

Т.С. Черепова, Г.П. Дмитрієва, А.В. Носенко, О.М. Семирга

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

ЗНОСОСТІЙКИЙ СПЛАВ ДЛЯ ЗАХИСТУ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ РОБОЧИХ ЛОПАТОК АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ ВІД ОКИСЛЕННЯ ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ



Розроблено зносостійкий та жаростійкий ливарний сплав на основі кобальту для зміцнення контактних поверхонь робочих лопаток авіаційних газотурбінних двигунів замість серійних сплавів ХТН-61 і ВЖЛ-2. Високі показники жаростійкості досягнуто комплексним легуванням (модифікацією) сплаву. На основі досліджень жаростійкості, зносостійкості, структури та температури плавлення сплавів встановлено оптимальний хімічний та фазовий склад розробленого сплаву.

Ключові слова: сплави кобальту, карбід ніобію, легування, жаростійкість, температура плавлення, зносостійкість.

Розробка новітньої техніки потребує створення нових багатофункціональних матеріалів, зокрема сплавів, які повинні задовольняти цілому комплексу різноманітних складних вимог, що виникають при їх експлуатації. Особливо гостро ця проблема стоїть при розробці сплавів для авіаційної та космічної техніки, де підвищення робочої температури у камері згоряння двигунів навіть на декілька градусів суттєво збільшує їх потужність, ефективність роботи, розширює можливості літального апарату.

Ресурс роботи авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) визначається надійністю та довговічністю найбільш відповідальних деталей його гарячого тракту, таких, як робочі та соплові лопатки, контактуючі поверхні яких працюють в агресивному середовищі при високих температурах та змінних навантаженнях на протязі довготривалого часу і працездатність яких багато в чому залежить від їх опору до зношування.

Зміцнення контактуючих поверхонь нанесенням на них більш зносостійкого матеріалу,

ніж матеріал лопатки, дозволяє подовжити строк експлуатації лопаток до ремонту, а сам ремонт полягає в заміні шару зношеного матеріалу, а не в заміні лопаток. Існуючі сплави даного призначення — нікелеві сплави ВЗК і ВЖЛ-2, розробки ВІАМ [1] (Росія) — з температурою плавлення в інтервалі 1220÷1260 °С зносостійкі при роботі тільки до 900 °С. Це не відповідає ні підвищеним робочим температурам двигунів, які досягають 1100 °С, ні іншим технологічним вимогам виготовлення лопаток, наприклад дегазації і пайці при 1270 °С.

ПОСТАНОВКА ПИТАННЯ

Сплав ХТН-61 розробки Інституту металофізики (ІМФ) НАНУ ім. Г.В. Курдюмова [2], який успішно працює в діапазоні робочих температур 20÷1000 °С, виявився недостатньо жаростійким при підвищених робочих температурах (до 1100 °С). Враховуючи потребу підвищення інтенсивності та економічності роботи ГТД, що пов'язано з подальшим збільшенням робочої температури лопаток до 1100 °С, в ІМФ НАНУ були проведені дослідження з метою пошуку шляхів підвищення експлуата-

ційних властивостей серійного сплаву ХТН-61, зокрема його жаростійкості. В результаті виконання інноваційного проекту була визначена область складів, яка є перспективною для розробки зносостійкого і жаростійкого ливарного сплаву на основі кобальту, і встановлено оптимальний склад сплаву для зміцнення контактних поверхонь робочих лопаток авіаційних газотурбінних двигунів замість серійних сплавів ВЖЛ-2 та ХТН-61.

Експлуатаційні умови, яким повинен відповідати розроблений матеріал, такі:

- ✦ питомі контактні навантаження — ≥ 20 МПа;
- ✦ діапазон робочих температур — $20 \div 1100$ °С;
- ✦ висока рівномірна зносостійкість в діапазоні робочих температур, не нижча, ніж у сплаву ХТН-61;
- ✦ зварюваність матеріалу з лопатковим сплавом ЖС-32 має бути не гіршою, ніж сплаву ХТН-61;
- ✦ температура плавлення — ≥ 1300 °С, що задовольняє умовам технологічного процесу (1270 °С — дегазація і пайка);
- ✦ структурна і фазова стабільність у процесі експлуатації в робочому інтервалі температур;
- ✦ доступна технологія виробництва — лиття без термообробки;
- ✦ робоче середовище — газове середовище продуктів згоряння газу.

