

УДК 669 018.28.225.620.193.22

ВПЛИВ РЕНІЮ НА ЖАРОТРИВКІСТЬ СПЛАВУ КОБАЛЬТУ З КАРБІДОМ НІОБІЮ

Г. П. ДМИТРИЄВА, Т. С. ЧЕРЕПОВА, Т. А. КОСОПУКОВА, Т. В. ПРЯДКО

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

Методами фізико-хімічного аналізу досліджено вплив 1...9 mass% ренію на температуру плавлення, структуру і жаротривкість ливарного серійного сплаву ХТН-62, який застосовують для захисту від зношування контактуючих поверхонь робочих лопаток газотурбінних двигунів (ГТД). Встановлено, що за оптимального його вмісту від 3 до 9 mass% опір сплаву окисненню при 1100°C підвищується вдвічі. При цьому температура плавлення зберігається не нижче 1300°C і не змінюється структура, тому він перспективний для використання в жорсткіших умовах роботи ГТД.

Ключові слова: кобальт, карбід ніобію, евтектика, серійний сплав ХТН-62, реній, жаротривкість, температура плавлення, структура.

Вступ. У конструкціях турбін сучасних газотурбінних двигунів (ГТД) часто застосовують лопатки з бандажованими полицями, які мають на бокових торцях контактні площадки для забезпечення жорсткості їх зв'язку після збирання в колесо. Пошкодження бандажних полиць – один з головних чинників, які обмежують ресурс лопаток і двигуна загалом. Ефективно збільшити тривалість роботи лопаток можна, наносячи на контактні поверхні бандажних полиць зносотривкі матеріали. З цією метою Інститут металофізики НАН України разом з ДП “Івченко-Прогрес”, використовуючи результати власних досліджень фазових рівноваг у сплавах системи С–Со–Nb і умов кристалізації сплаву евтектичного складу на квазібінарному перерізі Со–NbС [1], розробили серійні зносотривкі при температурах $\geq 1000^\circ\text{C}$ сплави: ХТН-61, який забезпечив ресурс роботи двигуна понад 6000 h [2], та його жаротривкіший аналог ХТН-62 [3]. Ці сплави, що використовуються у литому стані і не потребують термічної обробки, застосовують для виробництва нових та ремонту старих двигунів для літаків АН-124, АН-225, АН-148 та на інших підприємствах ДП “Івченко-Прогрес”, а також АТ “Мотор Січ” [4, 5]. З розвитком космічної та авіаційної промисловості умови роботи ГТД ускладнюються і підприємства зацікавлені у вдосконаленні сплавів, зокрема, в підвищенні їх жароміцності зі збереженням високотемпературної зносотривкості. Нижче визначено вплив додаткового легування ренієм серійного сплаву ХТН-62, щоб підвищити його стійкість до окиснення при 1100°C зі збереженням температури плавлення не нижче 1300°C, структури та фазового стану.

Методи дослідження. Виливки сплаву ХТН-62, який містив від 1 до 9 mass% ренію, виготовляли у лабораторній електродуговій печі з невитратним вольфрамовим електродом на охолоджуваному мідному поді шляхом шестиразового переплаву в очищеному аргоні. Хімічний склад сплавів визначали за допомогою флуоресцентного рентгеноспектрального аналізу на спектрометрі VRA-30. Зразки вирізали з литих виливків методом іскрового різання або виточували на токарному станку, шліфували, вимірювали їх площу поверхні з похибкою $\pm 0,1 \text{ mm}^2$, поміщали в тиглі з окису алюмінію, накриті кришкою, зважували з похибкою $\pm 0,01 \text{ g}$

і окиснювали у повітрі при 1100°C. Випробували у п'ять етапів, кожен з яких охоплював нагрів до 1100°C упродовж 1 h, ізотермічну витримку 10 h і подальше охолодження з пічкою. Після кожного етапу зразки зважували разом з тиглем, отримуючи залежність зміни їх маси з часом. Найтриваліша ізотермічна витримка при 1100°C становила 50 h. Жаротривкість визначали за збільшенням маси зразка після кожних 10 h відпалу, віднесеної до площі його поверхні ($\Delta m = (m_n - m_0)/s$). Температуру фазових перетворень розраховували методом диференційної сканівної калориметрії (DSC) приладом "Netzsch DSK 404 F1 Pegasus" зі швидкістю нагріву та охолодження 3000°C/h. Продукти окиснення аналізували методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (ЕДС) на устаткуванні JSM-7100F Schottky Field Emission Scanning Electron Microscop (JEOL). Для мікроструктурного аналізу використали оптичний мікроскоп "Neofot-32".

Результати та обговорення. Ливарний сплав створювали на базі евтектики Co–NbC, яка містить 12 mass% NbC при 1420°C і після комплексного легування відповідає вимогам для створення на її основі матеріалу для захисту від зношування торців бандажних полиць. Використання евтектичних сплавів для розроблення зносотривких високотемпературних природних композитів залежить від термодинамічної рівноваги між її компонентами – металом-основою і фазою втілення – карбідом тугоплавкого металу [6, 7]. Відстань між такими карбідами мінімальна, що обмежує довжину площі проковзування дислокацій, а отже, сприяє композиційному зміцненню.

