

УКРАЇНА



# ПАТЕНТ

НА ВІНАХІД

№ 110895

**ЕРОЗІЙНОСТІЙКЕ БАГАТОШАРОВЕ ПОКРИТТЯ ДЛЯ  
ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН І СПОСІБ ЙОГО ОТРИМАННЯ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи  
25.02.2016.

В.о. Голови Державної служби  
інтелектуальної власності України

А.А.Малиш



C23C 14/00  
 C23C 14/02 (2006.01)  
 C23C 14/06 (2006.01)  
 C23C 14/14 (2006.01)  
 C23C 14/48 (2006.01)

(21) Номер заявки: а 2014 14065

(72) Винахідники: Салапович Олексій

(22) Дата подання заявки: 29.12.2014

Салапович Олексій  
 Владиславович, UA

(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 25.02.2016

Салапович Владислав  
 Вікторович, UA

(41) Дата публікації відомостей про заявку та номер бюлетеня: 10.04.2015, Бюл.№ 7

(73) Власники: Салапович Олексій  
 Владиславович,  
 вул. Вальтера, 21-а, кв. 124, м. Харків, 61108, UA

(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: 25.02.2016, Бюл. № 4

Салапович Владислав  
 Вікторович,  
 вул. Вальтера, 21-а, кв. 124, м. Харків, 61108, UA

(54) Назва винаходу:

**ЕРОЗІЙНОСТІКЕ БАГАТОШАРОВЕ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН І СПОСІБ ЙОГО ОТРИМАННЯ**

(57) Формула винаходу:

1. Ерозійностікє багатшарове покриття для лопаток турбомашин, що містить металевий прошарок та шари титану і нітриду титану, якє відрізняється тим, що певинний шар з титану виконано на поверхні основного матеріалу, другий шар виконано у складі шарів титану і нітриду титану, що чергуються.

2. Ерозійностікє багатшарове покриття за п. 1, якє відрізняється тим, що другий шар виконано у складі шарів титану і нітриду титану, що чергуються, з періодом 10 нм, що повторюється, і товщиною окремих шарів відповідно 2 нм і 8 нм.

3. Ерозійностікє багатшарове покриття за п. 2, якє відрізняється тим, що товщина прошарку титану вибрана в діапазоні від 3 до 5 мкм, а товщина другого шару вибрана в діапазоні від 10 до 15 мкм.

4. Спосіб отримання ерозійностікєго багатшарового покриття для лопаток турбомашин, що включає вакуумно-плазмовє нанесення металевого прошарку та шарів на основі нітриду титану, які формують при обертанні лопаток відносно власної осі, якій відрізняється тим, що вакуумно-плазмовому нанесенню металевого прошарку передують послідовно три етапи очищення поверхні, що включають обробку поверхні лопаток в плазмі тліючого розряду інертного газу аргону, обробку поверхні в високощільній плазмі двоступенєвого вакуумно-дугового розряду інертного газу аргону і останнє - іонну обробку металевими іонами.

5. Спосіб за п. 4, якій відрізняється тим, що процєси багатступенєвого іонно-плазмового очищення, наступного вакуумно-дугового осадження ерозійностікєго покриття, що містить шари на основі нітриду титану, і стабілізуючого відповідно до технологічного циклу.

6. Спосіб по п. 4, якій відрізняється тим, що в процєсі нанесення покриття здійснюють стабілізуючий відповідно шар кожні нанесенні 50 шарів при тій же температурі, без нанесення відповідно шарів.

7. Спосіб за п. 4, якій відрізняється тим, що проводення процєсу іонно-плазмового очищення та формування шарів з заданими періодами, що повторюються, і товщинами окремих шарів при вакуум-дуговому осадженні захищеного ерозійностікєго покриття здійснюють програмно заданими циклограмами, що забезпечують програмно-синхронізованє керування регуляторами тиску інертного та реакційного газів і електричними параметрами процєсу.

Служба інтелектуальної власності України  
вул. Банкова, 11/13  
01024 Київ, Україна  
Тел: (044) 235-77-00  
Факс: (044) 235-77-01  
E-mail: oip@ukr.net

Державна служба інтелектуальної власності України  
Інформаційно-аналітичний відділ  
вул. Банкова, 11/13  
01024 Київ, Україна  
Тел: (044) 235-77-00  
Факс: (044) 235-77-01  
E-mail: oip@ukr.net

Державна служба інтелектуальної власності України  
Інформаційно-аналітичний відділ  
вул. Банкова, 11/13  
01024 Київ, Україна  
Тел: (044) 235-77-00  
Факс: (044) 235-77-01  
E-mail: oip@ukr.net

Пронумеровано, прошито металевими люверсами та скріплено печаткою  
2 арк.  
25.02.2016

Уповноважена особа



(підпис)



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **110895** (13) **C2**

(51) МПК (2016.01)

**C23C 14/00**

**C23C 14/02** (2006.01)

**C23C 14/06** (2006.01)

**C23C 14/14** (2006.01)

**C23C 14/48** (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД**

|   |   |
|---|---|
| <p>(21) Номер заявки: <b>а 2014 14065</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>29.12.2014</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: <b>25.02.2016</b></p> <p>(41) Публікація відомостей про заявку: <b>10.04.2015, Бюл.№ 7</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>25.02.2016, Бюл.№ 4</b></p> | <p>(72) Винахідник(и):<br/><b>Сагалович Олексій Владиславович (UA),<br/>Сагалович Владислав Вікторович (UA)</b></p> <p>(73) Власник(и):<br/><b>Сагалович Олексій Владиславович,<br/>вул. Вальтера, 21-а, кв. 124, м. Харків,<br/>61108 (UA),<br/>Сагалович Владислав Вікторович,<br/>вул. Вальтера, 21-а, кв. 124, м. Харків,<br/>61108 (UA)</b></p> <p>(74) Представник:<br/><b>Серюгіна Алла Сергіївна, реєстр. №63</b></p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:<br/>UA 74 749 C2, 16.01.2006<br/>UA 90 151 C2, 12.04.2010<br/>RU 63 004 U1, 10.05.2007<br/>RU 2 390 578 C2, 27.05.2010<br/>RU 2 376 398 C2, 20.12.2009<br/>RU 2009139921 A, 10.05.2011<br/>RU 2 437 963 C1, 27.12.2011<br/>GB 2 226 334 A, 27.06.1990<br/>JP 63-219566 A, 13.09.1988<br/>JP 04-297568 A, 21.10.1992<br/>US 6 797 335 B1, 28.09.2004<br/>US 2009/0123737 A1, 14.05.2009</p> |
|---|---|