Головна вимога при розробленні нового матеріалу — досягнення жаростійкості, яка має забезпечити ресурс лопатки не менше 12 000 год при таких температурних режимах:

- ✦ при максимальній температурі матеріалу 1110 °С напрацювання становить 2,5 % від ресурсу;
- ✦ при температурі матеріалу 950 °С напрацювання становить 25 % від ресурсу;

✦ на всіх інших режимах температура матеріалу — не вище 915 °С.

Крім того, сплави мають бути технологічними — мати добрі ливарні властивості, добре обробляться, бути термостійкими, напаяюватись на матеріал лопатки.

Дослідницькі роботи по підвищенню жаростійкості сплаву марки ХТН-61 проводилися в ІМФ на базі евтектики Co—NbC шляхом розробки оптимального комплексу легування, який обрано на підставі аналізу складу різноманітних промислових сплавів на основі кобальту [3–6] та експериментальних даних випробувань зразків сплавів на жаростійкість, термостійкість, температуру плавлення та зносостійкість. На основі отриманих даних було визначено область складу перспективних сплавів, які в порівнянні зі сплавом ХТН-61 мають приблизно таку ж зносостійкість, але в 10–20 разів (залежно від складу та тривалості випробувань) більш високу жаростійкість. Такі сплави містять не більше 19,0 мас. % карбиду ніобію (NbC) і включають як легуючі добавки хром, вольфрам, алюміній та залізо. Визначені межі вмісту легуючих елементів (табл. 1) є основою патенту України № 39450 «Сплав на основі кобальту» [7].

Розробка базується на власних дослідженнях фазових рівноваг в сплавах систем Co—NbC, Co—Al—W, Co—Nb—C та побудові їх діаграм плавлення, в яких встановлено евтектичні температури, межі фазових областей та межі розчинності.

Нашим завданням була оптимізація складу сплаву в межах вмісту ніобію і вуглецю як основних карбидоутворюючих елементів та по комплексу легуючих елементів: хрому, алюмінію, заліза і вольфраму для отримання сплаву, який буде застосовуватись як зносостійкий і жаростійкий матеріал для нанесення на бан-

Таблиця 1

Базові межі вмісту елементів

Nb	C	Cr	Al	W	Fe	Co
13,5–17	1,6–1,9	5–25	2–3,5	6–12	2–5	решта

дажні полиці робочих лопаток авіаційних газотурбінних двигунів з метою захисту їх від високотемпературного окислення і зношування під час експлуатації, тобто подовження міжремонтного ресурсу.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Визначення карбідної складової

Основою сплаву є двофазна евтектика системи Co—NbC, яка містить ~12 мас. % NbC при температурі плавлення ~1400 °C. Легування, необхідне для зміцнення кобальтової основи сплаву, знижує і температуру плавлення, і вміст карбідної складової в евтектиці. Тому найважливішим завданням було отримати евтектичні леговані сплави на основі кобальту з температурою плавлення, не нижчою 1300 °C, і з оптимальним вмістом карбиду ніобію, який забезпечує мінімальне зношування. При цьому слід враховувати ливарний метод виготовлення сплавів, при якому сплави з вмістом карбідної фази набагато більшим, ніж у складі

евтектичної точки на діаграмі плавлення системи Co—NbC, неможливо перемішати і вилити у форми без утворення ливарних дефектів через втрату ними рідкоплинності.

Деякі легуючі карбідоутворюючі елементи частково розчиняються в карбіді ніобію, утворюючи карбід (Nb, Me)C, тому експериментально було встановлено загальний вміст вуглецю в сплаві, при якому не буде його небажаного надлишку. Цей надлишок обумовлює часткове розплавлення сплаву при температурах, нижчих від 1300 °C, внаслідок утворення нерівноважних фаз. Представлені в табл. 2 результати термічного аналізу кобальтових сплавів свідчать, що для різних співвідношень вольфраму, алюмінію та заліза має бути встановлений строго певний діапазон вмісту вуглецю, який забезпечує утворення евтектичних карбідів.

