



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) **RU** (11) **2 403 316** (13) **C2**

(51) МПК
C23C 14/48 (2006.01)
C23C 30/00 (2006.01)
C23C 14/00 (2006.01)
B82B 3/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2008118953/02, 13.05.2008

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
13.05.2008

(43) Дата публикации заявки: 20.11.2009

(45) Опубликовано: 10.11.2010 Бюл. № 31

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: SU 1468017 A1, 30.09.1994. RU 2192501 C2, 10.11.2002. RU 2226227 C1, 27.03.2004. RU 2033474 C1, 20.04.1995. US 4895765 A, 23.01.1990. EP 0418905 A2, 27.03.1991. WO 9313238 A, 08.07.1993.

Адрес для переписки:

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

(72) Автор(ы):

Смыслов Анатолий Михайлович (RU),
Смыслова Марина Константиновна (RU),
Мингажев Аскар Джамилевич (RU),
Дыбленко Юрий Михайлович (RU),
Селиванов Константин Сергеевич (RU),
Гордеев Вячеслав Юрьевич (RU),
Дыбленко Михаил Юрьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

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

(54) СПОСОБ НАНЕСЕНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ

(57) Реферат:

Изобретение относится к способу нанесения ионно-плазменного покрытия и может быть применено в машиностроении, преимущественно для ответственных деталей, например, рабочих и направляющих лопаток турбомашин с износ-, коррозионно- и эрозийноустойчивым покрытием. Способ включает размещение деталей на приспособлении в вакуумной камере, приложение к деталям отрицательного электрического потенциала, ионную очистку поверхности деталей и нанесение на них покрытия электродуговым испарением материалов. Возбуждают и поддерживают дугу

между анодом и, по крайней мере одним, плоским длинномерным охлаждаемым катодом длиной L путем попеременного подключения его противоположных торцов к источникам электрического питания. В процессе нанесения покрытия частоту f попеременного подключения противоположных торцов катода выбирают в зависимости от продольного размера зоны испарения из условия: $f = v/L$, где v - скорость перемещения области катодного пятна под действием электромагнитного поля тока дуги. В результате достигается высокое качество наносимого покрытия на деталях сложной формы. 26 з.п. ф-лы, 2 табл.

RU 2 403 316 C2

RU 2 403 316 C2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(51) Int. Cl.
C23C 14/48 (2006.01)
C23C 30/00 (2006.01)
C23C 14/00 (2006.01)
B82B 3/00 (2006.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(21), (22) Application: **2008118953/02, 13.05.2008**

(24) Effective date for property rights:
13.05.2008

(43) Application published: **20.11.2009**

(45) Date of publication: **10.11.2010 Bull. 31**

Mail address:

**450039, Respublika Bashkortostan, g.Ufa, ul.
Sel'skaja-Bogorodskaja, 2, a/ja 66, OOO "NPP
Uralaviaspetstekhnologija"**

(72) Inventor(s):

**Smyslov Anatolij Mikhajlovich (RU),
Smyslova Marina Konstantinovna (RU),
Mingazhev Askar Dzhamilevich (RU),
Dyblenko Jurij Mikhajlovich (RU),
Selivanov Konstantin Sergeevich (RU),
Gordeev Vjacheslav Jur'evich (RU),
Dyblenko Mikhail Jur'evich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju
"Nauchno-proizvodstvennoe predpriyatie
"Uralaviaspetstekhnologija" (RU)**

(54) ION-PLASMA COATING APPLICATION METHOD

(57) Abstract:

FIELD: metallurgy.

SUBSTANCE: method involves arrangement of parts on the device in vacuum chamber, application of negative electrical potential to parts, ionic cleaning of parts surface and application of coating to them by means of electric arc evaporation of materials. Arc is excited and kept between anode and at least one flat long cooled cathode L long by alternating connection of its opposite edges to

electric power supplies. Frequency f of alternating connection of opposite edges of cathode is chosen during coating application depending on longitudinal size of evaporation zone from the condition: $f = v/l$, where v - movement speed of cathode spot area under influence of electromagnetic arc current field.

EFFECT: high quality of applied coating on parts of composite shape.

27 cl, 1 ex, 2 tbl

Изобретение относится к технике вакуумного нанесения износо-, коррозионно- и эрозионностойких ионно-плазменных покрытий и может быть применено в машиностроении, преимущественно для ответственных деталей, например, рабочих и направляющих лопаток турбомашин.

Новый, более высокий уровень функциональных свойств лопаток ГТД и ГТУ определяется, главным образом, характеристиками их рабочих поверхностей. Как показывает практика развития техники и технологий в этой области, наиболее эффективным методом их обеспечения являются покрытия с заданным составом и свойствами, наиболее перспективным и эффективным процессом нанесения покрытий являются ионно-плазменные способы нанесения покрытий в вакууме. Эти способы имеют ряд существенных преимуществ перед другими известными способами нанесения покрытий.

Известен способ вакуумно-плазменного нанесения покрытий, включающий размещение изделий на приспособлении в вакуумной камере, приложении к приспособлению электрического смещения, электродуговое испарение металлического катода, формирование на поверхности изделий слоя покрытия (а.с. 2073743, С23С 14/00, 14/32, 20.05.92. Способ нанесения покрытий в вакууме и устройство для его осуществления).

