



УКРАЇНА

(19) UA (11) 76473 (13) C2  
(51) МПК (2006)  
F01D 11/08МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) УЩІЛЬНЮВАЛЬНА СИСТЕМА, ЩО СТИРАЄТЬСЯ

1

(21) 2004010109  
(22) 12.03.2002  
(24) 15.08.2006  
(86) PCT/US02/09029, 12.03.2002  
(31) 09/875,764  
(32) 06.06.2001  
(33) US  
(46) 15.08.2006, Бюл. № 8, 2006 р.  
(72) Говард Пітер, US, Шанкар Раві, US, Фентон Річард, US  
(73) ХРОМЕЛЛОЙ ГЕЗ ТЕРБАЙН КОРПОРЕЙШН, US  
(56) US 5935407, C23C28/00, C25D5/02, 10.08.1999  
US 4936745, C23C4/02, F01D11/12, 26.06.1990  
US 5780116, C23C4/02, F01D11/12, 14.07.1998  
US 5997248, F01D5/20, F01D5/14, 07.12.1999  
US 5064727, C23C30/00, F01D11/12, 12.11.1991  
US 5603603, F01D5/20, F01D11/12, 18.02.1997  
US 5536022, C23C4/02, F01D11/12, 16.07.1996  
US 5704759, F01D5/20, F01D11/12, 06.01.1998  
US 6096381, C23C4/02, 01.08.2000  
(57) 1. Ущільнювальна система, що стирається, газотурбінного двигуна, яка містить складове ущільнення і взаємодіючу з ним лопатку турбіни; лопатку турбіни, що має кінцеву частину, яка містить кубічні абразивні частинки нітриду бору для введення в контакт зі складовим ущільненням для створення ущільнення; складове ущільнення, що має основу з суперсплаву, зв'язувальне покриття з  $MCrAlY$  на поверхні основи, що має шорсткість поверхні більше 300 Ra, в якому M вибрано з групи, що складається з Co, Ni або Ni і Co, і пористий керамічний ущільнювальний матеріал, що стирається, на зв'язувальному покритті, який має пористість від 5 до 15 об.%.  

---

2

2. Система за п. 1, яка відрізняється тим, що зв'язувальне покриття має шорсткість поверхні більше 350 Ra.  
3. Система за п. 2, яка відрізняється тим, що зв'язувальне покриття нанесене за допомогою плазмового напилювання.  
4. Система за п. 3, яка відрізняється тим, що пористим керамічним ущільнювальним матеріалом, що стирається, є двоокис цирконію, стабілізований 6-9 % окислу ітрію.  
5. Система за п. 3, яка відрізняється тим, що зв'язувальне покриття має товщину від близько 4 до 15 міл.  
6. Система за п. 4, яка відрізняється тим, що пористий керамічний матеріал, що стирається, має товщину від близько 10 до 80 міл.  
7. Система за п. 2, яка відрізняється тим, що кубічні частинки нітриду бору в кінцевій частині прикріплені до краю лопатки захоплюючим покриттям у стійкій до окислення металевій матриці.  
8. Система за п. 6, яка відрізняється тим, що пористий керамічний ущільнювальний матеріал, що стирається, має пористість від 10 до 15 об.%.  
9. Система за п. 6, яка відрізняється тим, що керамічний матеріал нанесений за допомогою плазмового напилювання разом з леткою речовиною.  
10. Система за п. 9, яка відрізняється тим, що керамічний матеріал має розмір частинок, що складає менше ніж близько 200 мкм.  
11. Система за п. 10, яка відрізняється тим, що леткою речовиною є складний поліефір, що має розмір частинок від близько 20 до 125 мкм, який міститься в кількості близько 1-1,5 ваг.% від кількості керамічного ущільнювального матеріалу, що стирається.

Даний винахід відноситься до ущільнювальної системи, що стирається, і, більш конкретно, до використання складового ущільнення з підвищеною ерозійною стійкістю.