Дослідження і порівняння температури плавлення сплавів дало можливість виключити з розгляду ті елементи, які розплавляються при температурі нижче 1300 °C. Наприклад, збіль-

Таблиця 2

Вплив вуглецю на характер плавлення сплавів

№ пор.	Вміст компонентів, мас. %				Температура теплових ефектів, °C	
	W	Al	Fe	C	1-й додатковий пік	2-й пік (плавлення)
1	4,5	4	—	1,8	—	1320
2	4,5	4	—	1,95	—	1330
3	4,5	4	—	2,1	1294	1316
4	6	4	—	1,8	—	1315
5	6	4	—	1,95	1290	1320
6	6	4	—	2,1	1280	1300
7	6	4	3	1,7	—	1310
8	9	4,25	—	1,8	—	1280
9	9	4,25	—	1,95	1270	1300
10	9	4,25	—	2,1	1270	1290
11	9	4,25	3	1,7	—	1310
12	7	4,25	3	1,9	1275	1310
13	7	4,25	3	1,8	—	1320
14	7	4,25	3	1,75	—	1315
ВЖЛ-2						1220

Примітка. Всі зразки містять також 20 % — Cr, 15,5 % — Nb, решта — Co.

шення вмісту вуглецю до 2,1 % в сплаві № 3 призводить до появи додаткового ефекту на термічній кривій (рис. 1) у порівнянні зі сплавом № 4, який містить 1,8 % вуглецю і на термічній кривій якого присутній тільки ефект, пов'язаний з його плавленням (рис. 2). Температура плавлення отриманих сплавів, яка перевищує 1300 °С, робить недоцільним подальше дослідження сплаву ВЖЛ-2, температура плавлення якого значно нижча.

З урахуванням вимог при виготовленні сплаву та того факту, що для утворення карбіду ніобію конгруентного плавлення $\text{NbC}_{0,9}$ необхідно дотримуватися певного співвідношення ніобію та вуглецю, яке становить приблизно 8,5, було експериментально встановлено, що оптимальний вміст карбіду ніобію в сплаві обмежується 18 мас. %.

2. Випробування на жаростійкість

Обґрунтування вибору температури випробувань сплавів на жаростійкість базується на тому факті, що максимальна робоча температура матеріалу, яка складає 2,5 % від ресурсу, становить 1100 °С. Зразки для визначення жаростійкості вирізали з литих заготовок методом іскрової різки або виточували на токарному станку, обміряли їх площу поверхні з точністю $\pm 0,1 \text{ мм}^2$ і зважували з точністю $\pm 0,001 \text{ г}$. Кожен зразок знаходився в окремому тиглі, виготовленому з окису алюмінію.

Нагрівання в електричній печі опору до температури 1100 °С на повітрі контролювалося термопарою, витримка становила 10 год і охолодження здійснювалося разом з піччю. Процедура повторювали п'ять разів. Загальна витримка зразків при температурі 1100 °С становила, таким чином, 50 год. Жаростійкість сплаву визначали по збільшенню ваги зразка після кожних 10 год відпалу, віднесеного до його площі поверхні ($\Delta m/s$).

Як свідчать результати вимірювання, показані в табл. 3, майже всі сплави мають значно кращу жаростійкість, ніж серійний сплав ХТН-61. Перевага досліджених сплавів значно збільшується при збільшенні терміну ви-

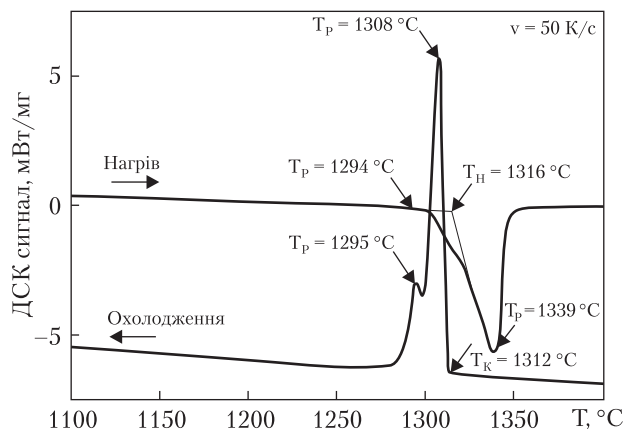


Рис. 1. Термічні криві сплаву № 3 ($C = 2,1$)