Известен способ ионно-плазменного нанесения покрытий, включающий размещение изделий в вакуумной камере, подачу на них напряжения смещения, зажигание дугового разряда, очистку и разогрев изделия ионами испаряемого материала катода до температуры конденсации покрытия, подачи в камеру газа-реагента, снижения напряжения (а.с. 2061788, С23С 14/34, 09.03.93. Способ нанесения покрытий в вакууме).

Известен также способ нанесения покрытий на лопатки турбомашин, включающий осаждение в вакууме на поверхности пера лопатки конденсированного покрытия (патент РФ №2165475, С23С 14/16.30/00, С22С 19/05, 21/04, 20.04.2001).

Наиболее близким техническим решением, выбранным в качестве прототипа, является способ нанесения ионно-плазменного покрытия, размещения деталей на приспособлении в вакуумной камере, приложения к деталям электрического смещения, ионной очистки поверхности деталей и нанесения на них покрытия электродуговым испарением материалов путем возбуждения и поддержания дуги между анодом и, по крайней мере одним, плоским длинномерным охлаждаемым катодом длиной L путем попеременного подключения его противоположных торцов к источникам электрического питания (а.с. №1468017, МПК 5 С23С 14/48, БИ № 18, 1994 г.).

Недостатками известных способов являются низкое качество покрытий на деталях сложной конфигурации из-за невозможности управления положением зоны испарения материала. В связи с тем, что детали, имеющие сложную конфигурацию, например, лопатки ГТД, требуют оптимизации свойств покрытий (в том числе, и по толщине) на различных участках поверхности. В то же время известные способы нанесения покрытий позволяют производить только равномерное испарение материала со всей поверхности катода, без учета необходимости обеспечения оптимальных количеств испаряемого материала по длине катода при нанесении на детали сложной формы.

Техническим результатом предлагаемого изобретения является повышение качества покрытий на деталях сложной формы за счет обеспечения возможности управления положением зоны испарения материала с поверхности катода.

Технический результат достигается тем, что в способе нанесения ионно-

плазменного покрытия, включающем размещение деталей на приспособлении в вакуумной камере, приложение к деталям отрицательного электрического смещения, ионную очистку поверхности деталей и нанесение на них покрытия электродуговым испарением материалов путем возбуждения и поддержания дуги между анодом и, по крайней мере одним, плоским длинномерным охлаждаемым катодом длиной L путем попеременного подключения его противоположных торцов к источникам электрического питания, в отличие от прототипа, в процессе нанесения покрытия частоту f попеременного подключения противоположных торцов катода выбирают в зависимости от продольного размера зоны испарения l из условия:

$$f=v/l, \text{ при } L \geq l,$$

где: v - скорость перемещения области катодного пятна под действием электромагнитного поля тока дуги.

Технический результат достигается также тем, что в способе нанесения ионно-плазменного покрытия дополнительно производят перемещение зоны испарения длиной l вдоль катода со скоростью $V_{з.исп.}$, за счет задания разницы ΔS величин прямого $S_{пр.}$ и обратного $S_{обр.}$ перемещения области катодного пятна из соотношения:

$$V_{з.исп.} = \Delta S / T_{пер.пят} = (S_{пр.} - S_{обр.}) / T_{пер.пят},$$

где: $T_{пер.пят.}$ - время перемещения зоны испарения за один цикл на величину $\Delta S = (S_{пр.} - S_{обр.})$.

Технический результат достигается также тем, что в способе нанесения ионно-плазменного покрытия используют катоды с размерами в диапазонах: длина - от 80 мм до 3000 мм, ширина - от 30 до 500 мм, толщина - от 5 до 100 мм, при этом в качестве материала катодов могут быть использованы металлы, выбранные из элементов IV, V, VI групп Периодической таблицы и Al, или металлы: Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu, Ni, Co, Cr, Al, Y и/или сплавы на основе указанных металлов.

Технический результат достигается также тем, что в способе нанесения ионно-плазменного покрытия используют периферийное расположение катодов, причем нанесение покрытия производят в среде реакционного газа, а в качестве реакционного газа могут использовать азот при давлении $10^{-2} - 5 \cdot 10^{-4}$ мм.

Технический результат достигается также тем, что в способе нанесения ионно-плазменного покрытия перед нанесением покрытия поверхность детали подвергают ионно-имплантационной обработке с постимплантационным отжигом, причем имплантацию ионов легирующих элементов производят при энергии ионов 0,2-300 кэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см², а в качестве легирующих элементов используют ионы Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацию, а имплантацию и постимплантационный отжиг производят с последующим нанесением покрытия в одном вакуумном объеме за один технологический цикл.

Технический результат достигается также тем, что в способе нанесения ионно-плазменного покрытия, перед нанесением покрытия поверхность детали подвергают ионно-имплантационной обработке с постимплантационным отжигом, причем имплантацию ионов легирующих элементов производят при энергии ионов 0,2-300 кэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см², а в качестве легирующих элементов используют ионы Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацию, а имплантацию и постимплантационный отжиг производят с последующим нанесением покрытия в одном вакуумном объеме за один технологический цикл.

