



УКРАЇНА

(19) UA (11) 48242 (13) U  
(51) МПК (2009)  
C22C 19/05МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ  
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під  
відповідальність  
власника  
патенту

## (54) ЛИВАРНИЙ ЖАРОМІЦНИЙ НІКЕЛЕВИЙ СПЛАВ

(21) u200909668

(22) 21.09.2009

(24) 10.03.2010

(46) 10.03.2010, Бюл.№ 5, 2010 р.

(72) КОВАЛЬ АНАТОЛІЙ ДАНИЛОВИЧ, АНДРІЄНКО АНАТОЛІЙ ГЕОРГІЙОВИЧ, ГАЙДУК СЕРГІЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ, КОНОНОВ ВІТАЛІЙ ВЛАДИСЛАВОВИЧ, МИХАЙЛОВ СЕРГІЙ БОРИСОВИЧ, ЗАМКОВИЙ ВАСИЛЬ ЄВГЕНІЙОВИЧ, ГНАТЕНКО ОЛЕГ ВІТАЛІЙОВИЧ, КРАСЬКО АНТОН ЮРІЙОВИЧ

(73) ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(57) Ливарний жароміцний нікелевий сплав, що містить вуглець, хром, кобальт, вольфрам, молібден, алюміній, ніобій, тантал, реній, цирконій, бор,

нікель, який відрізняється тим, що містить компоненти в наступному співвідношенні, мас. %:

|          |             |
|----------|-------------|
| вуглець  | 0,04-0,10   |
| хром     | 4,7-5,3     |
| кобальт  | 5,0-6,0     |
| вольфрам | 6,4-7,0     |
| молібден | 0,4-0,8     |
| алюміній | 5,7-6,3     |
| ніобій   | 0,6-1,0     |
| тантал   | 7,7-8,3     |
| реній    | 1,7-2,3     |
| цирконій | 0,020-0,030 |
| бор      | 0,005-0,015 |
| нікель   | решта.      |

Корисна модель відноситься до галузі металургії, зокрема, до виробництва ливарних високожароміцних нікелевих сплавів, призначених для литва лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації як до авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД), так і до наземних енергетичних та газоперекачувальних установок (ГТУ).

Відомий ливарний жароміцний нікелевий сплав ЖС26У [1], взятий за аналог, що містить компоненти, мас. %:

|          |       |
|----------|-------|
| вуглець  | 0,15  |
| хром     | 5,0   |
| кобальт  | 9,0   |
| вольфрам | 11,7  |
| молібден | 1,1   |
| алюміній | 5,8   |
| титан    | 1,0   |
| ніобій   | 1,6   |
| цирконій | 0,05  |
| бор      | 0,015 |
| нікель   | решта |

Суттєвим недоліком цього сплаву є те, що він має низькі показники високотемпературної корозійної (ВТК) стійкості і недостатню жароміцність при підвищених температурах в умовах довготривалої експлуатації лопаток у агресивних середовищах.

Найбільш близьким по технічній суті до результату, що досягається є ливарний високожаро-

міцний нікелевий сплав ЖС32 [1], що містить компоненти, мас. %:

|          |       |
|----------|-------|
| вуглець  | 0,15  |
| хром     | 5,0   |
| кобальт  | 9,0   |
| вольфрам | 8,3   |
| молібден | 1,0   |
| алюміній | 6,0   |
| ніобій   | 1,5   |
| тантал   | 4,0   |
| реній    | 4,0   |
| цирконій | 0,05  |
| бор      | 0,015 |
| нікель   | решта |

Недоліками даного сплаву є те, що він має високу вартість за рахунок вмісту в хімічному складі дуже дефіцитного і дорогого елементу ренію (4 %, за масою), що робить його вживання, як матеріал робочих лопаток до наземних газових турбін, економічно недоцільним.

Крім того, сплав ЖС32 має недостатню корозійну стійкість в умовах довготривалої дії високих температур (до 1000°C), що негативно впливає на характеристики жароміцності.

В основу корисної моделі поставлено завдання розробки ливарного жароміцного нікелевого сплаву, який має кращі показники високотемпературної корозійної стійкості з еквівалентним рівнем характеристик жароміцності, в порівнянні зі спла-

(19) UA (11) 48242 (13) U

вом-найближчим аналогом, при значно меншій вартості.