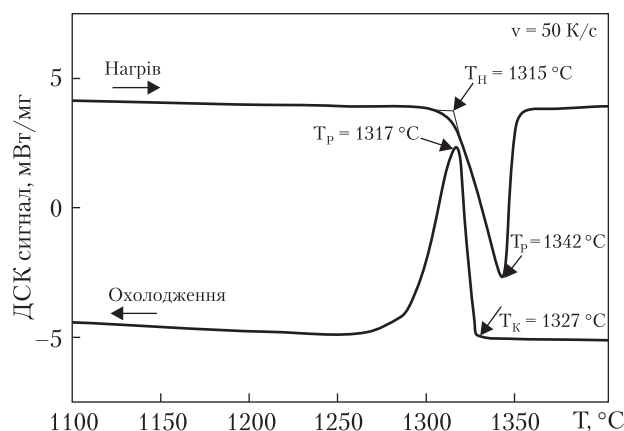


Рис. 2. Термічні криві сплаву № 4 ($C = 1,8$)

тримки при високих температурах. Якщо при відпалі зразків протягом 10 год ця перевага сягає 3–5 разів, то при збільшенні часу до 50 год перевага збільшується в 20–25 разів.

3. Визначення оптимального вмісту легуючих елементів

Визначення оптимального вмісту легуючих елементів в сплаві для досягнення найвищих показників необхідних властивостей базується на відомостях про межі їх розчинності в сплавах систем Co-Cr , Co-W , Co-Al та Fe-Co .

Хром і алюміній ефективніше від інших елементів покращують стійкість до високотемпературного окислення завдяки утворенню плі-

вок Al_2O_3 (внутрішніх) і Cr_2O_3 (зовнішніх), однак цей позитивний вплив досягається лише при певному співвідношенні хрому і алюмінію в сплаві. Хром суттєво впливає на жаростійкість сплавів на основі кобальту, якщо його вміст залишається в межах твердого розчину і не може бути суттєво збільшений внаслідок утворення крихкої σ -фази. Він збільшує стійкість кобальту проти окислення і одночасно збільшує його міцність при високій температурі. Подвійні сплави кобальту з 20; 25 чи 30 % хрому мають приблизно однакове окислення, з тією лише різницею, що сплав з 25 % хрому окислюється повільніше. При такому ж значенні його вмісту досягається і найбільше збільшення жароміцності [8]. У випадку надлишку вуглецю і достатньої кількості хрому в сплавах з'являється легкоплавка евтектика $Co-Cr_{23}C_6$ з температурою плавлення, нижчою за $1270^\circ C$. Наявність цієї евтектики не можна допустити через необхідність термічної обробки робочих лопаток при високих температурах ($1265-$

$1270^\circ C$ — пайка і дегазація). Отже, для досягнення високого рівня жаростійкості оптимальним є вміст хрому на рівні 20 мас. %.

Введення в сплави на основі кобальту 3—4 % алюмінію знижує швидкість їх окислення [9]. При збільшенні його вмісту понад 6 мас. %, що перевищує межі розчинності, знижується температура плавлення, однак алюміній є обов'язковою легуючою добавкою в промислових кобальтових сплавах. Його функція полягає в утворенні початкового дрібнодисперсного оксидного шару на поверхні тертя. При подальшому нагріванні відбувається окислення інших елементів, для яких мікрокристали Al_2O_3 можуть відігравати роль центрів кристалізації. При цьому забезпечується подрібнення структури утворюваних оксидних шарів. Крім того, при наявності хрому алюміній забезпечує його дифузію з глибинних шарів на поверхню. При вмісті хрому на рівні 20 мас. % і алюмінію ~4 мас. % забезпечується найбільш високі показники жаростійкості сплавів.

Таблиця 3

Жаростійкість сплавів

№ пор.	Склад зразків, мас. %					$T_{пл}, ^\circ C$	Збільшення ваги зразків, мг / мм ²										
							1060 °C					1100 °C					
	Cr	W	Al	Fe	C		Тривалість відпалу, год.										
							10	20	30	40	50	10	20	30	40	50	
15	20	7,5	3,5	—	1,9	1310	4,5	4,0	3,5	3,0	2,6	12,0	10,1	8,7	7,8	7,0	
16	20	7,5	3,5	3,0	1,9	1310	1,7	1,63	1,37	1,4	1,31						
17	20	6,0	4,0	3,0	1,9	1280	2,3	2,13	2,2	2,5	2,03						
23	20	7,0	2,0	5,0	1,8	1320						8,54	8,25	5,19	4,94	3,71	
26	20	9,0	3,5	3,0	1,7	1315						7,0	5,68	4,27	3,28	2,16	
27	20	12	2,5	3,0	1,6	1300						4,82	4,12	3,93	3,69	2,1	
28	20	4,5	4,0	3,0	1,9	1280	2,1	1,97	1,77	1,8	1,9						
29	20	10	3,0	3,0	1,9	1310	2,5	2,3	2,1	1,9	1,7						
30	25	9,0	2,0	3,0	1,8	1315						7,33	4,13	3,74	2,86	2,1	
31	20	7,5	3,5	6,0	1,8	1315	6,5	5,6	5,1	4,8	4,5	13,9	12,6	11,5	10,4	9,1	
32	20	10	3,0	1,5	1,8	1310	4,2	3,55	3,16	2,8	2,66	9,0	7,8	6,9	5,5	4,2	
		ХТН-61				1320	13,3	14,0	14,6	156	16,7	25,8	29,1	33,5	47,9	50,5	