**(54) ЕРОЗІЙНОСТІЙКЕ БАГАТОШАРОВЕ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН І СПОСІБ ЙОГО ОТРИМАННЯ**

**(57) Реферат:**

Винахід належить до галузі кольорової металургії та машинобудування, зокрема до способу отримання ерозійно-стійкого багатощарового покриття лопаток турбомашин, що включає вакуумно-плазмове нанесення металевого прошарку та шарів на основі нітридів титану, які формують при обертанні лопаток відносно власної осі, при цьому перед вакуумно-плазмовим нанесенням покриття виконують три етапи очищення поверхні лопатки, які включають обробку її в плазмі тліючого розряду інертного газу аргону, обробку поверхні у високощільній плазмі двоступеневого вакуумно-дугового розряду інертного газу аргону і останній етап - іонну обробку металевими іонами. Винахід забезпечує підвищення ерозійної стійкості лопаток турбомашин від сольової корозії, пилової та крапельно-ударної ерозії, підвищення ресурсу роботи одержуваних лопаток з багатощаровим покриттям та адгезії покриття до основи.

UA 110895 C2

UA 110895 C2

Винахід належить до галузі кольорової металургії та машинобудування, зокрема, до способів отримання іонно-плазмових покриттів з ерозійностійкими та зносостійкими властивостями шляхом вакуумно-дугового осадження.

Відомо, що конструкційні матеріали високонавантажених елементів машин, особливо, робочих лопаток парових турбін, а також компресорів газотурбінних двигунів (ТД) та газотурбінних установок (ТУ), в процесі експлуатації піддаються одночасній дії цілого комплексу руйнівних корозійно-ерозійних факторів в умовах газоаерозивного та волого-парового середовища при температурях до 500-540 °С, значних динамічних та статичних навантажень [Селєзнев Л.И., Рыженков В.А. Оценка долговечности инкубационного периода эрозийного износа. - Технология металлов, № 3, 2007].

Можливість суттєвого підвищення експлуатаційних властивостей конструкційних матеріалів, що використовують, практично вичерпані.

Відомо також, що найбільш ефективний шлях значного підвищення зносостійкості конструкційних матеріалів - використання захисних покриттів.

Відомо, що зносостійкість і корозійностійкість покриття може вважатися об'єктом корозійностійких шарів металів, що багаторазово перевіряються, вибрані з групи, що містить молібден, ніобій, тантал, вольфрам, хром, титан, цирконій, нікель або сплави на їх основі.

Наприклад, тришарове покриття, перший шар якого складає шар одного металу або суміші металів 1В або VІВ груп періодичної системи елементів Менделєєва, сформований в середовищі нейтрального газу, другий - в суміші нейтрального та реакційного газів, а третій - шар нітридів, карбідів, боридів або їх суміші [див. опис до патенту РФ 2161661, М. Кл. С23С 14/16, опубл. 10.01.2001]. Покриття містить шар із скандію, титану або рідкоземельних металів товщиною 0,02-0,08 мкм, кількість шарів може бути від 10 до 500, товщини шарів знаходяться у співвідношенні (0,02-5,0): (0,04-10): (0,1-12,5), а товщини перших двох шарів у співвідношенні 1,0: 2,0: 2,5.

Проведені іспити покриттів, що були одержані згідно зі згаданим вище патентом, показали підвищення корозійної та ерозійної стійкості титанових лопаток у порівнянні із стійкістю до корозії та ерозії лопаток без покриття, але низька адгезійна стійкість суттєво знижує експлуатаційну надійність виробів, що одержані з використанням названого вище покриття.

Відоме також покриття, стійке до ерозії, що містить твердий азотований шар, створений на поверхні основного матеріалу та щонайменше один твердий шар, отриманий методом РВД, створений на азотованому твердому шарі [див. опис до патентної заявки США № 2009/0123737, М.кл. С23С 14/06, 14/48, опубл. 14.05.2009 г.], в якому створені шари з нітридів хрому, титану та нікелю, що перевіряються з шарамі нітридів хром/алюміній, титан/алюміній, хром/титану.

Описане вище покриття покращує антиерозійні властивості поверхні, однак не завжди забезпечує необхідну ерозійну та корозійну стійкість робочих лопаток турбін при їх експлуатації в умовах волого-парової ерозії, внаслідок чого не завжди можна отримати конструкції важливі значення має стан поверхні, на яку наноситься покриття, і поверхонь розділу шарів.

Тому технологічні процеси одержання покриттів і в процесі нанесення мають особливе значення. Для покращення мікроструктури поверхневих шарів успішно використовують нові плазмові методи одержання (плазмове загартовування, плазмове зміцнення, плазмове модифікування).

Широко розповсюджене електролітно-плазмове полірування поверхні деталей, здатне забезпечити заглиблення можливих дефектів попередніх технологічних операцій, не змінюючи параметрів шорсткості, що сприяє покращенню адгезійних характеристик при наступному нанесенні вакуумно-плазмових покриттів.

Однак такої одержати досить при нанесенні високоякісних покриттів на прецизійні поверхні.