Поставлене завдання досягається тим, що сплав, який заявляється, містить вуглець, хром, кобальт, вольфрам, молібден, алюміній, ніобій, тантал, реній, цирконій, бор та нікель при наступному співвідношенні компонентів, мас. %:

|          |             |
|----------|-------------|
| вуглець  | 0,04-0,10   |
| хром     | 4,7-5,3     |
| кобальт  | 5,0-6,0     |
| вольфрам | 6,4-7,0     |
| молібден | 0,4-0,8     |
| алюміній | 5,7-6,3     |
| ніобій   | 0,6-1,0     |
| тантал   | 7,7-8,3     |
| реній    | 1,7-2,3     |
| цирконій | 0,020-0,030 |
| бор      | 0,005-0,015 |
| нікель   | решта       |

Саме сукупність цих компонентів та їх співвідношення забезпечують досягнення нового технічного результату - отримання ливарного жароміцного нікелевого сплаву, який має кращі показники корозійної стійкості з еквівалентним рівнем механічних властивостей, в порівнянні зі сплавом-найближчим аналогом, при значно меншій вартості.

Досягається це тим, що при вмісту вуглецю в межах 0,04 - 0,10 %, кобальту в межах 5,0 - 6,0 %, вольфраму в межах 6,4 - 7,0 %, молібдену в межах 0,4 - 0,8 %, ніобію в межах 0,6 - 1,0 %, танталу в межах 7,7 - 8,3 %, ренію в межах 1,7 - 2,3 %, цирконію в межах 0,020 - 0,030 %, бору в межах 0,005 - 0,015 %, значно покращується збалансованість багатокомпонентної системи легування.

Зменшення концентрації вуглецю, цирконію та бору, в порівнянні з найближчим аналогом, підвищує пластичність за рахунок зменшення в структурі запропонованого сплаву об'ємної долі карбоборидної фази, поліпшенням її морфології і термодинамічної стабільності. При цьому покращуються технологічні характеристики сплаву при отриманні литва методом спрямованої (моно) кристалізації.

Зменшення вмісту кобальту, вольфраму, молібдену, ніобію та ренію, в порівнянні з найближчим аналогом, покращує параметри високотемпературної корозійної стійкості без помітного зниження характеристик жароміцності, при цьому суттєво знижується вартість сплаву. Одночасно покращується збалансованість багатокомпонентної системи легування, і відповідно, поліпшується структурна стабільність за рахунок зниження об'ємної кількості несприятливих фаз пластинчастої морфології.

Підвищення вмісту танталу сумарно компенсує позитивний вплив дуже дорогого і дефіцитного ренію, який є найбільш ефективним елементом, що зміцнює твердий розчин, а також компенсує позитивний вплив інших вищезгаданих легуючих елементів на характеристики жароміцності, при цьому значно покращуються показники високотемпературної корозійної стійкості.

Таким чином, нові ознаки при взаємодії з відомими ознаками забезпечують виявлення нових

технічних властивостей - розроблено ливарний жароміцний нікелевий сплав, який має значно меншу вартість і кращу корозійну стійкість. При цьому, в порівнянні з найближчим аналогом, забезпечується еквівалентний рівень механічних властивостей при підвищених температурах.

Для експериментальної перевірки були отримані монокристалічні зразки [001] з запропонованого сплаву і сплаву-найближчого аналога методом спрямованої (моно) кристалізації на установці УВНК-8П відповідно до серійної технології, зі швидкістю 10 мм/хв.

Виливки монокристалічних зразків експериментальних складів «1»-«5» і найближчого аналога пройшли 100 % контроль макроструктури шляхом травлення та контроль кристалографічного орієнтування (КГО) на установці ДРОН-3М.

Хімічний склад експериментальних сплавів «1»-«5» і сплаву-найближчого аналога контролювався хімічним і оптико-емісійним спектральним (ОЕС) аналізом.

Після відповідної термічної обробки проводилися механічні випробування зразків моно [001] експериментальних сплавів «1»-«5», в порівнянні з найближчим аналогом, за стандартними методами: на короточасну міцність (ГОСТ 9651-73) за температур випробувань 20, 800, 900, 1000 °C і довготривалу міцність (ГОСТ 10145-81) за температур випробувань 800, 900 і 1000 °C.

Випробування на ВТК- стійкість зразків моно [001] сплавів «1»-«5», в порівнянні з найближчим аналогом, проводилися в синтетичній золі, що містить продукти згоряння рідкого газотурбінного палива за температури 850°C протягом 600 годин. Синтетична зола в кількості (15мг/см<sup>2</sup>) наносилася на поверхню зразків. Склад синтетичної золи: 66,2 % Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 20,4 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 8,3 % NiO, 3,3 % CoC, 1,8 % V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Високотемпературна корозійна стійкість зразків сплавів оцінювалася за середньої швидкості корозії  $\bar{V}_q, \text{г/м}^2 \cdot \text{с}$ .