Технический результат достигается также тем, что в способе нанесения ионно-плазменного покрытия перед нанесением покрытия поверхность детали подвергают

ионно-имплантационной обработке с постимплантационным отжигом, причем имплантацию ионов легирующих элементов производят при энергии ионов 0,2-300 кэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см², а в качестве легирующих элементов используют ионы Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацию, а имплантацию и постимплантационный отжиг производят с последующим нанесением покрытия в одном вакуумном объеме за один технологический цикл.

Технический результат достигается также тем, что в способе нанесения ионно-плазменного покрытия в качестве детали используют лопатку турбомашин.

Технический результат достигается также тем, что в способе нанесения ионно-плазменного покрытия перед нанесением покрытия могут проводить электролитно-плазменной обработкой полирование поверхности пера лопатки, покрытие формируют многослойным, чередуя слои нитридов Me-N, карбидов Me-C и карбо-нитридов Me-NC, с металлами, где N - азот, C - углерод, Me - металлы, причем толщины слоев многослойного покрытия выбирают из диапазонов: $\delta_{Me} =$ от 0,20 до 10 мкм, $\delta_{Me-N} = \delta_{Me-C} = \delta_{Me-NC} =$ от 0,10 до 6 мкм, где δ_{Me} - толщина слоя металла, δ_{Me-N} (δ_{Me-C} , δ_{Me-NC}) - толщина слоя нитрида (карбида, карбо-нитрида) металла.

Перечисленные существенные признаки предлагаемого изобретения позволяют достичь поставленной технической задачи - повысить качество покрытий на деталях сложной формы за счет обеспечения возможности управления положением зоны испарения материала с поверхности катода, поскольку при значительной протяженности и площади катодов обеспечивается целенаправленное испарение материала с заданной зоны катода и осаждается на требуемом участке поверхности детали.

Способ осуществляется следующим образом. Детали размещают на приспособлении в вакуумной камере, прикладывают к деталям отрицательный электрический потенциал смещения, производят ионную очистку поверхности деталей и производят нанесение на них покрытия электродуговым испарением материала катодов. Для нанесения покрытия используют протяженные катоды, работающие в режиме возвратно-поступательного движения области катодного пятна (зоны испарения) под воздействием электромагнитного поля, возникающего в результате протекания тока по катоду. Возвратно-поступательное движение области катодного пятна обеспечивается переключением контактов на концах протяженного катода. Испарение материала катода происходит за счет дуги, возбужденной между катодами и анодом. Причем при нанесении покрытия в зависимости от требуемого распределения его толщины на различных участках поверхности детали, имеющей сложную конфигурацию, производят регулирование скорости и координаты перемещения зоны испарения материала на поверхности катода.

Обеспечение координаты зоны испарения материала производят подбором частоты f попеременного подключения противоположных торцов катода. Чем больше частота f , тем меньше продольный размер l зоны испарения. В зависимости от требуемого размера зоны испарения рассчитывают частоту переключений из условия:

$$f = v/l, \text{ при } L \geq l, \text{ или } l = v/f,$$

где: v - скорость перемещения области катодного пятна под действием электромагнитного поля тока дуги (средняя величина v составляет от 8 до 10 м/с).

Для обеспечения перемещение зоны испарения длиной l вдоль катода со скоростью $V_{з.исп.}$, задают разницу ΔS величин прямого $S_{пр}$ и обратного $S_{обр}$ перемещения области катодного пятна из соотношения:

$$V_{з.исп.} = \Delta S / T_{пер.пят.} = (S_{пр.} - S_{обр.}) / T_{пер.пят.}$$

где: $T_{\text{пер.пят.}}$ - время перемещения зоны испарения за один цикл на величину $\Delta S = (S_{\text{пр.}} - S_{\text{обр.}})$.

Для обеспечения возможности движения области испарения материала катода используют катоды с размерами в диапазонах: длина - от 80 мм до 3000 мм, ширина - от 30 до 500 мм, толщина - от 5 до 100 мм. При этом при изменении площади катода используют конструкции катодов и режимы испарения материалов, определяемых «ноу-хау», которые позволяют достичь для конкретных материалов катодов и заданных свойствах покрытий оптимальные результаты.

Для обеспечения таких эксплуатационных свойств, как износостойкость при абразивно-эрозионном, капельно-ударном, кавитационном и других видах разрушающего воздействия агрессивной среды и высокоскоростных потоков на детали машин, в частности на лопатки турбомашин, в качестве материала катодов используют металлы, выбранные из элементов IV, V, VI групп Периодической таблицы и Al, а также их сплавы. Кроме того, могут применяться следующие металлы (часть из которых является представителями вышеприведенной группы элементов IV, V, VI групп Периодической таблицы): Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu, Ni, Co, Cr, Al, Y и/или сплавы на основе указанных металлов.

В зависимости от конкретных целей, конфигурации и размера деталей, плотности их расположения в вакуумной камере, а также от конструкции вакуумной установки для нанесения покрытия могут быть использованы следующие варианты расположения катодов: периферийное, центральное, периферийное и центральное, периферийное, центральное и верхнее.

