

investigated. It was determined that produced coatings have locally heterogeneous structure, which is a supersaturated solid solution of alloying elements and iron, in addition enriched by carbides of zirconium, titanium, chrome, which increase the surface microhardness from 3.5 to 9.9 GPa.

УДК 621. 669.14.018

### *Властивості ливарного сплаву на основі евтектики нікель-карбід ванадію*

Г. П. Дмитрієва, кандидат технічних наук

Т. С. Черепова, кандидат технічних наук

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ

*Досліджено властивості евтектичного композиту на основі нікелю з карбідом ванадію. Експериментально встановлено комплекс легуючих елементів, який дозволяє отримати ливарні сплави з температурою плавлення не нижче 1300 °С зі стабільним фазовим складом і структурою. Визначені твердість при кімнатній температурі і зносостійкість в умовах, наближених до умов експлуатації лопаток газотурбінних двигунів в температурному інтервалі від 20 до 100 °С. Сплав отримано промисловим способом, запатентовано і рекомендовано до впровадження в якості матеріалу для захисту контактних поверхонь робочих лопаток газотурбінних двигунів замість серійного нікелевого сплаву ВЖЛ-2.*

**В**имоги до експлуатаційних характеристик газотурбінних двигунів постійно зростають, підвищуються робочі температури до 1000 – 1100 °С, збільшуються питомі навантаження на контактуючі деталі двигуна, внаслідок чого вони окислюються і зношуються. Поверхні верхніх бандажних полиць є одним з елементів робочої лопатки турбіни, які зношуються найбільше [1].

Метою роботи було вивчення можливості створення ливарного евтектичного композиційного матеріалу на нікелевій основі із температурою плавлення не нижче 1300 °С і зносостійкістю вищою, ніж у серійного сплаву на нікелевій основі ВЖЛ-2, який плавиться при 1220 – 1260 °С і застосовується для захисту контактуючих поверхонь лопаток газотурбінних двигунів (ГТД) від зношування при температурах до 900 °С [2].

Здатність фаз втілення підвищувати твердість сплавів евтектичного складу на основі більшості промислових сплавів [3] може бути вирішенням поставленої задачі. Відомо, що монокарбіди перехідних металів знаходяться у термодинамічній рівновазі з металами групи заліза, утворюючи квазібінарні системи з діаграмою плавлення евтектичного типу [4]. Евтектичні карбіди створюють армуючий ефект і надають сплаву міцності та твердості і ці властивості тим вищі, чим більший вміст карбідної фази в евтектиці. Серед карбідів металів IV і V груп найбільшу об'ємну долю в евтектиці з нікелем ( $\approx 15$  об. %) при температурі плавлення 1310 °С має карбід ванадію, тому евтектичні сплави системи Ni-VC обрані об'єктом

## Структура і фізико-механічні властивості

дослідження. Відомо, що карбід ванадію використовується в сплавах на основі нікелю в кількості 1 – 3 % по масі для підвищення твердості і корозійної стійкості в середовищі, що містить фтор [5].

При створенні промислового сплаву нікелева основа потребує легування для надання їй твердорозчинної міцності, оптимальних умов для утворення  $\gamma'$ -фази, тому експериментально підібраний комплекс легуючих елементів в сукупності з карбідним зміцненням має забезпечити потрібний рівень властивостей ливарного сплаву на основі нікелю з карбідом ванадію для захисту бандажних полиць робочих лопаток ГТД від зношування в умовах експлуатації.

Для визначення діапазону концентрацій легуючих компонентів та їх впливу на температуру плавлення сплавів виготовили одинадцять ливарних композицій різного складу (табл. 1) плавленням шихти в дуговій лабораторній печі вольфрамовим електродом, що не витрачається, в атмосфері чистого аргону. Шихтовими матеріалами слугували нікель електролітичний НО (99,8), хром електролітичний ЕРХ (99,5), титан йодидний Ті (99,9), алюміній А-995 (99,95), молібден МЧШ-1 (99,98), ванадій електролітичний ВЕЛ-1 (99,94). Склад отриманих сплавів контролювали методом флуоресцентного рентгеноспектрального аналізу на спектрометрі VRA-30. Комплекс легуючих елементів для нікелевої основи сплаву обрано по аналогії зі сплавом ВЖЛ-2. При цьому додатково в склад сплаву ввели кобальт, який підвищує температуру повної розчинності  $\gamma'$ -фази, пластичність і в'язкість, не знижуючи температуру плавлення сплавів і зменшили вміст молібдену, надлишок якого веде до зниження жаростійкості нікелю, а також вилучили залізо, яке погіршує жароміцність.