Аналіз результатів порівняльних механічних випробувань на короточасну і довготривалу міцність показав, що експериментальні сплави «4» і «5», які містять 7,4 % і 8,6 % танталу, а також 1,4 % і 2,6 % ренію відповідно, мають характеристики жароміцності помітно нижчі, ніж експериментальні сплави «1»-«3» та сплав-найближчий аналог ЖС32.

Аналіз результатів порівняльних випробувань на корозійну стійкість показав, що швидкість корозії в зразках всіх експериментальних сплавів «1»-«5» значно менша, ніж в зразках сплаву - найближчого аналога ЖС32, що, в основному, обумовлено збільшенням співвідношення концентрації Ta/Re в їхньому складі. Запропонований сплав, що заявляється, має в 2 - 2,5 рази меншу швидкість корозії при еквівалентному рівні характеристик жароміцності, в порівнянні зі сплавом - найближчим аналогом ЖС32.

Таким чином, в результаті комплексних досліджень запропонований сплав ЖС32Е (ЗМІ-ЗУМ2), що заявляється, має майже у двічі (~ на 45-50 %) меншу вартість, ніж сплав-найближчий аналог ЖС32, за рахунок більш економного легування

ренієм та іншими вищезгаданими легуючими елементами. Очікуваний економічний ефект, який буде отримано за рахунок зниження сумарної варто-

сті легуючих компонентів, що міститься в 1 тонні сплаву, складе більше 1 млн. грн.

Отримані результати досліджень представлені в таблицях 1-4.

Таблиця 1

## Хімічний склад сплавів

| №  | Сплав             | Вміст легуючих елементів %, за масою |     |     |     |     |     |     |     |     |       |       |      |
|----|-------------------|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|------|
|    |                   | C                                    | Cr  | Co  | W   | Mo  | Al  | Nb  | Ta  | Re  | Zr    | B     | Ni   |
|    | Найближчий аналог | 0,15                                 | 5,0 | 9,0 | 8,3 | 1,0 | 6,0 | 1,5 | 4,0 | 4,0 | 0,050 | 0,015 | Реш. |
| 1. | Запропонований    | 0,04                                 | 4,7 | 5,0 | 6,4 | 0,4 | 5,7 | 0,6 | 7,7 | 1,7 | 0,020 | 0,005 | Реш. |
| 2. |                   | 0,07                                 | 5,0 | 5,5 | 6,7 | 0,6 | 6,0 | 0,8 | 8,0 | 2,0 | 0,025 | 0,010 | Реш. |
| 3. |                   | 0,10                                 | 5,3 | 6,0 | 7,0 | 0,8 | 6,3 | 1,0 | 8,3 | 2,3 | 0,030 | 0,015 | Реш. |
| 4. |                   | 0,07                                 | 5,0 | 5,5 | 6,7 | 0,6 | 6,0 | 0,8 | 7,4 | 1,4 | 0,025 | 0,010 | Реш. |
| 5. |                   | 0,07                                 | 5,0 | 5,5 | 6,7 | 0,6 | 6,0 | 0,8 | 8,6 | 2,6 | 0,025 | 0,010 | Реш. |

Сплави, що представлено в таблиці 1 містили компоненти в кількості, відповідно: нижній границі, що заявляється, відповідає сплав № 5; верхній границі, що заявляється, відповідає сплав № 3; оптимальному складу сплаву, що заявляється, відповідає сплав № 2; нижче за нижню границю, що заявляється, відповідає сплав № 4, де вміст

танталу складає 7,4 %, ренію 1,4 %; вище за верхню границю, що заявляється, відповідає сплав № 5, де вміст танталу складає 8,6 %, ренію 2,6 %. Інші компоненти у складі сплавів № 4 і № 5 узяті в оптимальному співвідношенні - визначеному, як середнє значення.