Примітка. Всі зразки сплавів містять також 15,5 мас. % — Nb, решта — Co.

Для досягнення високої зносостійкості при температурах, вищих 1000 °С, або для збереження її на рівні сплаву ХТН-61 необхідне збільшення твердості і міцності при високих температурах, що досягається для сплаву на основі евтектики Со—NbС шляхом зміцнення твердого розчину вольфрамом. Підвищення жаростійкості легуванням алюмінієм та зносостійкості — вольфрамом вимагає фундаментальних досліджень меж сумісної розчинності цих елементів в твердому розчині на основі кобальту, відомості про які дає потрійна діаграма станів системи Со—Al—W в області сплавів, багатих на кобальт [10, 11]. Оптимальний вміст вольфраму в сплаві встановлений на рівні 10 мас. %, а вміст алюмінію не перевищує 2 мас. %.

Незначна кількість заліза (оптимально — 3 %) додається в сплав для стабілізації фазового перетворення кобальту ($\alpha \leftrightarrow \epsilon$). Таке легування мало впливає на властивості оптимізованого сплаву, тому що в такій малій кількості залізо повністю розчиняється у твердому розчині.

4. Випробування сплавів на зношування

Однією з вимог до нового матеріалу було збереження зносостійкості на рівні ХТН-61, тому сплави підлягали перевірці на зношування. Випробування на високотемпературну зно-

состійкість проводилися на стенді, де імітувались умови роботи робочих лопаток газотурбінних авіаційних двигунів відносно швидкості нагрівання, робочої температури, складу атмосфери та характеру механічної взаємодії поверхонь кромки лопаток (навантаження та амплітуда коливань). Для зразків використовувались Т-подібні державки, а параметри випробування були такі: температура випробування — 20 і 1100 °С, навантаження — 50 МПа, амплітуда взаємного переміщення — 1,5 мм. Випробуванням на високотемпературну зносостійкість було піддано 12 зразків, кращі результати випробувань представлені в табл. 4. Зносостійкість визначалася втратою об'єму зразка за один цикл коливань.

Металографічне дослідження сплавів після випробування на зносостійкість включало зовнішній огляд, вивчення топографії зон контактного зносу і металографічний аналіз в зоні фретингового зносу. При розгляді напаяних пластин під бінокулярним мікроскопом було встановлено, що при підвищених температурах пластини окислювалися до темно-сірого кольору без істотних слідів лушення і відшарування окислів (рис. 3).

Усім зразкам більшою чи меншою мірою притаманні такі особливості фретинг-зносу, як лінійний знос, наявність слідів взаємного пере-

Таблиця 4

Зносостійкість сплавів

№ зразка	W	Al	Fe	C	Температура плавлення, °С	Знос сплавів, $I_v \times 10^6 \text{ мм}^3/\text{цикл}$	
						20 °С	1100 °С
20	9,0	5,0	3,0	1,7	1270	0,18	48,0
23	7,0	2,0	5,0	1,8	1320	0,25	15,1
24	4,5	5,0	3,0	1,8	1310	0,12	77,0
25	7,0	4,25	3,0	1,8	1310	0,30	65,0
26	9,0	3,5	3,0	1,7	1315	0,25	15,0
27	12,0	2,5	3,0	1,6	1300	0,24	14,9
ХТН-61					1350	0,25	15,0

Примітка. Всі зразки сплавів містять також 20 мас. % — Cr, 15,5 мас. % — Nb, решта — Со.