Таблиця 1

Склад та температура плавлення сплавів на основі нікелю

| Зразок | Склад сплаву, % (по масі) |     |     |     |      |     |      |     |      | Температура плавлення, $\pm 10$ °C |
|--------|---------------------------|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|------|------------------------------------|
|        | Co                        | Ti  | Mo  | W   | Cr   | Al  | V    | C   | B    |                                    |
| 1      | 12,0                      | 1,5 | 4,8 | 4,5 | 8,0  | 3,8 | 10,5 | 0,8 | -    | 1280                               |
| 2      | 16,0                      | 3,0 | 7,5 | 5,0 | 13,5 | 6,0 | 12,0 | 0,7 | 0,01 | 1260                               |
| 3      | 12,0                      | 0,5 | 5,0 | 2,0 | 9,1  | 2,7 | 8,5  | 2,5 | -    | 1270                               |
| 4      | 14,0                      | 1,5 | 4,5 | 4,9 | 9,0  | 3,6 | 9,2  | 1,8 | 0,02 | 1330                               |
| 5      | 11,0                      | 4,8 | 3,0 | 2,0 | 10,5 | 5,5 | 4,5  | 0,7 | 0,03 | 1240                               |
| 6      | 13,8                      | 2,0 | 4,7 | 5,2 | 9,5  | 3,8 | 4,6  | 0,9 | 0,02 | 1340                               |
| 7      | 13,5                      | 1,0 | 4,0 | 2,5 | 14,0 | 5,0 | 6,2  | 1,0 | 0,01 | 1290                               |
| 8      | 10,0                      | 1,2 | 5,0 | 2,8 | 7,2  | 2,0 | 5,5  | 0,8 | -    | 1280                               |
| 9      | 13,0                      | 3,5 | 5,2 | 6,0 | 12,0 | 3,0 | 10,0 | 2,0 | -    | 1320                               |
| 10     | 12,0                      | 4,0 | 6,0 | 3,0 | 11,8 | 3,5 | 5,0  | 1,9 | 0,02 | 1300                               |
| 11     | 13,5                      | 2,0 | 4,0 | 7,3 | 12,0 | 3,2 | 8,0  | 0,8 | 0,01 | 1290                               |

Згідно даним диференціального термічного аналізу, отриманим за допомогою високотемпературного диференціального термічного аналізатора

ВДТА-8М в атмосфері гелію з контрольованою швидкістю нагрівання та охолодження 80 град/хвилину, температура солідус досліджених легованих сплавів коливається в межах 1240 – 1340 °С в залежності від складу сплаву. Найбільш впливовими на цю характеристику виявились вольфрам і титан. Оптимальний вміст хрому в сплавах встановлено в інтервалі між 8 і 12 %. Надлишок викликає утворення нерівноважної фази на основі хрому і, як наслідок, зниження температури солідусу. Для легування визначено комплекс легуючих елементів, який містить (% по масі): хром 8 – 12, вольфрам 3 – 6, молібден 4 – 6, титан 1 – 4, алюміній 3 – 5, кобальт 12 – 13. Оптимально легований сплав з максимальною температурою плавлення  $1320 \pm 20$  °С, що значно вище температурного режиму робочих лопаток ГТД, містить 11 – 12 % карбиду ванадію.

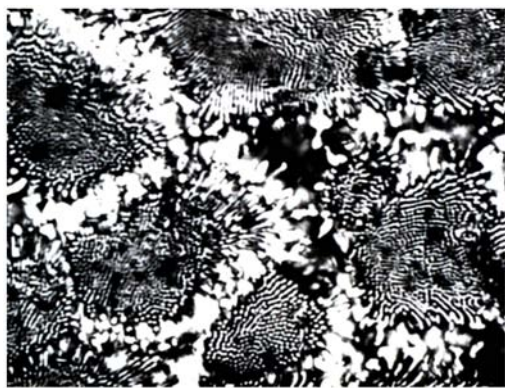


Рис. 1. Мікроструктура сплаву на основі нікелю з карбідом ванадію.  $\times 500$ .