Для обеспечения качественной обработки деталей, позволяющей повысить их эксплуатационные свойства, перед нанесением покрытия поверхности детали могут подвергаться ионно-имплантационной обработке с постимплантационным отжигом, причем, имплантацию ионов легирующих элементов производят при энергии ионов 0,2-300 кэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см², а в качестве легирующих элементов используют ионы Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацию, а имплантацию и постимплантационный отжиг производят с последующим нанесением покрытия в одном вакуумном объеме за один технологический цикл. Кроме того, для этих же целей, перед нанесением покрытия электролитно-плазменной обработкой производят полирование поверхности детали, причем покрытие формируют многослойным, чередуя слои нитридов Me-N, карбидов Me-C, боридов Me-B и карбо-нитридов Me-NC, с металлами, где N - азот, C - углерод, B - бор. Me - металлы, причем толщины слоев многослойного покрытия выбирают из диапазонов: δ_{Me} = от 0,20 до 10 мкм, $\delta_{\text{Me-N}} = \delta_{\text{Me-C}} = \delta_{\text{Me-B}} = \delta_{\text{Me-NC}}$ = от 0,10 до 6 мкм, где δ_{Me} - толщина слоя металла, $\delta_{\text{Me-N}}$ ($\delta_{\text{Me-C}}$, $\delta_{\text{Me-B}}$, $\delta_{\text{Me-NC}}$) - толщина слоя нитрида (карбида, борида, карбо-нитрида) металла.

Необходимо отметить, что вышеприведенные существенные признаки предлагаемого способа в сочетании с существенными признаками, определяющими режимы распыления материалов катодов, приведенными в п.1 формулы предлагаемого изобретения, позволяют достичь нового неожиданного эффекта по сравнению с неуправляемым (как это представлено в прототипе способа) положением и скоростью перемещения области испарения. Это объясняется тем, что качественные характеристики покрытия зависят от конкретных условий их формирования, в частности, изменения плотности потока в той или иной области осаждения. Плотность потока, также как и ряд других параметров процесса, например температура, электрический потенциал детали и др. в сочетании с параметрами подготовки

поверхности (или поверхностного слоя детали), как это широко известно [например, 1. О.И.Обрезков и др. Исследование TiN покрытий, осажденных в сопровождении пучка высокоэнергетических ионов. - Известия АН. Серия физическая, 2002, т.66, №8, с.1199-1203. 2. Волин Э.М. Ионно-плазменные методы получения износостойких покрытий (Обзор зарубежной литературы за 1979-1983 гг.) // Технология легких сплавов. (№10. (1984), 3. Булатов В.П. и др. Влияние режимов вакуумно-дугового напыления на износостойкость карбидо-титановых покрытий. // Трение и износ.(1994. (15. (№б) С.1009)], изменяют структуру и свойства покрытия и детали. Особенно это важно при таких сложных конфигурациях детали, как, например, лопатка турбомшины. Поэтому приведенные существенные признаки предлагаемого способа, а конкретнее их совокупность в том или ином варианте, позволяют достичь технического результата предлагаемого изобретения, которым является повышение качества покрытий на деталях сложной формы за счет обеспечения возможности управления положением зоны испарения материала с поверхности катода.

Пример.

Были изготовлены две партии образцов из хромистой стали марки 20X13 по прототипу (а.с. №1468017, МПК 5 C23C 14/48, БИ № 18, 1994 г.) и вариантам предлагаемого способа, с последующей оценкой их эксплуатационных свойств.

Первая партия образцов (А) изготавливалась по способу-прототипу следующим образом. Сформированные механообработкой образцы их подвергались защитно-упрочняющей обработке по схеме: полирование поверхности методом электролитно-плазменной обработки (обрабатываемую деталь из хромистой стали марки 20X13 погружали в ванну с водным раствором электролита, прикладывали к детали положительное напряжение, а к электролиту - отрицательное. Детали обрабатывались в среде электролита на основе водного раствора сульфата аммония концентрацией 0,8...3,4%. Производилось циркуляционное охлаждение электролита (поддерживалась средняя температура процесса 50...65°C) до средней величины микронеровностей после обработки $R_a=0,06$ мкм, затем имплантация ионов Yb с энергией $E=0,2-300$ кэВ и дозой облучения $D=10^{10}$ до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см², при плотности ионного тока 0,8-10 мА/см², с последующим постимплантационным отжигом и нанесением многослойного покрытия по двум вариантам с протяженного катода размерами: длина катода $L=1200$ мм, ширина катода $b=200$ мм, начальная толщина $m=40$ мм, при неуправляемом перемещении зоны испарения по катоду. Нанесение покрытия: вариант «А₁» - многослойное покрытие из чередующихся слоев Ti и соединений Ti с азотом - TiN. $\delta_{Ti}=0,20...10$ мкм, $\delta_{Ti-N}=0,10...6$ мкм, общая толщина покрытия 25 мкм; вариант «А₂» - многослойное покрытие из чередующихся слоев Ti и соединений Ti с азотом и углеродом - TiNC. $\delta_{Ti}=0,20...10$ мкм, δ_{Ti-NC} 0,10...6 мкм, общая толщина покрытия 25 мкм.