Відомий спосіб нанесення покриттів у вакуумі, що включає попереднє очищення поверхні виробу, наприклад, патент РФ № 2061788, М.кл. С23С 14/34, опубл. 10.06.96, в якому перед запаровуванням в камері дугового розряду проводять пасивуюче-деформативну обробку виробу потоком високоенергетичних нейтральних часток. В результаті пасивуючо-деформативної обробки одержують покриття високої міцності, щільності і пасивності, що значно підвищує його довговічність.

Але описаний вище спосіб використовують для одержання виробів, які не працюють у середовищах із значним навантаженням ерозійних факторів.

Відомий також спосіб нанесення багаторазового покриття на металеві вироби засобом катодного розплення, що включає іонне очищення і/або модифікацію поверхні виробу,

нанесення, як найменше тришарового зносостійкого покриття шляхом осадження у середовищі інертного газу шару металу та твердих розчинів газів, а також шарів нітриду, карбіду і/або бориду [див. патент РФ № 2228387, М.кл. С23С 14/06, 14/08, опубл. 10.05.04]. Испити зразків із покриттям показали, що отримані таким чином покриття дають добрий результат при використанні для захисту лопаток компресорів газових турбін і показали добрі результати в умовах тропічного морського клімату при температурі до 35 °С і 3 % солі у морському повітрі. Але це покриття не може бути використаним, наприклад, для захисту лопаток парових турбін оскільки умови роботи таких лопаток значно жорсткіші.

Найбільш близьким до технічного рішення, що заявляють, за призначенням, технічній суті та результату при використанні є ерозійностійке наношарове покриття, що містить наношари, які включають металевий підшар та наношари з нітридів титану [див. опис до патенту РФ № 2390578, М.кл. С23С 14/06, 14/48; опубл. 12.11.2007 г.], а також карбідів і/або карбонітридів титану, цирконію алюмінію, та наношари комбінацій сполук цих металів з азотом та вуглецем, а також імплантованих іонів.

Найбільш близьким до рішення, що заявляють, за призначенням, технічній суті та результату при використанні є також спосіб отримання ерозійно-стійкого наношарового покриття для лопаток турбомашин, що включає вакуумно-плазмове нанесення металевого прошарку та шару на основі нітридів титану, які формують при обертанні лопаток відносно власної вісі, [див. там же] та відносно послідовно розташованих катодів із різноманітних матеріалів, в якому після осадження кожного шару проводять його іоно-імплантаційну обробку спеціальними пристроями.

Описані вище технічні рішення використовують для забезпечення захисту лопаток турбін від сольової і газової корозії, газоабразивної та крапельно-ударної ерозії.

В порівнянні з широко відомими захисними покриттями з нітриду титану, що використовують зарубіжні фірми (Siemens Westinghouse gas turbine, Alstom, Силовые машины), це покриття та спосіб підвищують стійкість лопаток до сольової корозії і крапельно-ударної ерозії в 1,5-2 рази.

І все ж, маючи високу твердість і хорошу адгезію до основи, такі покриття не завжди забезпечують необхідну ерозійну стійкість робочих лопаток турбін при їх експлуатації в умовах волого-парової ерозії. Основним недоліком найближчого аналога є недостатня надійність захисту від пилової і крапельно-ударної ерозії та недостатня витривалість і циклічна міцність, що суттєво знижує ресурс деталей при їх використанні в агресивному середовищі турбін, що працюють в таких умовах, які проявляється у появі через тривалий час відколів та відшарувань.

Тому метою запропонованих технічних рішень є підвищення стійкості лопаток з багатошаровими покриттями від сольової корозії, пилової та крапельно-ударної ерозії при одночасному підвищенні ресурсу деталей із захисними покриттями.

В основу винаходу поставлена задача поліпшення ерозійностійкого багатошарового покриття для лопаток турбомашин, а також задача поліпшення способу отримання ерозійностійкого багатошарового покриття для лопаток турбомашин, в яких внаслідок виконання багатошарового покриття в складі металевого прошарку на основі та виконання додаткових шарів з титану та нітриду титану таких, що чергуються, а також виконання способом, що включає додаткові операції очищення поверхні виробу, що передують вакуумно-плазмове нанесення металевого прошарку, досягається новий технічний результат, який полягає в суттєвому підвищенні адгезійної здатності покриття, якому сприяє повільне змінювання пластичності при переході від крихкого стану основи до зовнішнього шару покриття. Наявність градієнта пластичності у шарах покриття забезпечує підвищення його спротиву до ерозійної дії агресивного середовища.

Наслідком досягнутого технічного результату є підвищення стійкості лопаток турбомашин при наявності сольової корозії, пилової та крапельно-ударної ерозії, що сприяє підвищенню ресурсу роботи виробів із захисним покриттям і пристроїв, що їх використовують у своєму складі і в умовах волого-парової ерозії.

Поставлена задача вирішується тим, що у відомому ерозійностійкому багатошаровому покритті для лопаток турбомашин, що містить металевий прошарок та шари титану і нітриду титану, відповідно до винаходу, первинний шар з титану виконано на поверхні основного матеріалу, другий шар виконано у складі шарів титану і нітриду титану, що чергуються.

Відповідно до винаходу, другий шар виконано у складі шарів титану і нітриду титану, що чергуються, з періодом 10 нм, що повторюється, і товщиною окремих шарів відповідно 2 нм і 8 нм.

Відповідно до винаходу, товщина прошарку титану виконана в діапазоні від 3 до 5 мкм, а товщина другого шару виконана в діапазоні від 10 до 15 мкм.

Поставлена задача вирішується і тим, що у відомому способі отримання ерозійностійкого багат шарового покриття для лопаток турбомашин, що включає вакуумно-плазмове нанесення металевого прошарку та шарів на підставі нітридів титану, які формують при обертанні лопаток відносно власної осі, відповідно до винаходу, вакуумно-плазмове нанесення металевого прошарку передують послідовно три етапи очищення поверхні, що включають обробку поверхні виробу в плазмі тліючого розряду інертного газу аргону, обробку поверхні в високоцільній плазмі двоступеневого вакуумно-дугового розряду інертного газу аргону і, останнє, іонну обробку металевими іонами.