Така кількість карбиду ванадію зумовлює евтектичну структуру отриманих сплавів. В структурі сплаву оптимального складу (рис. 1), присутні евтектичні колонії з пластинчасто-волокнистою формою карбідів ванадію. Карбідна складова сплавів евтектичного походження відіграє важливу роль у наданні сплаву таких структурно залежних властивостей, як зносостійкість і твердість. Сплаву притаманна твердість 515 – 520 HV при кімнатній температурі.

Легування не викликає виникнення додаткових нерівноважних фаз, про що свідчать дослідження сплавів оптимального складу методом рентгенівського фазового аналізу (РФА) на дифрактометрі HZG в мідному  $K_\alpha$  випромінюванні. Фазами сплаву є твердий розчин на основі нікелю з періодом ґратки  $a_0 = 0,3591$  нм і карбід ванадію з періодом ґратки  $a_0 = 0,4205$  нм. Фазовий склад сплавів залишається стабільним до температури вище 1100 °С за даними РФА.

Зносостійкість сплавів на основі ливарного евтектичного композиту Ni-VC визначали на газодинамічному стенді ДКН-1 для випробовування конструктивно-технологічних способів підвищення зносостійкості деталей ГТД в умовах динамічного контактного навантаження при підвищених температурах в атмосфері згоряння авіаційного палива [6]. При цьому в зоні контакту спряжених деталей внаслідок різних процесів тертя виникають процеси схоплення, високотемпературного окислення. Визначали величину об'ємного зносу  $I_v \cdot 10^6$  мм<sup>3</sup>/цикл за один цикл коливань з базою іспитів  $0,5 \times 10^6$  циклів з амплітудою взаємного переміщення 0,696 мм, частотою 33 Гц, при питомому навантаженні в контакті 2,3 і 4,75 кГ/мм<sup>2</sup> при температурах від кімнатної до 1000 °С в агресивному середовищі. В табл. 2 наведено результати випробовувань сплавів з максимальною температурою плавлення. Випробовування варіантів сплаву з нижчою температурою

Таблиця 2

Зносостійкість сплавів при газодинамічному навантаженні P

| Зразок | Знос сплаву $I_v \cdot 10^6 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ |      |      |       |                            |       |      |      | $T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$ |
|--------|---|------|------|-------|----------------------------|-------|------|------|---------------------------------|
|        | P = 2,3 кГ/мм <sup>2</sup>                            |      |      |       | P = 4,7 кГ/мм <sup>2</sup> |       |      |      |                                 |
|        | 20  | 500  | 800  | 1000  | 20                         | 500   | 800  | 1000 |                                 |
| 4      | -   | -    | 0,22 | 0,045 | -                          | -     | 0,38 | 1,75 | 1330                            |
| 6      | 0,20  | 0,57 | 0,21 | 0,016 | 0,9                        | 0,587 | 0,27 | 1,57 | 1340                            |
| 9      | -   | 0,30 | 0,18 | 0,042 | -                          | -     | -    | 1,70 | 1320                            |
| ВЖЛ-2  | 0,23  | 1,30 | 0,25 | 0,280 | -                          | 1,350 | 0,94 | 4,50 | 1260                            |

плавлення прийняте недоцільним. При навантаженні 2,3 кГ/мм<sup>2</sup> досліджені сплави переважають по зносостійкості серійний сплав майже вдесятеро, при навантаженні 4,7 кГ/мм<sup>2</sup> – в 2 – 3 рази. Гістограма (рис. 2) при останньому навантаженні наглядно демонструє перевагу евтектичного композиційного матеріалу на основі легованого нікелю з карбідом ванадію над серійним сплавом ВЖЛ-2.