Ефективність сучасних газотурбінних двигунів залежить від непроницності ущільнення між компонентами (лопатками), що обертаються, і стаціо-

нарними компонентами (кожухом) у вентиляторі, компресорі і турбіні. Це ущільнення створюється за допомогою надання можливості лопаткам прорізати (стирати) канавку в ущільнювальному матеріалі, який стирається, що запобігає витоку істотної кількості повітря за край лопатки. Традиційно матеріали для ущільнення турбін виготовляли з

(19) UA (11) 76473 (13) C2

плетених металевих волокон або спечених металевих частинок, припаяних на місці. Хоча ці матеріали стираються внаслідок високої внутрішньої пористості і низької міцності, їх стійкість до ерозії під впливом твердих частинок низька, що приводить до швидкої втрати матеріалу. Ця втрата матеріалу погіршує ущільнення, і ефективність двигуна швидко знижується. Як ущільнювальні матеріали в найсучасніших двигунах використовують термічно напилені покриття, які виконують ту ж функцію, що і плетені ущільнення, що стираються, але які легше наносяться і легше замінюються, коли двигун ремонтується.

Використання порошків для термічного напилювання для формування ущільнень, що стираються, відоме і описане в патенті США №4291089. Такі порошки використовують для формування покриття на основі для одержання ущільнення, що стирається, тобто покриття, яке ущільнює простір між основою і прилеглою поверхнею, рухомою відносно неї, і яке стирається до міри, що контролюється за рахунок відносного руху основи і прилеглої поверхні. Таке ущільнення спочатку формують за допомогою термічного напилювання порошку на основу для формування покриття небагато більшої товщини, ніж проміжок між основою і прилеглою поверхнею, таким чином, що покриття стирається при відносному русі між основою і прилеглою поверхнею до небагато меншої товщини, відповідної проміжку між основою і прилеглою поверхнею таким чином, щоб між ними забезпечувалось ефективне ущільнення. Такі ущільнення використовують, наприклад, з лопатками турбіни або компресора газотурбінних двигунів, таких як авіаційні, для забезпечення ущільнення між лопатками і корпусом турбіни або компресора.

Однією з проблем створення придатного ущільнення, що стирається, є одержання термічно напиленого покриття, яке, з одного боку, має достатню структурну міцність, яка, проте, досить низька для забезпечення стиратості, і яке, з іншого боку, має досить високу стійкість до ерозії від впливу твердих частинок, що стикаються з ущільнювальним покриттям, що стирається, при використанні. Наприклад, у випадку з лопатками газової турбіни або компресора, ущільнювальне покриття зазнає ударів абразивних частинок, що захоплюються повітрям і всмоктуються двигуном.

Керамічне ущільнення, що стирається, показане в патенті США №4936745, який пропонує пористий керамічний шар, що стирається, який має пористість від близько 20 до 35об.%; однак висока пористість викликає знижену ерозійну стійкість, що є недоліком при роботі в жорстких умовах, які існують в турбіні високого тиску.

Коротко кажучи, даний винахід забезпечує одержання системи ущільнення, що стирається, газотурбінного двигуна, що містить складове ущільнення і взаємодіючу з ним лопатку турбіни. Лопатка турбіни має кінцеву частину, що містить кубічні абразивні частинки нітриду бору для введення в контакт зі складовим ущільненням для забезпечення ущільнення. Складове ущільнення має основу з суперсплаву, що має нанесене на неї зв'язувальне покриття з  $\text{MCrAlY}$  з шорсткістю поверхні, що становить, щонайменше, 300Ra, і пори-

стий керамічний ущільнювальний матеріал, що стирається, на зв'язувальному покритті, що має пористість, яка складає від 5 до 15об.%.  
Одержана ущільнювальна система, що стирається, для газотурбінних двигунів, яка володіє підвищеною ерозійною стійкістю і, одночасно, все ж забезпечує ефективне ущільнення між лопаткою турбіни і стаціонарним компонентом. Система ущільнення містить складове ущільнення і лопатку турбіни, яка взаємодіє з складовим ущільненням для прорізання доріжки в складовому ущільненні для створення ущільнення. Лопатка турбіни є елементом, що обертається, яка має абразивну кінцеву частину, розташовану із забезпеченням тертя об стаціонарне складове ущільнення, що стирається, таким чином, що абразивна кінцева частина врізається в поверхню складового ущільнення, що стирається.