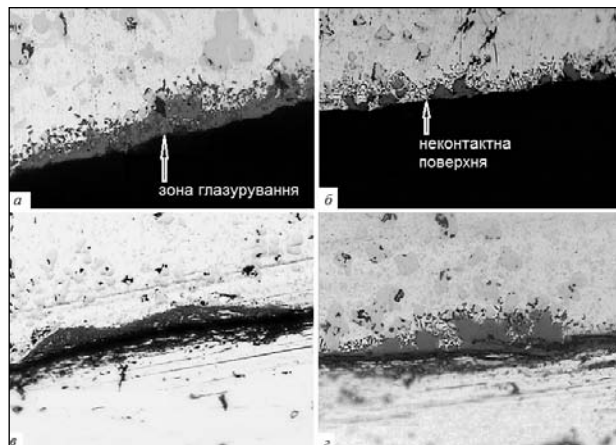


Рис. 3. Окислення сплаву ХТН-62 при випробуваннях на знос при 1050 °С ×400: а, б – на контактній поверхні в зоні глазурування; в, г – на неконтактній поверхні

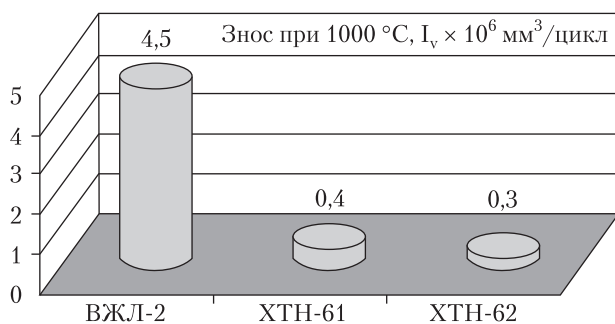


Рис. 4. Зношування сплавів при 1000 °С

міщення матеріалу впоперек контактних площин (уздовж осі зразка), схоплювання, взаємне перенесення металу, розвальцьовування з утворенням задирки, утворення рівної блискучої (глазурованої) поверхні в зоні контакту.

Позитивним фактом є процес глазурування поверхні, оскільки така поверхня дуже щільна, відрізняється високою твердістю і зносостійкістю. Металографічним аналізом встановлено, що в зоні глазурування утворилися щільні аморфні окисли. Усі варіанти досліджених сплавів показали високий рівень зносостійкості і, як наслідок, прийнятний стан контактних поверхонь. Порівняння величин зношування сплавів ВЖЛ-2, ХТН-61 та ХТН-62 при 1000 °С показано на рис. 4.

Результати вимірювання зносостійкості досліджуваних сплавів і сплавів ВЖЛ-2 та ХТН-61 при 1000 °С в однакових умовах іспитів на стенді свідчать, що при визначеному вмісті хрому, ніобію, вольфраму, алюмінію, вуглецю та заліза вони не поступаються по зносостійкості серійним.

Сплави мають високу термостійкість в режимі випробувань від $T_{\text{мін}} = 200 \text{ °С}$ до $T_{\text{макс}} = 1100 \text{ °С}$. За 1000 циклів випробувань не було зафіксовано жодної тріщини.

З урахуванням вищенаведеного аналізу отриманих даних щодо впливу легування на температуру плавлення, термостійкість, жаростійкість та зносостійкість сплавів на основі кобальту з карбідом ніобію було визначено оптимальний склад сплаву, який переважає існуючі серійні сплави ВЖЛ-2 та ХТН-61 за експлуатаційними характеристиками. Новому складу присвоєна марка ХТН-62.

5. Дослідження мікроструктури

Відомо, що механічні властивості сплавів — структурно чутливі. Розроблений сплав завдяки достатній об'ємній частині зміцнюючої карбідної фази і її армуючому ефекту, регулярній термостабільній евтектичній структурі має високу зносостійкість в широкому діапазоні температур, питомих навантажень і швидкостей ковзання.

При розробці сплаву було встановлено, що найбільш оптимальною є помірно заевтектична структура, оскільки такий сплав містить найбільшу допустиму кількість карбідної фази. При більшому вмісті карбідної фази виплавка методом індукційної плавки у вогнетривких тиглях стає неможливою через різке підвищення температури кінця плавлення сплаву (ліквідусу). Крім того, в такому сплаві розвивається крихкість через надмірне укрупнення первинних кристалів карбідної фази. При меншій кількості карбідної фази (напр., в чисто евтектичному сплаві) високотемпературна зносостійкість буде істотно нижчою. Типова структура сплаву ХТН-62 зображена на рис. 5.