Відповідно до винаходу, процеси багатоступеневого іонно-плазмового очищення, наступного вакуум-дугового осадження захисного ерозійностійкого покриття, що містить шари на основі нітриду титану, і стабілізуючого відпалу покриття проводять в одному вакуумному об'ємі в єдиному технологічному циклі.

Відповідно до винаходу, в процесі нанесення покриття здійснюється стабілізуючий відпал через кожні 50 шарів при тій же температурі без нанесення покриття шляхом відключення подачі азоту і підвищенні потенціалу зміщення на деталі для припинення нанесення покриття. Відповідно до винаходу, проведення процесу іонно-плазмового очищення та формування шарів з заданими періодами, що повторюються, і товщинами окремих шарів при вакуум-дуговому осадженні захисного покриття здійснюється програмно заданими циклограмами, що забезпечують програмно-синхронізоване керування регуляторами тиску інертного та реакційного газів та електричними параметрами процесу.

Як видно з опису технічної суті запропонованих технічних рішень, вони відрізняються від найближчих аналогів і, отже, є новими.

Рішення також мають винахідницький рівень. Як показано вище, відомі способи проводять в основному використовуючи іонне очищення. Технічне рішення, що заявляють принципово відрізняється від відомих тим, що очищення включає різноманітний вплив на поверхню основи, який супроводжується і стабілізуючими відпалами покриття, і програмно синхронізованими керування регуляторами тиску інертного та реакційних газів. Запропоновані технічні рішення промислово придатні і реалізовані за допомогою обладнання, модернізованого в умовах сучасного виробництва.

Була проведена значна кількість експериментів на зразках-свідках із сталі 20×13 та титанового сплаву ВТ6, що використовують для виготовлення робочих лопаток, з метою вивчення різних конструкцій покриттів (загальної товщини покриттів, товщини шарів, схеми їх чергування, параметрів стабілізаційного відпалу) на адгезію та якість покриттів, щоб винайти оптимальну конструкцію багат шарового захисного покриття.

Результати експериментів представлені в таблицях.

Таблиця 1. Експерименти з вибору багат шарової конструкції захисного покриття.

Таблиця 2. Експерименти з вибору стабілізуючого відпалу.

Нанесення покриттів здійснювали при оптимальних режимах процесу (п. 1.5 табл. 1).

Таблиця 3. Порівняльні зондові вимірювання параметрів технологічної плазми різних джерел плазми модернізованої установки.

Таблиця 4.1, 4.2. Експерименти з вивчення впливу різних стадій попередньої обробки поверхні на адгезію та якість покриттів (сколювання та відшарування).

Нанесення покриттів здійснювали при оптимальних режимах процесу (п. 1.5 табл. 1, п. 2 табл. 2).

Таблиця 5. Характеристики покриттів на зразках-свідках, розміщених в різних місцях лопатки (L - відстань від замка лопатки).

Контроль товщини шарів здійснюється за допомогою заздалегідь відкаліброваного вимірювача товщини FTC-2800, що дозволяє вимірювати швидкість росту покриття від 0,01 А/сек. Нанесення шарових покриттів здійснюється шляхом встановлення заданих значень тиску азоту, що забезпечується програмно-контрольованими регуляторами тиску азоту. Створення необхідних циклограм для отримання заданих періодів, що повторюються, і товщини окремих шарів забезпечується програмним керуванням регуляторів тиску азоту від вимірювача товщини FTC-2800.

Для вимірювання температури деталей використаний пірометр Raytek.

Металографічні дослідження і визначення параметрів матеріалів (товщина покриттів, рівномірність, дефектність та структура самого матеріалу) проводили на мікроскопах MMP-4 та Tesa Visio 300 gL. Мікротвердість покриттів вимірювали за допомогою мікротвердомірів PMT-3 та "BUENLIER" при навантаженні 50 Г. Адгезію покриттів вимірювали скретч-метром Revetest Scratch Tester (RST).

В табл. 1 приведені результати виконаних експериментів з вибору багат шарової конструкції захисного покриття.

Як видно з табл. 1, найкращою пропонованою конструкцією багат шарового захисного покриття за якістю з точки зору адгезії, є конструкція, наведена в п. 1.5 табл. 1, а саме:

5 ерозійностійке покриття, що містить металевий шар титану та шари з нітридів титану, є багат шаровою конструкцією, в якій:

первинний шар покриття виконаний з Ti товщиною 3-5 мкм;

другий шар виконаний у складі шарів з (Ti-TiN) з періодом повторюваності 10 нм і товщиною окремих шарів відповідно 2 нм та 8 нм, загальною товщиною 10-15 мкм.

10 Для поліпшення адгезійних характеристик покриття в процесі нанесення покриття здійснювали стабілізуючий відпал через кожні 50 шарів при тій же температурі без нанесення покриття шляхом відключення подачі азоту і підвищення потенціалу зміщення на деталі для припинення нанесення покриття.

15 Виконані нами експерименти (табл. 2), дозволили винайти оптимальні параметри процесу стабілізуючого відпалу (п. 2 табл. 2), що суттєво покращує адгезійні характеристики покриттів, що отримані.

Таким чином, як слідує з табл. 1, 2, нанесення покриттів при оптимальних режимах процесу (п. 1.5 табл. 1) та стабілізуючого відпалу (п. 2 табл. 2) дозволяє отримувати найкращі результати по адгезії багат шарових захисних покриттів, про що свідчить відсутність відколів і локальних відшарувань.

20 Процес багатоступеневого іонно-плазмового очищення поверхні здійснюють наступним чином.

1 етап - обробка в плазмі тліючого розряду інертного газу аргону.