Вторая партия образцов (состоящая из групп образцов, обработанных, согласно предлагаемому способу по различным вариантам: В, С, D, E) изготавливалась следующим образом. Сформированные механообработкой детали подвергались защитно-упрочняющей обработке по схеме: полирование поверхности методом электролитно-плазменной обработки (обрабатываемую деталь из хромистой стали марки 20X13 погружали в ванну с водным раствором электролита, прикладывали к детали положительное напряжение, а к электролиту - отрицательное. Детали обрабатывались в среде электролита на основе водного раствора сульфата аммония концентрацией 0,8...3,4%. Производилось циркуляционное охлаждение электролита (поддерживалась средняя температура процесса 50...65°C) до средней величины

микронеровностей после обработки $Ra=0,06$ мкм, затем имплантация ионов с энергией $E=0,2-300$ кэВ и дозой облучения $D=10^{10}$ до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см², при плотности ионного тока $0,8-10$ мА/см², с последующим постимплантационным отпуском в вакууме при температуре 400°C в течение $1,5$ ч, для следующих групп образцов «В». При длине катода $L=1200$ мм, ширине катода $b=200$ мм, начальной толщине $m=40$ мм, при попеременном подключении его противоположных торцов к источникам электрического питания с частотой $f=v/l=10000$ мм/с: 200 мм = 50 с⁻¹. (При $v=10000$ мм/с; $l=200$ мм; $L \geq l$, т.е. 1200 мм > 200 мм) добивались перемещения зоны испарения длиной l вдоль катода со скоростью $V_{з.исп.}$, за счет задания разницы ΔS величин прямого $S_{пр.}$ и обратного $S_{обр.}$ перемещения области катодного пятна, согласно соотношению: $V_{з.исп.}=\Delta S/T_{пер.пят.}=(S_{пр.}-S_{обр.})/T_{пер.пят.}=(210-200):0,02=500$ мм/с, (при $T_{пер.пят.}=l/v=200$ мм: 10000 мм/с = $0,02$ с). Имплантация ионами Yb. Нанесение покрытия: вариант «В₁» - многослойное покрытие из чередующихся слоев Ti и соединений Ti с азотом - TiN. $\delta_{Ti}=0,20 \dots 10$ мкм, $\delta_{Ti-N}=0,10 \dots 6$ мкм, общая толщина покрытия 25 мкм; вариант «В₂» - многослойное покрытие из чередующихся слоев Ti и соединений Ti с азотом и углеродом - TiNC. $\delta_{Ti}=0,20 \dots 10$ мкм, $\delta_{Ti-NC}=0,10 \dots 6$ мкм, общая толщина покрытия 25 мкм; «С». При длине катода $L=1000$ мм, ширине катода $b=180$ мм, начальной толщине $m=50$ мм, при попеременном подключении его противоположных торцов к источникам электрического питания с частотой $f=v/l=10000$ мм/с: 100 мм = 100 с⁻¹. (При $v=10000$ мм/с; $l=100$ мм; $L \geq l$, т.е. 1000 мм > 100 мм) добивались перемещения зоны испарения длиной l вдоль катода со скоростью $V_{з.исп.}$, за счет задания разницы ΔS величин прямого $S_{пр.}$ и обратного $S_{обр.}$ перемещения области катодного пятна, согласно соотношению: $V_{з.исп.}=\Delta S/T_{пер.пят.}=(S_{пр.}-S_{обр.})/T_{пер.пят.}=(120-100):0,01=2000$ мм/с, (при $T_{пер.пят.}=l/v=100$ мм: 10000 мм/с = $0,01$ с). Чередующаяся имплантация ионами N и Ti. Длительность имплантационного импульса для каждого вида иона $10-12$ с. Пауза между импульсами $2-4$ с. Нанесение покрытия: вариант «С₁» - многослойное покрытие из чередующихся слоев Ti и соединений Ti с азотом - TiN. $\delta_{Ti}=0,20 \dots 10$ мкм, $\delta_{Ti-N}=0,10 \dots 6$ мкм, общая толщина покрытия 25 мкм; вариант «С₂» - многослойное покрытие из чередующихся слоев Ti и соединений Ti с бором - TiB. $\delta_{Ti}=0,20 \dots 10$ мкм, $\delta_{Ti-NC}=0,10 \dots 6$ мкм, общая толщина покрытия 25 мкм «D». При длине катода $L=300$ мм, ширине катода $b=200$ мм, начальной толщине $m=40$ мм, при попеременном подключении его противоположных торцов к источникам электрического питания с частотой $f=v/l=9000$ мм/с: 60 мм= 150 с⁻¹. При $v=9000$ мм/с; $l=60$ мм; $L \geq l$, т.е. 300 мм > 60 мм, добивались перемещения зоны испарения длиной l вдоль катода со скоростью $V_{з.исп.}$, за счет задания разницы ΔS величин прямого $S_{пр.}$ и обратного $S_{обр.}$ перемещения области катодного пятна, согласно соотношению: $V_{з.исп.}=\Delta S/T_{пер.пят.}=(S_{пр.}-S_{обр.})/T_{пер.пят.}=(70-60):0,007=1500$ мм/с, (при $T_{пер.пят.}=l/v=60$ мм: 9000 мм/с = $0,007$ с) имплантация ионами N. Длительность имплантационного импульса иона $10-12$ с. Пауза между импульсами $2-4$ с. Нанесение покрытия: вариант «D₁» - многослойное покрытие из чередующихся слоев Zr и соединений Zr с азотом - Zr N. $\delta_{Zr}=0,20 \dots 10$ мкм, $\delta_{Zr-N}=0,10 \dots 6$ мкм, общая толщина покрытия 25 мкм; вариант «D₂» - многослойное покрытие из чередующихся слоев Ti и соединений Ti с азотом и углеродом - TiNC. $\delta_{Ti}=0,20 \dots 10$ мкм, $\delta_{Ti-NC}=0,10 \dots 6$ мкм, общая толщина покрытия 25 мкм «Е». При длине катода $L=80$ мм, ширине катода $b=30$ мм, начальной толщине $m=100$ мм, при попеременном подключении его противоположных торцов к источникам электрического питания с частотой $f=v/l=8000$