Найбільш оптимальна структура сплаву представлена первинними (надлишковими) кристалами карбіду ніобію та подвійною евтектикою, яка містить дві фази — твердий розчин легуючих елементів в кобальті і слабо легований карбід ніобію. Карбідні кристали в формі дендритів оточені пластинчато-волокнистою евтектикою. Порівняння мікроструктури сплавів до та після відпаду при температурі 1100 °С протягом 50 год дає підстави стверджувати про структурну стабільність досліджених сплавів.

Таким чином, на основі досліджень жаростійкості, зносостійкості, структури та температури плавлення сплавів встановлено оптимальний хімічний та фазовий склад кобальтового ливарного сплаву за вмістом ніобію, хрому, вуглецю, алюмінію, вольфраму та заліза. Оптимізований сплав, якому присвоєно марку ХТН-62, переважає існуючі сплави даного призначення, бо йому притаманні:

- ✦ висока рівномірна зносостійкість в температурному інтервалі 20÷1100 °С в умовах згорання авіаційного палива, що забезпечує суттєве збільшення міжремонтного ресурсу ГТД;
- ✦ температура плавлення сплаву (1320 ± ± 10 °С) задовольняє умовам технологічного процесу виробництва двигунів;
- ✦ висока жаростійкість, вища в 10 разів від серійного сплаву ХТН-61, за присутності інших властивостей дає можливість вибору матеріалу для конкретних умов експлуатації;
- ✦ висока термостійкість;
- ✦ структурна та фазова стабільність до 0,8 — 0,9 $T_{пл}$.

Для подальшого промислового виробництва оптимізовано металургійну технологію виготовлення сплаву методом індукційної плавки у вакуумі чи захисній атмосфері без термообробки, яка полягає в дотриманні заданої послідовності плавлення і температурних та часових показників цього процесу, що забезпечує його відповідність заданому хімічному складу та температурі плавлення. Завдяки дотриманню положень розробленого технологічного регламенту в сплавах досягнуто мінімальної кіль-

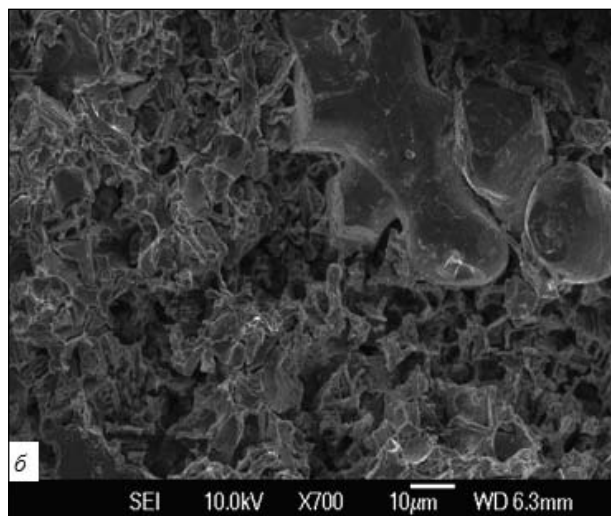


Рис. 5. Типова структура сплаву ХТН-62: а — світловий мікроскоп НЕОРНОТ-2 ×300; б — растровий електронний мікроскоп JM7000F



Рис. 6. Зливки сплаву ХТН-62

кості ливарних дефектів — пор, плівок та включень, а також допустимих меж вмісту домішок при використанні технічних марок шихтових матеріалів. Підприємство-партнер проекту — ТОВ «Мелта» за розробленою технологією виготовило 3 зливки сплаву ХТН-62 загальною вагою 20 кг (рис. 6), з яких на ДП «ЗМКБ «Прогрес» були виготовлені пластини і нанесені на кромки бандажних полиць робочих лопаток турбіни для випробування на двигуні. Сплав перебуває на стадії впровадження і пройшов підконтрольні польотні випробування на 2000 год. Прийнято рішення продовжити випробування до 7000 год.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено оптимальний склад нового жаростійкого і зносостійкого ливарного сплаву на кобальтовій основі з карбідним зміцненням на основі дослідження фазових рівноваг в системах Co—NbC, Co—Al—W, Co—Nb—C, який не має аналогів в СНД. Сплав знаходиться на стадії впровадження на ДП «ЗМКБ «Прогрес».