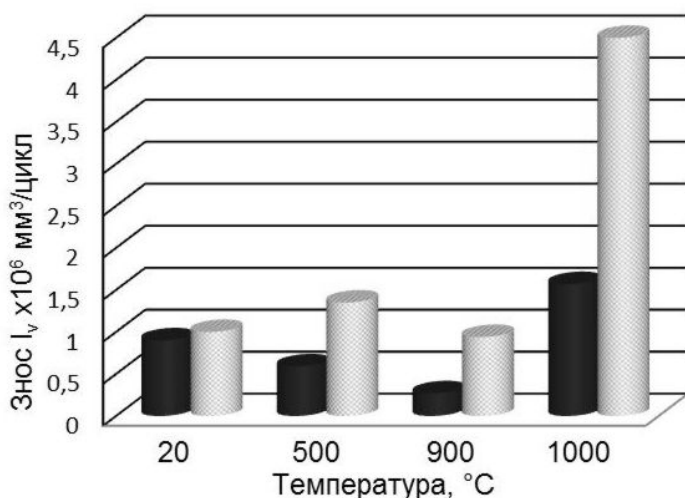


Рис. 2. Інтенсивність зношування евтектичного композиту на основі нікелю з карбідом ванадію (■) в порівнянні з серійним сплавом (■).

На розроблений сплав отримано патент [7]. Сплав виготовляється ливарним способом і для притаманних йому властивостей не потребує додаткової термічної чи якоїсь іншої обробки. Розроблений сплав рекомендовано для впровадження в якості матеріалу для захисту торців бандажних полиць робочих лопаток ГТД від зношування при підвищених температурах.

## Література

1. Шкалов И.И., Ильинкова Т.А., Ковалев А.А. Применение износостойких покрытий при доводке узлов и деталей газотурбинных двигателей большого ресурса // Защитные покрытия на металлах. – 1991. – 25. – С. 91 – 93.

2. Пейчев Г.И., Замковой В.Е., Андрейченко Н.В. Сравнительные характеристики износостойких сплавов для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток газотурбинных двигателей // Вестник двигателестроения. – 2009. – 2. – С. 123 – 125.
3. Шурин А.К., Дмитриева Г.П., Панарин В.Е. Твердость квазибинарных эвтектических сплавов с фазами внедрения // Металлофизика. – 1979. – 76. – С. 81 – 85.
4. Шурин А.К., Дмитриева Г.П. Современное состояние и перспективы развития исследований квазибинарных и квазитройных сплавов железа, кобальта и никеля с карбидами (обзор) // Диаграммы состояния карбид- и нитридсодержащих систем. – Киев: ИПМ АН УССР, 1981. – С. 28 – 32.
5. Третьяков В.И., Тимофеева С.В., Ромашов В.Н. Взаимодействие карбида ванадия с никель-молибденовым сплавом // Порошковая металлургия. – 1994. – 1 – 2. – С. 59 – 62.
6. Івченко Л.І., Андрієнко А.Г. Метод трибологічних випробувань матеріалів за умов циклічного силового та температурного навантаження // Металознавство та обробка металів. – 1996. – 3. – С. 62 – 65.
7. Патент України на винахід № 102213, МПК С22С 19/05 від 10.06.2013. Ливарний сплав на основі нікелю / Г. П. Дмитрієва, Т. С. Черепова. – Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України.

Одержано 26.02.14

**Г. П. Дмитриева, Т. С. Черепова**

### **Свойства литейного сплава на основе эвтектики никель-карбид ванадия**

#### **Резюме**

Исследованы свойства эвтектического композита на основе никеля с карбидом ванадия. Экспериментально установлен комплекс легирующих элементов, который позволяет получить литейные сплавы с температурой плавления не ниже 1300 °С со стабильными фазовым составом и структурой. Определены твердость при комнатной температуре и износостойкость в условиях, приближенных к условиям эксплуатации лопаток газотурбинных двигателей в температурном интервале от 20 до 1000 °С. Сплав получен промышленным способом, запатентован и рекомендован к внедрению в качестве материала для защиты контактных поверхностей рабочих лопаток газотурбинных двигателей вместо серийного никелевого сплава ВЖЛ-2.

**G. P. Dmitrieva, T. S. Cherepova**

### **Properties of cast alloy based on eutectic nickel-vanadium carbide**

#### **Summary**

The properties of the eutectic composite based on nickel with vanadium carbide were established. Complex of alloying components, allowing to obtain the cast nickel-based alloy with a melting point of not lower than 1300 °С with a stable phase composition and structure was developed. Hardness at room temperature and wear-resistance under the conditions close to the operating of gas turbine engine blades in a temperature range from 20 to 1000 °С were determined. The alloy of optimal composition is obtained by industrial method, patented and proposed to introduce as a material to protect the contacting surfaces blades of gas turbine from wear instead of standard alloy ВЖЛ-2.