мм/с: $40 \text{ мм} = 200 \text{ с}^{-1}$. При $v=8000 \text{ мм/с}$; $l=40 \text{ мм}$; $L \geq l$, т.е. $80 \text{ мм} > 40 \text{ мм}$, добивались перемещения зоны испарения длиной l вдоль катода со скоростью $V_{з.исп.}$, за счет задания разницы Δ величин прямого $S_{пр.}$ и обратного $S_{обр.}$ перемещения области катодного пятна, согласно соотношению: $V_{з.исп.} = \Delta S / T_{пер.пят.} = (S_{пр.} - S_{обр.}) / T_{пер.пят.} = (50-40) : 0,005 = 2000 \text{ мм/с}$, (при $T_{пер.пят.} = l/v = 40 \text{ мм} : 8000 \text{ мм/с} = 0,005 \text{ с}$).
 Чередующаяся имплантация ионами N, Ti, N и C. Длительность имплантационного импульса для каждого вида иона 10-12 с. Пауза между импульсами 2-4 с. Нанесение покрытия: вариант «E₁» - многослойное покрытие из чередующихся слоев Zr и соединений Zr с азотом - ZrN. $\delta_{Zr} = 0,20 \dots 10 \text{ мкм}$, $\delta_{Zr-N} = 0,10 \dots 6 \text{ мкм}$, общая толщина покрытия 25 мкм; вариант «E₂» - многослойное покрытие из чередующихся слоев Ti и соединений Ti с азотом и углеродом - TiNC. $\delta_{Ti} = 0,20 \dots 10 \text{ мкм}$, $\delta_{Ti-NC} = 0,10 \dots 6 \text{ мкм}$, общая толщина покрытия 24 мкм;

Испытания образцов производились в условиях ускоренного коррозионного процесса под влиянием ионов хлора при высоких и быстроменяющихся температурах и относительной влажности воздуха, (условия испытаний были выбраны гарантированно жестче, чем реальные условия эксплуатации при сохранении реальных механизмов коррозии).

В процессе испытаний производилось взвешивание образцов на аналитических весах модели ВЛР-200: в исходном состоянии; после испытаний: с продуктами коррозии на поверхности образцов; после удаления коррозионного налета химическим способом.

Кроме этого проводилась оценка глубины коррозионных повреждений общепринятым металлографическим методом на наклонных шлифах с углом наклона, равным 3. Результаты коррозионных испытаний приведены в табл.1 и 2.

| Коррозионная стойкость. | | | | Таблица 1 |
|-------------------------|---|--|-----------------|-----------|
| Вариант | Результаты внешнего осмотра | | Потеря массы, г | |
| | До удаления продуктов коррозии | После удаления продуктов коррозии | | |
| A ₁ | Продукты коррозии по всему периметру образца | Точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении) | 0,1040 | |
| A ₂ | Продукты коррозии по всему периметру образца | Точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении) | 0,0876 | |
| B ₁ | Продукты коррозии по всему периметру образца | Точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении) | 0,0646 | |
| B ₂ | Продукты коррозии по периметру образца | Отдельные точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении) | 0,0530 | |
| C ₁ | Продукты коррозии по отдельным участкам образца | Редко расположенные мелкие точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении) | 0,0428 | |
| C ₂ | Продукты коррозии по отдельным участкам образца | Редко расположенные мелкие точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении) | 0,0352 | |
| D ₁ | Продукты коррозии по отдельным участкам образца | Редко расположенные мелкие точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении) | 0,0599 | |
| D ₂ | Продукты коррозии по отдельным участкам образца | Редко расположенные мелкие точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении) | 0,0387 | |
| E ₁ | Продукты коррозии по отдельным участкам образца | Редко расположенные мелкие точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении) | 0,0353 | |
| E ₂ | Продукты коррозии по отдельным участкам образца | Редко расположенные мелкие точечные повреждения по всей поверх. образца (при 4-х крат. увеличении) | 0,0387 | |