Таблиця 2

## Результати порівняльних механічних випробувань зразків моно [001] сплавів на короткочасну міцність

| №  | Сплав             | T <sub>вип.</sub> , °C | σ <sub>B</sub> , МПа | σ <sub>0,2</sub> , МПа | δ, %  |
|----|-------------------|------------------------|----------------------|------------------------|-------|
| 1. | Запропонований    | 20                     | 1045                 | 810                    | 8,7   |
| 2. |                   |                        | 1050                 | 815                    | 8,2   |
| 3. |                   |                        | 1055                 | 820                    | 7,9   |
| 4. |                   |                        | 940                  | 770                    | 9,5   |
| 5. |                   |                        | 1035                 | 790                    | 7,8   |
|    | Найближчий аналог |                        | 1060                 | 820                    | 7,5   |
| 1. | Запропонований    | 800                    | 1035                 | 810                    | 7,8   |
| 2. |                   |                        | 1045                 | 820                    | 7,4   |
| 3. |                   |                        | 1050                 | 825                    | 6,9   |
| 4. |                   |                        | 920                  | 730                    | 9,1   |
| 5. |                   |                        | 1010                 | 780                    | 6,9   |
|    | Найближчий аналог |                        | 1050                 | 820                    | 6,5   |
| 1. | Запропонований    | 900                    | 945                  | 800                    | 7,7   |
| 2. |                   |                        | 955                  | 805                    | 17,04 |
| 3. |                   |                        | 960                  | 810                    | 16,6  |
| 4. |                   |                        | 820                  | 690                    | 19,1  |
| 5. |                   |                        | 920                  | 800                    | 16,3  |
|    | Найближчий аналог |                        | 960                  | 810                    | 16,0  |
| 1. | Запропонований    | 1000                   | 680                  | 580                    | 19,1  |
| 2. |                   |                        | 690                  | 590                    | 18,7  |
| 3. |                   |                        | 695                  | 600                    | 18,4  |
| 4. |                   |                        | 540                  | 420                    | 22,0  |
| 5. |                   |                        | 665                  | 560                    | 18,9  |
|    | Найближчий аналог |                        | 700                  | 600                    | 18,0  |

Таблиця 3

Результати порівняльних механічних випробувань зразків моно [001] сплавів на довготривалу міцність

| №                 | Сплав          | Т <sub>вип.</sub> , °С | σ <sub>100</sub> , МПа | σ <sub>1000</sub> , МПа | δ <sub>100</sub> , % | δ <sub>1000</sub> , % |
|-------------------|----------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1.                | Запропонований | 800                    | 675                    | 560                     | 14,0                 | 19,5                  |
| 2.                |                |                        | 685                    | 570                     | 13,5                 | 18,0                  |
| 3.                |                |                        | 690                    | 580                     | 12,5                 | 17,5                  |
| 4.                |                |                        | 610                    | 490                     | 17,0                 | 23,0                  |
| 5.                |                |                        | 660                    | 520                     | 12,0                 | 17,0                  |
| Найближчий аналог |                |                        | 695                    | 580                     | 11,5                 | 16,5                  |
| 1.                | Запропонований | 900                    | 460                    | 340                     | 13,5                 | 41,5                  |
| 2.                |                |                        | 475                    | 350                     | 12,5                 | 39,5                  |
| 3.                |                |                        | 480                    | 360                     | 11,5                 | 38,5                  |
| 4.                |                |                        | 400                    | 290                     | 16,0                 | 45,5                  |
| 5.                |                |                        | 430                    | 315                     | 10,5                 | 38,0                  |
| Найближчий аналог |                |                        | 480                    | 355                     | 10,0                 | 37,5                  |
| 1.                | Запропонований | 1000                   | 240                    | 175                     | 15,5                 | 16,5                  |
| 2.                |                |                        | 245                    | 185                     | 14,5                 | 15,5                  |
| 3.                |                |                        | 250                    | 190                     | 13,5                 | 14,5                  |
| 4.                |                |                        | 190                    | 130                     | 19,5                 | 21,0                  |
| 5.                |                |                        | 230                    | 150                     | 13,0                 | 14,0                  |
| Найближчий аналог |                |                        | 250                    | 185                     | 14,0                 | 14,5                  |

Таблиця 4

Результати порівняльних випробувань на ВТК- стійкість зразків моно [001] сплавів за температури 850°С протягом 600 годин

| №                 | Сплав          | Т <sub>вип.</sub> , °С | $\frac{T_a}{Re}$ | Середня швидкість корозії, $\bar{V}_q, \text{г/м}^2 \cdot \text{с}$ |
|-------------------|----------------|------------------------|------------------|---|
| 1.                | Запропонований | 850                    | 4,5              | $3,8 \cdot 10^{-4}$   |
| 2.                |                |                        | 4,0              | $4,5 \cdot 10^{-4}$   |
| 3.                |                |                        | 3,6              | $5,7 \cdot 10^{-4}$   |
| 4.                |                |                        | 5,3              | $3,1 \cdot 10^{-4}$   |
| 5.                |                |                        | 3,3              | $7,0 \cdot 10^{-4}$   |
| Найближчий аналог |                |                        | 1,0              | $9,1 \cdot 10^{-4}$   |

Аналіз проведених досліджень показав, що використання запропонованого сплаву ЖС32Е (ЗМІ-ЗУМ2) дозволяє отримувати лопатки методом спрямованої (моно) кристалізації з покращеною корозійною стійкістю і еквівалентним рівнем характеристик жароміцності, в порівнянні зі спла-

вом-найближчим аналогом. При цьому запропонований сплав має значно меншу вартість.

Джерела інформації:

1. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов /Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов и др. [Текст]. - М.: Машиностроение, 1997. - С. 44.