Лопатка турбіни має кінцеву частину, яка містить кубічні абразивні частинки нітриду бору (CBN) для того, щоб вона врізалась в поверхню складового ущільнення. Кубічні абразивні частинки нітриду бору високоефективні для прорізання ущільнювального матеріалу, що стирається. Кінцева частина, що містить кубічні абразивні частинки нітриду бору, може бути одержана уловлювальним покриттям у стійкій до окислення металевій матриці. Може використовуватись спосіб, описаний в патенті США №5935407, який включений сюди як посилальний матеріал, згідно з яким зв'язувальне покриття наносять на основу краю лопатки турбіни за допомогою плазмового напилювання під низьким тиском, потім закладають в зв'язувальне покриття абразивні частинки шлямом уловлювального покриття в металевій матриці. Цей спосіб переважний завдяки підвищеній міцності зв'язку абразивного покриття з краєм лопатки турбіни.

Складове ущільнення має ущільнення, що стирається, пов'язане з основою з суперсплаву. Звичайно основою є корпус турбіни або компресора або прикріплене до нього облицювання, при цьому суперсплавом є суперсплав на основі кобальту або нікелю. Для скріплення ущільнювального матеріалу, що стирається, з основою, на поверхню основи наносять зв'язувальний шар, що має шорсткість поверхні, яка складає більше 300Ra; переважно - більше 350Ra. Зв'язувальним покриттям є  $\text{MCoAlY}$ , в якому M - це Co і/або Ni, який може бути модифікований Pt і/або дифузійним алюмінієм покриттям. Підвищена стійкість до впливу навколишнього середовища матеріалу, що стирається, скомбінована зі збільшеною різальною здатністю кубічних абразивних частинок нітриду бору в кінцевій частині лопатки, забезпечує виконання збільшеного прорізу в складовому ущільненні. Підвищена шорсткість поверхні зв'язувального покриття забезпечує підвищену міцність зв'язку, необхідну для кріплення матеріалу, що стирається. Зв'язувальне покриття може наноситись за допомогою плазмового напилювання, або при низькому тиску, або при атмосферному, до товщини близько 4-15міл, переважно - близько 5-10міл. Для досягнення шорсткості поверхні покриття з  $\text{MCoAlY}$  наносять плазмовим напилюванням при розмірі частинок, що складає до близько 150мкм. Зв'язувальне покриття піддають термічній обробці для

дифузійного скріплення або перед нанесенням кераміки, або після, при температурі близько 1900-2050°F протягом 2-5 годин, в типовому варіанті - при температурі 1975°F протягом 4 годин.

На зв'язувальне покриття наносять пористий керамічний ущільнювальний матеріал, що стирається, який має пористість від близько 5 до 15об.%, переважно - 10-15об.%. Знижений рівень пористості цього матеріалу забезпечує підвищену стійкість до впливу навколишнього середовища, що збільшує корисний строк служби газотурбінного двигуна. Підвищена ефективність різання кубічними абразивними частинками нітриду бору, розташованими в краї, в комбінації з підвищеною силою зв'язку зв'язувального покриття забезпечує одержання ефективної ущільнювальної системи зі збільшеним строком служби.

Керамічним ущільнювальним матеріалом, що стирається, є двоокис цирконію, стабілізований 6-9% окислу ітрію. Для створення пористості керамічний матеріал наносять за допомогою плазмового напилювання з леткою речовиною, переважно - зі складним полієфіром. Для одержання пористості в межах від 5 до 15%, керамічні частинки розміром менше ніж близько 200мкм, переважно - близько 20-125мкм, можуть бути змішані з до 1,5ваг.%, переважно - близько 1-1,5ваг.% складного полієфіру, що має розмір частинок від 45 до 125мкм. Потім суміш наносять за допомогою плазмового напилювання до одержання товщини від близько 10 до 80міл, переважно - 20-40міл. За необхідності складний полієфір видаляють за допомогою нагрівання до температури понад 1300°F; однак було виявлено, що велика частина складного полієфіру вже видаляється в процесі плазмового напилювання, і наявність складного полієфіру, що залишився, може бути допустима в системі.