25 Через низькі значення щільності плазми і щільності іонного струму на поверхню, що обробляють, швидкість очищення (розпилення поверхневих шарів) в плазмі тліючого розряду набагато нижче швидкості очищення в плазмі електродугового розряду. Більш високий потенціал (600 В), необхідний для горіння тліючого розряду в таких умовах, здатен викликати появу мікродуг на забрудненнях поверхні і погіршення класу чистоти. Повністю подавити процес виникнення мікродуг не вдається, навіть не дивлячись на наявність добре сформованої системи захисту від мікродуг. Тому обробку в тліючому розряді використовували для попереднього знегажування і "активації" доволі чистих поверхонь при дуже плавному підвищенні потенціалу.

30 Результати проведених досліджень показують, що тривалість обробки поверхні іонами аргону в плазмі тліючого розряду аргону не повинна перевищувати 30 хв.

35 Параметри плазми (іонний струм, щільність іонів, вольт-амперні характеристики, спектральні характеристики) під час іонно-плазмової обробки безперервно відслідковувались та архівувались за допомогою плазмометра "PlasmaMeter" та спектрометра "PlasmaSpectr".

Потім проводять іонно-плазмову обробку в високощільній газовій плазмі аргону, що створює газовий плазмоджерело модернізованої установки.

2 етап - обробка в високощільній плазмі.

40 Для цього використаний двоступеневий вакуумно-дуговий розряд інертного газу аргону, як потужного плазмового джерела газової плазми. Використання газового плазмоджерела забезпечує високоєфективну іонну обробку поверхні, що сприяє міцному зчепленню покриття з підкладкою і, як наслідок, одержанню високоякісних функціональних покриттів.

45 Для реалізації режиму газової плазми на виході електродугового джерела встановлена оптично непрозора, по проникненню для електричного поля, перегородка - жалюзійний екран, щоб запобігти потраплянню іонів металу на деталь. Високощільна газова плазма збуджується між катодом електродугового джерела, поблизу якого встановлено екран, і плазмоджерелом протилежного електродугового джерела, ізольованого від вакуумної камери. Катодом такого розряду є катод дугового розряду, ізольований від камери спеціальним сепаратором, що не пропускає потік металу, але при цьому дозволяє створити в камері газу плазму високої щільності.

55 За допомогою системи зондового моніторингу плазмових технологічних процесів плазмометра "PlasmaMeter" були проведені порівняльні зондові вимірювання параметрів технологічної плазми різних джерел плазми модернізованої установки (тліючий, подвійний дуговий) (Табл. 3). Вони показали, що відношення потоків іонів і нейтральних атомів для плазми подвійного дугового розряду дає приблизно в 300-1000 разів більш інтенсивний потік іонів в порівнянні з випадком тліючого розряду.

Така значно більш щільна плазма використана в модернізованій установці для очищення поверхні і іонного асистування при нанесенні функціональних покриттів.

Сила струму розряду може бути практично будь-якою і визначається тільки теплофізичними властивостями катоду і параметрами силового джерела живлення і може варіюватися в широких межах змінюванням току дуги (100-200 А). Діапазон робочих напруг розряду складає 40-70 В при максимальній щільності іонного току.

5 При іонно-плазмовому очищенні з використанням високощільної газової плазми, що створена газовим плазмоджерелом, не виникає проблема осадження на поверхні часток металу, а тому потенціали на деталь можна змінювати плавно, починаючи з нульового значення. При цьому досягається повна відсутність електричних пробоїв на забруднених ділянках поверхні у порівнянні з випадком, коли повне очищення поверхні здійснюється іонами металу, і тим самим досягається збереження вихідної чистоти поверхні, що обробляють.

10 При роботі з аргонем мінімальна робоча напруга на електродах розряду при максимальній щільності іонного току відповідає тиску  $1 \cdot 10^{-3}$  мм.рт.ст. Для азоту оптимальний тиск дещо вище і складає  $2 \cdot 10^{-2}$  мм.рт.ст.

15 Іонний струм насичення, від величини якого залежить продуктивність процесу очищення, досягає високих значень (~ 3А). Час обробки в такому режимі складає від 10 до 15 хв. Такої обробки достатньо для переходу в режим обробки іонами металу, що напиляють.

3 етап - іонна обробка (очищення металевими іонами).

Основними технологічними параметрами при іонній обробці є іонний струм (щільність іонного струму), яким оброблюється поверхня виробу, енергія іонів, що бомбардують поверхню, та час обробки. Енергія іонів регулюється змінюванням напруги що прискорює. Щільність іонного струму на поверхні оброблюваного виробу задається щільністю іонного струму джерела іонів, що має власне регулювання.

25 Обробку з плазми електродугового розряду починали вести відразу після припинення обробки в газовій плазмі. Плавно підвищуючи напругу, що подається на виріб, доводять параметри дугового розряду до заданої технологічним процесом величини. Експериментально був вибраний режим роботи дугових джерел таким, щоб при безперервному режимі горіння дуги температура виробів підвищувалась від 573-623К до 800-823К при досягненні потенціалу 800 В, що прискорює, протягом 8-10 хв.

30 Це дозволяло повністю уникнути інтенсивного створення мікродуг, причиною виникнення яких може бути підвищене газовиділення із-за додаткового розігріву поверхні виробу та оснастки в процесі обробки, недостатнього ступеня попереднього очищення оснастки та виробів перед вакуумуванням камери тощо.

В стадію іонної обробки може бути включена обробка не тільки в чистому інертному газі, а й з домішками інших газів ( $O_2$ ,  $N_2$  та ін.), тобто здійснювати плазмохімічну обробку.

35 В табл. 4.1, 4.2 наведені результати виконаних експериментів на зразках-свідках в умовах, що відповідають реальним умовам використання пропонованого покриття, з метою вивчення впливу різних стадій попередньої обробки поверхні на адгезію та якість покриттів, які отримані, згідно з пропонованим винаходом, з оптимальними конструкціями, приведеними в попередніх табл. 1, 2 (п. 1.5 табл. 1, п. 2 табл. 2).