| Оценка глубины коррозионных повреждений | | | | Таблица 2 |
|---|-----------------------|-----------------------------------|--|-----------|
| Вариант | Толщина покрытия, мкм | Глубина повреждения покрытия, мкм | Глубина повреждения основного материала, мкм | |
| | | | | |

| | | | | |
|----|----------------|--------|--------------------------------|-----|
| | A ₁ | 25 мкм | Повреждение покрытия до 18 мкм | нет |
| | A ₂ | | Повреждение покрытия до 16 мкм | нет |
| 5 | B ₁ | 25 мкм | Повреждение покрытия до 7 мкм | нет |
| | B ₂ | | Повреждение покрытия до 7 мкм | нет |
| | C ₁ | | Повреждение покрытия до 8 мкм | нет |
| | C ₂ | | Повреждение покрытия до 7 мкм | нет |
| | D ₁ | | Повреждение покрытия до 7 мкм | нет |
| 10 | D ₂ | | Повреждение покрытия до 9 мкм | нет |
| | E ₁ | | Повреждение покрытия до 8 мкм | нет |
| | E ₂ | | Повреждение покрытия до 10 мкм | нет |

Таким образом, результаты сравнительных испытаний показали, что наилучшие эксплуатационные свойства образцов обеспечивает предлагаемый способ нанесения ионно-плазменного покрытия (табл. 1 и 2).

Были также проведены испытания на циклическую прочность образцов в условиях эксплуатационных температур (при 300-450°С) на воздухе. В результате эксперимента было установлено следующее: условный предел выносливости ($\sigma-1$) образцов составляет:

Вариант А (по способу-прототипу):

A₁) в среднем 280-290 МПа;

A₂) в среднем 290-300 МПа;

Вариант В (по предлагаемому способу):

B₁) в среднем 330-340 МПа;

B₂) в среднем 335-350 МПа;

Вариант С (по предлагаемому способу):

C₁) в среднем 340-250 МПа;

C₂) в среднем 345-355 МПа;

Вариант D (по предлагаемому способу):

D₁) в среднем 350-355 МПа;

D₂) в среднем 350-360 МПа;

Вариант E (по предлагаемому способу):

E₁) в среднем 350-360 МПа;

E₂) в среднем 350-365 МПа.

Сравнение результатов испытаний по вариантам А и В (которые при прочих равных условиях отличались лишь наличием процесса управления перемещением зоны испарения материала) показывает, что при варианте В (предлагаемый способ) эксплуатационные свойства выше, чем при варианте А (способ-прототип): коррозионная стойкость выше более чем в два раза, а циклическая прочность - приблизительно в 1,2 раза.

Повышение коррозионной стойкости и предела выносливости у образцов, обработанных по предлагаемому способу, указывает на то, что при применении одного из следующих приемов нанесения покрытия: обеспечение в процессе нанесения покрытия частоты f попеременного подключения противоположных торцов катода в зависимости от продольного размера зоны испарения l из условия: $f=v/l$, при $L \geq l$, (где: v - скорость перемещения области катодного пятна под действием электромагнитного поля тока дуги); а также перемещение зоны испарения длиной l вдоль катода со скоростью $V_{з.исп.}$, за счет задания разницы ΔS величин прямого $S_{пр}$ и обратного $S_{обр.}$ перемещения области катодного пятна из соотношения: $V_{з.исп.} = \Delta S / T_{пер.пят} = (S_{пр.} - S_{обр.}) / T_{пер.пят.}$ (где: $T_{пер.пят.}$ - время перемещения зоны испарения за один цикл на

величину $\Delta S=(S_{\text{пр.}}-S_{\text{обр.}})$); использование катодов размерами, выбранными из диапазонов: длина (L) - от 80 мм до 3000 мм, ширина - от 30 до 500 мм, толщина - от 5 до 100 мм; использование в качестве материала катодов металлов, выбранных из элементов IV, V, VI групп Периодической таблицы и Al, или металлов: Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu, или Ni, Co, Cr, Al, Y и/или сплавов на основе указанных металлов; использование периферийного или центрального или периферийного и центрального или периферийного, центрального и верхнего расположения катодов; нанесение покрытия в среде реакционного газа; использование в качестве реакционного газа азота при давлении 10^{-2} - $5 \cdot 10^{-4}$ мм; осуществление перед нанесением покрытия ионно-имплантационной обработки поверхности детали с последующим постимплантационным отжигом, причем производство имплантации ионов легирующих элементов при энергии ионов 0,2-300 кэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см², и использование в качестве легирующих элементов ионов Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинации, при проведении имплантации и постимплантационного отжига с последующим нанесением покрытия в одном вакуумном объеме за один технологический цикл; использование в качестве детали лопатки турбомашин; проведение полирования поверхности детали перед нанесением покрытия электролитно-плазменной обработкой, формирование многослойного покрытия, за счет чередования слоев нитридов Me-N, карбидов Me-C боридов Me-B и карбо-нитридов Me-NC, с металлами, где N - азот, C - углерод, B - бор, Me - металлы, причем толщины слоев многослойного покрытия выбирают из диапазонов: δ_{Me} = от 0,20 до 10 мкм, $\delta_{\text{Me-N}}=\delta_{\text{Me-C}}=\delta_{\text{Me-B}}=\delta_{\text{Me-NC}}$ = от 0,10 до 6 мкм, где δ_{Me} - толщина слоя металла, $\delta_{\text{Me-N}}$ ($\delta_{\text{Me-C}}$, $\delta_{\text{Me-B}}$, $\delta_{\text{Me-NC}}$) - толщина слоя нитрида (карбида, бориды, карбо-нитрида) металла, позволяют достичь технического результата заявляемого способа - повышения качества покрытий на деталях сложной формы за счет обеспечения возможности управления положением зоны испарения материала с поверхности катода.

