v_{1,2}}{R_{sh}} \rightarrow v_{1,2} = w_{sh} \cdot R_{sh},$$

$$w_s = \frac{v_{2,1}}{R_s} \rightarrow v_{2,1} = w_s \cdot R_s.$$

Так как линейная скорость $v_{2,1}$ для шестерни и сателлита будет общей, тогда приравняем полученные выражения:

$$w_{sh} \cdot R_{sh} = w_s \cdot R_s,$$

где $v_{1,2}$ - линейная скорость шестерни относительно сателлита,

$v_{2,1}$ - линейная скорость сателлита относительно шестерни,

R_{sh} - радиус шестерни,

R_s - радиус сателлита.

Выразив отсюда значение угловой скорости сателлита, с условием, что сателлит будет поворачиваться новой стороной, пройдя полный оборот вокруг шестерни, получим:

$$w_s = \pi \cdot 380 \cdot \frac{2}{2} \cdot 50 = 7,6 \cdot \pi \text{ рад.}$$

Подставив полученные значения в формулу для нахождения передаточного отношения, получим:

$$i_{1,2} = \frac{w_{sh}}{w_s} = \frac{Z_s}{Z_{sh}} = \frac{\pi}{7,6 \cdot \pi} = \frac{1}{7,6},$$

где $i_{1,2}$ - передаточное отношение шестерни к сателлиту,

$$\frac{Z_{sh}}{Z_s} = 7,6 \rightarrow Z_{sh} = 7,6 Z_s.$$

Заявленный способ нанесения износостойких покрытий TiAlN/TiN на лопатки компрессора газотурбинного двигателя осуществляется следующим образом. Вначале полируют поверхности лопаток до $Rz = 0,63$ мкм на полировально-шлифовальном станке и промывают в очищающих растворах в ультразвуковой ванне.

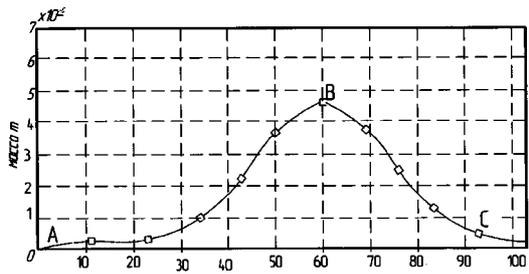
Процесс нанесения покрытия включает шесть основных фаз: очистка поверхности ионами Ar, плазменно-иммерсионная высокочастотная короткоимпульсная имплантация ионов азота, плазменно-иммерсионная высокочастотная короткоимпульсная имплантация ионов титана с одновременным нагревом лопаток, формирование переходного титанового подслоя, формирование нитридтитанового слоя и осаждение многослойного покрытия.

Преимущество износостойких нанопокровтий (TiAl)N/TiN заключается в том, что при высоких значениях предела текучести, микротвердости и наличии внутренних напряжений они обладают высокой пластичностью и трещиностойкостью.

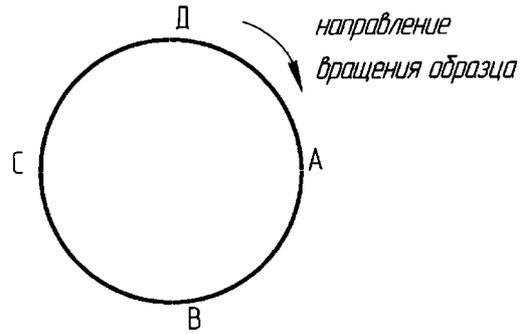
Таким образом, заявленный способ по сравнению с прототипом обеспечивает равномерность наносимого износостойкого покрытия на лопатки компрессора газотурбинного двигателя.

Источники информации:

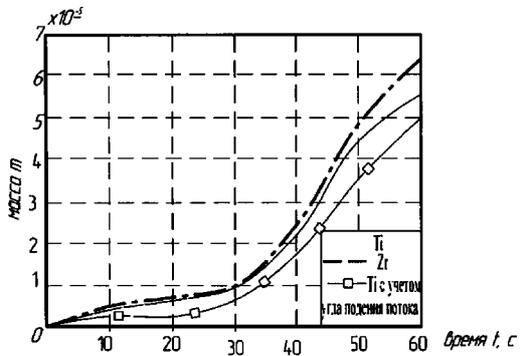
1. Патент RU 2161661, МПК С23С 14/06, 1999.
2. Патент RU 2430992, МПК С2, С23 С14/48, 14/0, 14/34, 2011.
3. Разработать численный алгоритм исследования скорости роста покрытий и формирования температурных полей в подложке/ отчет о НИР, № гос. рег. ГР № 2010 00245 от 05.03.2010. Рук. Иванов И.А., БИТУ. - 54 с.



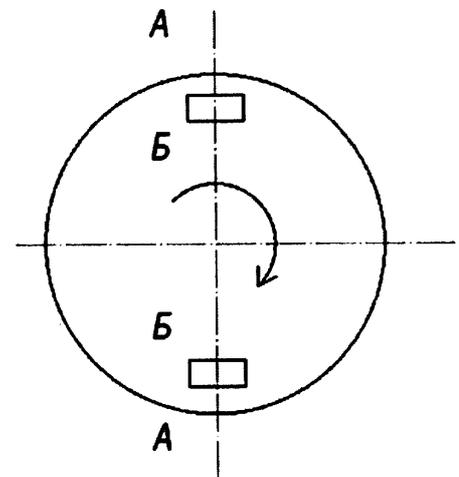
Фиг. 2



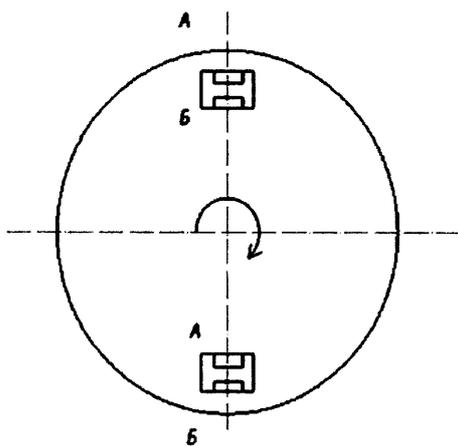
Фиг. 3



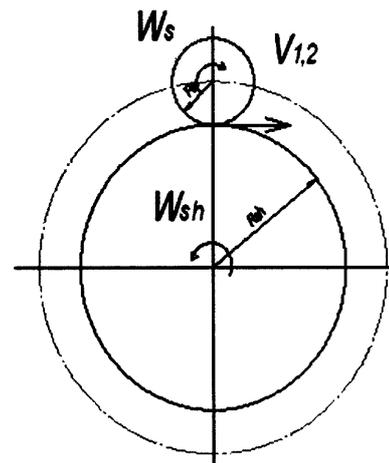
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7