40 Найкращі результати по адгезії і якості покриттів досягаються при оптимальних режимах процесу п. 1.5 (табл. 4.1, 4.2).

Після проведення усіх формують механічних обробок перед нанесенням покриття проводять традиційні операції ретельного знежирювання в ультразвуковій ванні, промивки в бензино-ацетонових розчинниках, висушування в сушильній шафі при температурі 60 °С.

45 Нанесення покриттів здійснюється в модернізованій установці. Лопатку встановлюють в спеціальній технологічній оснастці в вакуумну камеру, де створюють вакуум не нижче  $2,0 \cdot 10^{-3}$  Па.

Проводять триступеневе іонно-плазмово очищення згідно з винаходом.

50 Проведення такої триетапної обробки забезпечує високу якість очищення поверхні перед нанесенням покриттів і отримання міцнозчеплених з основою покриттів.

Потім формують багатокомпонентне покриття вакуумно-дуговим осадженням з плазмової фази в середовищі реакційного газу азоту з іонним бомбардуванням згідно з винаходом.

Розроблені покриття були нанесені на партію серійних робочих лопаток (довжиною до 1300 мм) парових турбін для захисту від корозійно-ерозійних ушкоджень.

55 Для контролю були поставлені зразки-свідки на різних ділянках лопаток - на опуклих і вгнутих поверхнях, в зонах бандажу, пера лопатки, замкової частини (Табл. 5).

Проведений найретельніший контроль робочих лопаток з покриттями, що розроблені, не виявив жодних ушкоджень покриттів на всіх ділянках лопаток.

60 Партія лопаток з розробленими покриттями поставлена у складі турбіни в умовах експлуатації на АЕС (Пакш, Угорщина), де експлуатується в штатних умовах з 2010 р.

Як видно з опису прикладів покриттів і способу їх виготовлення, технічні рішення, що заявляють, дозволяють досягнути значних показників властивостей і якості пропонованого багат шарового покриття.

Таблиця 1

| NN | Матеріал основи     | NN  | Перший шар Ti          |                   |                                    |
|----|---------------------|-----|------------------------|-------------------|------------------------------------|
|    |                     |     | Технологічні параметри |                   | Характеристики першого шару        |
|    |                     |     | струм $I_p(Ti)$ , А    | напруга $U_c$ , В | Загальна товщина першого шару, мкм |
| 1  | Ст. 20 x 13         | 1.1 | 90                     | 120               | 5 Ti                               |
|    |                     | 1.2 | 90                     | 90                | 2 Ti                               |
|    |                     | 1.3 | 120                    | 100               | 3 Ti                               |
|    |                     |     | 120                    | 120               | 3 Ti                               |
|    |                     | 1.5 | 120                    | 120               | 5 Ti                               |
|    |                     | 1.6 | 100                    | 100               | 3 Ti                               |
|    |                     | 1.7 | 120                    | 140               | 5 Ti                               |
|    |                     |     |                        |                   |                                    |
| 2  | Титановий сплав ВТ6 | 2.1 | 90                     | 120               | 5 Ti                               |
|    |                     | 2.2 | 100                    | 100               | 5 Ti                               |
|    |                     | 2.3 | 120                    | 120               | 5 Ti                               |
|    |                     | 2.4 | 100                    | 100               | 5 Ti                               |
|    |                     |     |                        |                   |                                    |

5

Таблиця 1(продовження)

| NN  | Другий шар Ti-TiN      |                   |                         |                                    |                      |                           |                                    | Характеристики загального покриття |                       |                     |
|-----|------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------------------|----------------------|---------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|---------------------|
|     | Технологічні параметри |                   |                         | Характеристики другого шару Ti-TiN |                      |                           |                                    | Адгезія                            | Загальна товщина, мкм | Мікротвердість, МПа |
|     | струм $I_p(Ti)$ , А    | напруга $U_c$ , В | тиск азоту $P_{N_2}$ Па | Товщина шару Ti, нм                | Товщина шару TiN, нм | Період повторює мості, нм | Загальна товщина другого шару, мкм |                                    |                       |                     |
| 1.1 | 90                     | 120               | $2,0 \cdot 10^{-1}$     |                                    |                      |                           | 10 TiN                             | Добра                              | 15                    | 20000               |
| 1.2 | 100                    | 90                | $2,0 \cdot 10^{-1}$     | 5                                  | 10                   | 15                        | 15 Ti-TiN                          | Добра                              | 17                    | 19000               |
| 1.3 | 100                    | 100               | $2,0 \cdot 10^{-1}$     | 3                                  | 15                   | 20                        | 12 Ti-TiN                          | Добра                              | 15                    | 19000               |
| 1.4 | 120                    | 120               | $2,0 \cdot 10^{-1}$     | 5                                  | 10                   | 15                        | 10 Ti-TiN                          | Добра                              | 13                    | 19000               |
| 1.5 | 120                    | 120               | $2,0 \cdot 10^{-1}$     | 2                                  | 8                    | 10                        | 15 Ti-TiN                          | Дуже добра                         | 20                    | 18000               |
| 1.6 | 100                    | 120               | $2,0 \cdot 10^{-1}$     | 10                                 | 10                   | 20                        | 17 Ti-TiN                          | Добра                              | 20                    | 17000               |
| 1.7 | 120                    | 140               | $2,0 \cdot 10^{-1}$     | 10                                 | 20                   | 20                        | 20 Ti-TiN                          | Добра                              | 25                    | 19000               |
|     |                        |                   |                         |                                    |                      |                           |                                    |                                    |                       |                     |
| 2.1 | 100                    | 120               | $2,0 \cdot 10^{-1}$     |                                    |                      |                           | 10 TiN                             | Добра                              | 15                    | 20000               |
| 2.2 | 100                    | 100               | $2,0 \cdot 10^{-1}$     | 10                                 | 10                   | 10                        | 15 Ti-TiN                          | Добра                              | 20                    | 19000               |
| 2.3 | 120                    | 120               | $2,0 \cdot 10^{-1}$     | 2                                  | 8                    | 10                        | 15 Ti-TiN                          | Дуже добра                         | 20                    | 18000               |
| 2.4 | 120                    | 120               | $2,0 \cdot 10^{-1}$     | 15                                 | 20                   | 20                        | 15 Ti-TiN                          | Добра                              | 20                    | 17000               |