#### Приклад

На кінцеву частину лопатки турбіни була нанесена абразивна частина кінцевої частини з використанням способу, описаного в патенті США

№5935407, згідно з яким спочатку на кінцеву частину лопатки турбіни було нанесено за допомогою плазмового напилювання при низькому тиску зв'язувальне покриття з CoNiCrAlY до одержання товщини 4міл, потім були нанесені уловлювальним покриттям кубічні абразивні частинки нітриду бору за допомогою нікелювання, після чого йшло нікелювання з розчином, що містить тонкі частинки CoCrAlHf, до одержання товщини 5міл. Після гомогенізувальної термічної обробки при 1975°F протягом 4 годин кінцева частина лопатки була алюмінізована за допомогою процесу в газовій фазі.

Потім було підготовлене складове ущільнення за допомогою нанесення зв'язувального покриття з CoNiCrAlY на пробні зразки з суперсплаву Hastelloy X розміром 4 дюйми на 1,4 дюйми за допомогою плазмового напилювання при низькому тиску частинок CoNiCrAlY, що являють собою суміш частинок з розмірами в межах від 45 до 90мкм і від 20 до 38мкм, до одержання товщини 7міл і з одержанням шорсткості поверхні в межах від 360 до 400Ra. Пористий керамічний ущільнювальний матеріал, що стирається, був підготовлений за допомогою змішування 98,75ваг.% стабілізованого окислом ітрію двоокису цирконію з розмірами частинок від 22 до 125мкм з 1,25ваг.% частинок складного полієфіру з розмірами частинок від 45 до 125мкм, що забезпечило одержання керамічного матеріалу з пористістю 12,5%. Цей ущільнювальний матеріал був нанесений на пробні зразки зі зв'язувальним покриттям за допомогою плазмового напилювання.

Пробні зразки з ущільнювальним матеріалом, що стирається, були перевірені на стирання у високотемпературній установці для випробування стиранням з використанням лопаток з краями з кубічними абразивними частинками нітриду бору, при цьому установка була настроєна на задану глибину прорізання, що становить 20міл. Відмінна стираність була продемонстрована при наступних параметрах випробувань:

| Температура при випробуванні | Швидкість руху кінцевої частини | Темп врізання | Глибина канавки |
|------------------------------|---------------------------------|---------------|-----------------|
| 1832°F                       | 1150фут/сек.                    | 5мкм/сек.     | 17,5міл         |
| 2192°F                       | 1345 фут/сек.                   | 5мкм/сек.     | 17,5міл         |

Були проведені додаткові випробування із заданою глибиною прорізання, що складає 20міл.

Один зразок був перевірений зі складовим ущільненням (зв'язувальне покриття плюс керамічне верхнє покриття з пористістю 12,5%), під-

даним дифузійній термічній обробці при температурі 1975°F протягом 4 годин, після нанесення керамічного покриття. Випробування показали наступні результати:

| Температура при випробуванні | Швидкість руху кінцевої частини | Темп врізання | Глибина канавки |
|------------------------------|---------------------------------|---------------|-----------------|
| 1832°F                       | 1150фут/сек.                    | 5мкм/сек.     | 12,8міл         |

Також були перевірені зразки з різними рівнями пористості, що показали наступні результати:

| Пористість кераміки | Температура при випробуванні | Швидкість руху кінцевої частини | Темп врізання | Глибина канавки |
|---------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------|-----------------|
| 10%                 | 1832°F                       | 1150фут/сек.                    | 5мкм/сек.     | 19,4міл         |
| 15%                 | 1832°F                       | 1150фут/сек.                    | 5мкм/сек.     | 18,0міл         |
| 10%                 | 2192°F                       | 1345фут/сек.                    | 5мкм/сек.     | 21,5міл         |
| 15%                 | 2192°F                       | 1345фут/сек.                    | 5мкм/сек.     | 18,0міл         |

У ході всіх випробувань кінцева частина лопатки не продемонструвала помітного зносу.