2. Встановлено оптимальний вміст легуючих елементів в сплаві, що забезпечує досягнення найкращих властивостей, а саме:

- ✦ високої рівномірної зносостійкості в температурному інтервалі використання (до 1100 °С) в умовах згорання авіаційного палива, що забезпечує суттєве збільшення міжремонтного ресурсу ГТД;
- ✦ температури плавлення 1320 ± 10 °С, що задовольняє умовам технологічного процесу виробництва двигунів;
- ✦ жаростійкості, що на порядок перевищує жаростійкість серійного сплаву ХТН-61 при збереженні інших властивостей.
- ✦ структурної та фазової стабільності (до $0,8 - 0,9 T_{пл}$).

ЛІТЕРАТУРА

1. ОСТ 1-90126-85. Сплавы жаропрочные литейные вакуумной выплавки.

2. Патент України на винахід № 8240А. Сплав на основі кобальту / Шурін А.К., Дмитрієва Г.П., Черепова Т.С., Андрійченко Н.В., Івченко Л.Й. // Бюлетень № 1, 29.03.1996.
3. *Суперсплавы* П. Жаропрочные металлы для аэрокосмических и промышленных установок. Пер. с англ. Ред. Ч.Т. Симс — М.: Металлургия, 1995. — 384 с.
4. *Жаропрочные* сплавы на основе кобальта для применения в газовых турбинах. — Mater. Sci. and Eng. — 1987. — 88. — С. 11—19.
5. *Резник И.Д., Соболев С.Н., Худяков В.М.* Кобальт. Т.1. — М.: Машиностроение, 1995. — 440 с.; Т. 2. — М.: Машиностроение, 1996. — 470 с.
6. *Physical Properties of Materials, Materials Engineering // Materials Selector.* — 1987, dec.; 1986. — V. 103, N T. — 12. — P. 81—83.
7. Патент України на корисну модель №39450. Сплав на основі кобальту / Шурін А.К., Черепова Т.С., Андрійченко Н.В., Замковий В.Є. // Бюл. №4, 25.02.2009.
8. *Жаропрочные* материалы. Пер. с англ. А.С. Соболева, В.С. Новика. — М.: Металлургия, 1969. — 304 с.
9. *Ф.М. Перельман, А.Я. Зворыкин.* Кобальт и никель. — М.: Наука, 1975. — 215 с.
10. *Дмитрієва Г.П., Черепова Т.С., Шурін А.К.* Фазові рівноваги в сплавах системи Co—CoAl—W // Металознавство та обробка металів. — 2005. — № 4. — С. 3—6.
11. *Дмитрієва Г.П., Черепова Т.С., Шурін А.К.* Фазові рівноваги в сплавах системи Co—CoAl—W // Металознавство та обробка металів. — 2006. — № 2. — С. 22—25.

Т.С. Черепова, Г.П. Дмитрієва,
А.В. Носенко, А.М. Семирга

ИЗНОСОСТОЙКИЙ СПЛАВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАБОЧИХ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ОКИСЛЕНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Разработан износостойкий и жаростойкий литейный сплав на основе кобальта для упрочнения контактных поверхностей рабочих лопаток авиационных газотурбинных двигателей вместо серийных сплавов ХТН-61 и ВЖЛ-2. Высокие показатели жаростойкости достигнуты комплексным легированием (модификацией) сплава. На основе исследований жаростойкости, износостойкости, структуры и температуры плавления сплавов установлен оптимальный химический и фазовый состав разработанного сплава.

Ключевые слова: сплавы кобальта, карбид ниобия, легирование, жаростойкость, температура плавления, износостойкость.

*T.S. Cherepova, G.P. Dmitrieva,
A.V. Nosenko, A.M. Semirga*

WEAR-RESISTANT ALLOY FOR PROTECTION
OF CONTACT SURFACES OF WORKING AIRCRAFT
ENGINE BLADES FROM OXIDATION AT HIGH
TEMPERATURES

Wear-resistant and heat-resistant cast cobalt-based alloy for hardening of the contact surfaces of working blades of aircraft gas turbine engines instead of commercial alloys

XTH-61 and ВЖЛ-2 was developed. High levels of heat resistance were achieved by complex doping (modification) of the alloy. Based on studies of heat resistance, wear-resistance, the structure and melting point of the alloys, the optimum chemical and phase composition of the developed alloy was defined.

Key words: cobalt alloys, niobium carbide, alloying, heat resistance, melting point, wear resistance.

Стаття надійшла до редакції 13.02.14