Таблиця 2

| NN | Матеріал основи | Параметри стабілізуючого відпалу | Технологічні параметри          |                           |         |                    | Характеристики загального покриття |                      |
|----|-----------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------|--------------------|------------------------------------|----------------------|
|    |                 |                                  | Тиск азоту P <sub>N2</sub> , Па | Потенціал зміщення, Ус, В | Час, хв | Температура        | Адгезія                            | Мікро твердість, МПа |
| 1  | Ст. 20 x 13     | Через кожні 30 шарів Ti-TiN      | 0                               | 120                       | 3       | При T <sub>n</sub> | Добра                              | 18000                |
| 2  |                 | Через кожні 50 шарів Ti-TiN      | 0                               | 120                       | 5       | При T <sub>n</sub> | Дуже добра                         | 18000                |
| 3  |                 | Через кожні 100 шарів Ti-TiN     | 0                               | 120                       | 5       | При T <sub>n</sub> | Дуже добра                         | 18000                |
| 4  |                 | Через кожні 150 шарів Ti-TiN     | 0                               | 120                       | 5       | При T <sub>n</sub> | добра                              | 18000                |

Таблиця 3

| Тип розряду       | Щільність плазми, см <sup>-3</sup> | Температура електронів, eВ | Щільність струму іонів, mA/cm <sup>2</sup> | Ступінь іонізації потоку, іон/атом |
|-------------------|------------------------------------|----------------------------|--|------------------------------------|
| Тліючий           | 10 <sup>7</sup>                    | 0,15                       | 0,001                                      | 10 <sup>-7</sup>                   |
| Подвійний дуговий | 6·10 <sup>9</sup>                  | 5                          | 0,3  | 10 <sup>-4</sup>                   |

Таблиця 4.1

| NN                                   | 1.1. Обробка в плазмі тліючого розряду: |                               |         |                                      |                       |                                | 1.2 Обробка в високощільній аргонівій плазмі |           |                               |                                   |                       |                                |
|--------------------------------------|---|-------------------------------|---------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|--|-----------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
|                                      | Технологічні параметри                  |                               |         | Характеристики плазми                |                       |                                | Технологічні параметри                       |           |                               | Характеристики плазми             |                       |                                |
|                                      | На-пруга Ус, В                          | тиск Ar, P <sub>N2</sub> , Па | час, хв | Щільність плазми n, см <sup>-3</sup> | темпер. електр. T, eВ | ступінь іонізації α, іон/атом. | струм Iр, А                                  | напр U, В | тиск Ar, P <sub>n2</sub> , Па | щільн. плазми n, см <sup>-3</sup> | темпер. електр. T, eВ | ступінь іонізації α, іон/атом. |
| Тліючий 1.1                          |   |                               |         |                                      |                       |                                |  |           |                               |                                   |                       |                                |
| 1.1                                  | 800                                     | 1·10 <sup>-1</sup>            | 15      | 1·10 <sup>-7</sup>                   | 0,1                   | 10 <sup>-7</sup>               |  |           |                               |                                   |                       |                                |
| 1.2                                  | 1300                                    | 1·10 <sup>-1</sup>            | 30      | 2·10 <sup>-7</sup>                   | 0,15                  | 10 <sup>-7</sup>               |  |           |                               |                                   |                       |                                |
| Тліючий + іони Ti 1.1+1.3            |   |                               |         |                                      |                       |                                |  |           |                               |                                   |                       |                                |
| 1.3                                  | 1300                                    | 1·10 <sup>-1</sup>            | 30      | 2·10 <sup>-7</sup>                   | 0,15                  | 10 <sup>-7</sup>               |  |           |                               |                                   |                       |                                |
| 1.4                                  | 1300                                    | 1·10 <sup>-1</sup>            | 30      | 2·10 <sup>-7</sup>                   | 0,15                  | 10 <sup>-7</sup>               |  |           |                               |                                   |                       |                                |
| Тліючий + ДВДР + іони Ti 1.1+1.2+1.3 |   |                               |         |                                      |                       |                                |  |           |                               |                                   |                       |                                |
| 1.5                                  | 1300                                    | 1·10 <sup>-1</sup>            | 30      | 2·10 <sup>-7</sup>                   | 0,15                  | 10 <sup>-7</sup>               | 100  | 100       | 1·10 <sup>-3</sup>            | 6·10 <sup>9</sup>                 | 5                     | 10 <sup>-4</sup>               |
| 1.6                                  | 1300                                    | 1·10 <sup>-1</sup>            | 30      | 2·10 <sup>-7</sup>                   | 0,15                  | 10 <sup>-7</sup>               | 120  | 200       | 1·10 <sup>-3</sup>            | 6·10 <sup>9</sup>                 | 5                     | 10 <sup>-4</sup>               |
| 1.7                                  | 1300                                    | 1·10 <sup>-1</sup>            | 30      | 2·10 <sup>-7</sup>                   | 0,15                  | 10 <sup>-7</sup>               | 120  | 500       | 1·10 <sup>-3</sup>            | 6·10 <sup>9</sup>                 | 5                     | 10 <sup>-4</sup>               |