Формула изобретения

1. Способ нанесения ионно-плазменного покрытия, включающий размещение деталей на приспособлении в вакуумной камере, приложение к деталям отрицательного электрического потенциала, ионную очистку поверхности деталей и нанесение на них покрытия, отличающийся тем, что нанесение покрытия осуществляют электродуговым испарением путем возбуждения и поддержания дуги между анодом и, по крайней мере, одним плоским длинномерным охлаждаемым катодом длиной L, при этом осуществляют попеременное подключение противоположных торцов катода к источникам электрического питания с частотой $f=v/l$, где: v - скорость перемещения области катодного пятна под действием электромагнитного поля тока дуги, равная (8-10) м/с, l - продольный размер зоны испарения, который выбирают из условия: $L \geq l$, и с обеспечением возвратно-поступательного перемещения зоны испарения.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что зону испарения длиной l перемещают вдоль катода со скоростью $V_{\text{з.исп}}=(S_{\text{пр}}-S_{\text{обр}})/T_{\text{пер.пят}}$, где $S_{\text{пр}}$ - величина прямого перемещения области катодного пятна, $S_{\text{обр}}$ - величина обратного перемещения области катодного пятна, $T_{\text{пер.пят}}$ - время перемещения зоны испарения за один цикл.

3. Способ по п.1, отличающийся тем, что используют катоды с размерами в диапазонах: длина (L) от 80 до 3000 мм, ширина от 30 до 500 мм, толщина от 5 до 100 мм.

4. Способ по п.2, отличающийся тем, что используют катоды с размерами в диапазонах: длина (L) от 80 до 3000 мм, ширина от 30 до 500 мм, толщина от 5 до 100 мм.

5. Способ по п.3, отличающийся тем, что используют катоды из металла, выбранного из элементов IV, V, VI групп Периодической таблицы и Al, или их сплавов.

6. Способ по п.3, отличающийся тем, что используют катоды из следующих металлов: Ti, Zr, Hf, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Al, La, Eu и/или сплава на основе указанных металлов.

10. 7. Способ по п.3, отличающийся тем, что используют катоды из металлов: Ni, Co, Cr, Al, Y и/или сплава на основе указанных металлов.

8. Способ по п.1, отличающийся тем, что покрытие наносят при периферийном расположении катодов.

15. 9. Способ по п.1, отличающийся тем, что покрытие наносят при центральном расположении катодов.

10. 10. Способ по п.1, отличающийся тем, что покрытие наносят при периферийном и центральном расположении катодов.

20. 11. Способ по п.1, отличающийся тем, что покрытие наносят при периферийном, центральном и верхнем расположении катодов.

12. Способ по любому из пп.1-11, отличающийся тем, что нанесение покрытия производят в среде реакционного газа.

25. 13. Способ по п.12, отличающийся тем, что в качестве реакционного газа используют азот при давлении 10^{-2} - $5 \cdot 10^{-4}$ мм.

30. 14. Способ по любому из пп.1-11, 13, отличающийся тем, что перед нанесением покрытия поверхность детали подвергают ионно-имплантационной обработке с постимплантационным отжигом, причем производят имплантацию ионов легирующих элементов при энергии ионов 0,2-300 кэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см², и в качестве легирующих элементов используют ионы Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацию, при этом имплантацию и постимплантационный отжиг производят с последующим нанесением покрытия в одном вакуумном объеме за один технологический цикл.

35. 15. Способ по п.12, отличающийся тем, что перед нанесением покрытия поверхность детали подвергают ионно-имплантационной обработке с постимплантационным отжигом, причем производят имплантацию ионов легирующих элементов при энергии ионов 0,2-300 кэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см², и в качестве легирующих элементов используют ионы Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинацию, при этом имплантацию и постимплантационный отжиг производят с последующим нанесением покрытия в одном вакуумном объеме за один технологический цикл.

45. 16. Способ по любому из пп.1-11, 13, 15, отличающийся тем, что покрытие наносят на лопатку турбомашин.

17. Способ по п.15, отличающийся тем, что покрытие наносят на лопатку турбомашин.

18. Способ по п.12, отличающийся тем, что покрытие наносят на лопатку турбомашин.

50. 19. Способ по п.14, отличающийся тем, что покрытие наносят на лопатку турбомашин.

20. Способ по любому из пп.1-11,13, отличающийся тем, что перед нанесением покрытия производят полирование поверхности детали электролитно-плазменной