| Таблиця 4.2 (продовження)            |                                 |                    |            |                       |   |           |                                    |                       |                     |
|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------|------------|-----------------------|---|-----------|------------------------------------|-----------------------|---------------------|
| NN                                   | 1.3. Обробка металевими іонами. |                    |            |                       |   |           | Характеристики загального покриття |                       |                     |
|                                      | Технологічні параметри          |                    |            | Характеристики плазми |   |           | Адгезія                            | Загальна товщина, мкм | Мікротвердість, МПа |
|                                      | струм<br>$I_p(Ti)$ , А          | напр.<br>$U_c$ , В | час,<br>хв | енергія<br>іонів eВ   | Щільність<br>струму $j$ ,<br>mA/cm <sup>2</sup> | час<br>хв |                                    |                       |                     |
| Тліючий 1.1                          |                                 |                    |            |                       |   |           |                                    |                       |                     |
| 1.1                                  |                                 |                    |            |                       |   |           | Задовільна                         | 15                    | 20000               |
| 1.2                                  |                                 |                    |            |                       |   |           | Задовільна                         | 17                    | 19000               |
| Тліючий + іони Ti 1.1+1.3            |                                 |                    |            |                       |   |           |                                    |                       |                     |
| 1.3                                  | 100                             | 90                 | 10         | 300                   | 0,1   | 15        | Добра                              | 15                    | 19000               |
| 1.4                                  | 120                             | 100                | 15         | 1000                  | 0,2   | 30        | Добра                              | 13                    | 19000               |
| Тліючий + ДВДР + іони Ti 1.1+1.2+1.3 |                                 |                    |            |                       |   |           |                                    |                       |                     |
| 1.5                                  | 120                             | 100                | 15         | 1000                  | 0,2   | 30        | Дуже<br>Добра                      | 20                    | 18000               |
| 1.6                                  | 120                             | 100                | 15         | 1000                  | 0,2   | 30        | Дуже<br>Добра                      | 20                    | 17000               |
| 1.7                                  | 120                             | 100                | 15         | 1000                  | 0,2   | 30        | Дуже<br>Добра                      | 25                    | 19000               |

Нанесення покриттів здійснювалося при оптимальних режимах процесу (п. 1.5 табл. 1, п. 2 табл. 2).

Таблиця 5

| NN | Зони розміщення зразків-свідків |                            | Характеристики загального покриття |                       |                     |
|----|---------------------------------|----------------------------|------------------------------------|-----------------------|---------------------|
|    |                                 |                            | Адгезія                            | Загальна товщина, мкм | Мікротвердість, МПа |
| 1  |                                 | (L <sub>1</sub> = 100 см)  | Дуже добра                         | 15                    | 20000               |
| 2  | на випуклих                     | (L <sub>2</sub> = 500 см)  | Дуже добра                         | 16                    | 20000               |
| 3  | поверхнях                       | (L <sub>3</sub> = 1000 см) | Дуже добра                         | 17                    | 19000               |
| 4  | на вигнутих<br>поверхнях        | (L <sub>1</sub> = 100 см)  | Дуже добра                         | 15                    | 20000               |
| 5  |                                 | (L <sub>2</sub> = 500 см)  | Дуже добра                         | 16                    | 20000               |
| 6  |                                 | (L <sub>3</sub> = 1000 см) | Дуже добра                         | 17                    | 19000               |
| 7  | в зоні бандажу                  |                            | Дуже добра                         | 19                    | 18000               |
| 8  | в зоні пера лопатки             |                            | Дуже добра                         | 20                    | 18000               |
| 9  | в зоні замкової частини         |                            | Дуже добра                         | 12                    | 20000               |

L - відстань від замка лопатки

#### ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

- 5 1. Ерозійностійке багат шарове покриття для лопаток турбомашин, що містить металевий прошарок та шари титану і нітриду титану, яке **відрізняється** тим, що первинний шар з титану виконано на поверхні основного матеріалу, другий шар виконано у складі шарів титану і нітриду титану, що чергуються.
- 10 2. Ерозійностійке багат шарове покриття за п. 1, яке **відрізняється** тим, що другий шар виконано у складі шарів титану і нітриду титану, що чергуються, з періодом 10 нм, що повторюється, і товщиною окремих шарів відповідно 2 нм і 8 нм.
3. Ерозійностійке багат шарове покриття за п. 2, яке **відрізняється** тим, що товщина прошарку титану вибрана в діапазоні від 3 до 5 мкм, а товщина другого шару вибрана в діапазоні від 10 до 15 мкм.
- 15 4. Спосіб отримання ерозійностійкого багат шарового покриття для лопаток турбомашин, що включає вакуумно-плазмове нанесення металевого прошарку та шарів на основі нітридів титану, які формують при обертанні лопаток відносно власної осі, який **відрізняється** тим, що

вакуумно-плазмовому нанесенню металевого прошарку передують послідовно три етапи очищення поверхні, що включають обробку поверхні лопаток в плазмі тліючого розряду інертного газу аргону, обробку поверхні в високощільній плазмі двоступеневого вакуумно-дугового розряду інертного газу аргону і останнє - іонну обробку металевими іонами.

- 5 5. Спосіб за п. 4, який **відрізняється** тим, що процеси багатоступеневого іонно-плазмового очищення, наступного вакуумно-дугового осадження захисного ерозійностійкого покриття, що містить шари на основі нітриду титану, і стабілізуючого відпалу покриття проводять в одному вакуумному об'ємі в єдиному технологічному циклі.
- 10 6. Спосіб по п. 4, який **відрізняється** тим, що в процесі нанесення покриття здійснюють стабілізуючий відпал через кожні нанесені 50 шарів при тій же температурі, без нанесення покриття шляхом відключення подачі азоту і підвищенні потенціалу зміщення на лопатки при припиненні нанесення покриття.
- 15 7. Спосіб за п. 4, який **відрізняється** тим, що проведення процесу іонно-плазмового очищення та формування шарів з заданими періодами, що повторюються, і товщинами окремих шарів при вакуум-дуговому осадженні захисного ерозійностійкого покриття здійснюють програмно заданими циклограмами, що забезпечують програмно-синхронізоване керування регуляторами тиску інертного та реакційного газів і електричними параметрами процесу.