Одним зі шляхів оптимізувати властивості серійного сплаву є легування елементами, здатними підвищити жаротривкість кобальту. Як такий елемент обрали реній, який давно в кількості від 3 до 6 mass% використовують у жароміцних нікелевих сплавах для лопаток газових турбін, щоб підвищити температурну роботоздатність внаслідок структурної стабілізації γ -твердого розчину і диспергування γ' -фази [8]. Склад легованих ренієм сплавів подано в табл. 1. У дослідних зразках дещо змінювали вміст притаманних базовому сплаву легувальних компонентів, зокрема Cr, W, Al, Fe, Nb, C [9].

Таблиця 1. Склад досліджених сплавів, mass%

№ сплаву	Co	Cr	W	Al	Fe	Nb	Re	C
1	66,7	13,0	5,0	1,0	1,0	11,0	1,0	1,3
2	58,5	15,0	6,0	2,0	2,0	13,0	2,0	1,5
3	43,6	20,0	9,5	2,0	3,0	15,5	4,5	1,9
4	43,7	20,0	9,5	2,0	3,0	15,5	4,5	1,8
5	45,7	18,0	9,5	2,0	3,0	15,5	4,5	1,8
6	49,7	14,0	9,5	2,0	3,0	15,5	4,5	1,8
7	42,7	20,0	9,5	2,0	3,0	16,5	4,5	1,8
8	42,2	20,0	9,5	2,0	3,0	15,5	6,0	1,8
9	41,2	18,0	9,5	2,0	3,0	15,5	9,0	1,8
ХТН-62	48,2	20,0	9,5	2,0	3,0	15,5	–	1,8

Температура плавлення сплаву ХТН-62 за даними, отриманими методом DSC, становить 1315°C і є однією з найважливіших характеристик, що уможливує його використання в авіабудуванні. Тому найважливіше завдання – не знизити її легуванням. Виявили (рис. 1), що температура початку плавлення (солідус) сплавів на основі ХТН-62, легованих ренієм, не нижче 1300°C (табл. 2) і зівставна з температурою плавлення серійного сплаву оптимального складу. Під час випроб встановили, що 20% хрому в сплаві забагато, оскільки проявляється додатко-

вий термічний ефект за охолодження, пов'язаний з утворенням інтерметаліду CoCr_2 . Зменшуючи його вміст до 18% за однакової кількості ренію, цього можна уникнути (рис. 1а–с). За перегрівання на $\approx 100^\circ\text{C}$ вище температури солідусу форма зразка не змінюється. Таким чином, температура початку плавлення сплаву ХТН-62 під час легування 1...9 mass% Re не знижується, а інтервал плавлення – від 20 до 30°C .

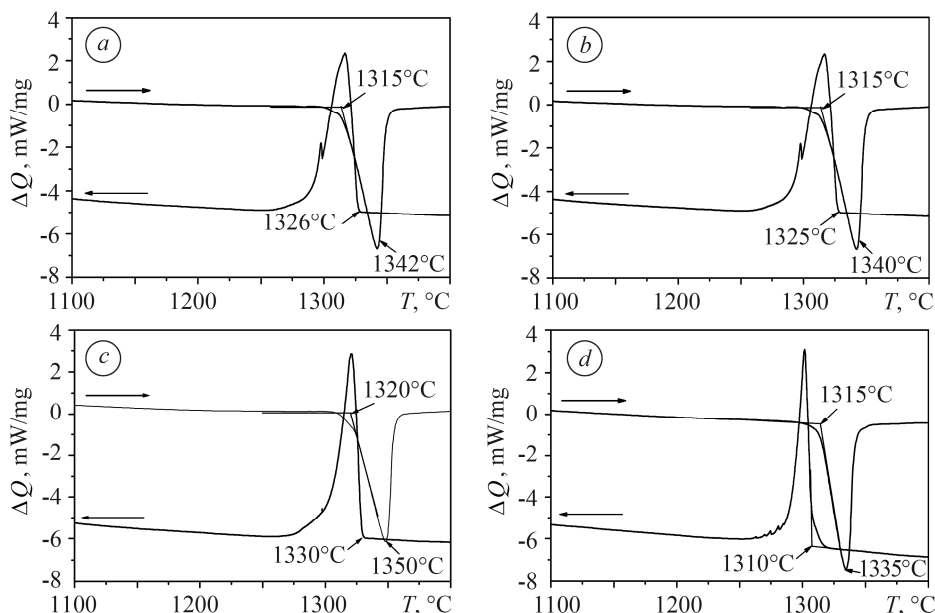


Рис. 1. Криві нагрівання та охолодження сплаву ХТН-62, додатково легуваного ренієм: а – без ренію; б – з 20 Cr і 4,5% Re; с – з 18 Cr і 4,5% Re; д – з 18 Cr і 9% Re.

Fig. 1. Curves of heating and cooling of the XTH-62 alloy, additionally doped with rhenium: a – without rhenium; b – from 20 Cr and 4.5% Re; c – from 18 Cr and 4.5% Re; d – from 18 Cr and 9% Re.

Таблиця 2. Температура плавлення та жаротривкість сплавів

№ сплаву	Температура плавлення, $\pm 10^\circ\text{C}$	Збільшення маси, $\Delta m/s, \times 10^{-5}, \text{g/mm}^2$				
		Тривалість відпалу, h				
		10	20	30	40	50
1	1300	7,60	9,40	11,40	13,50	15,50
2	1315	5,54	7,34	8,86	10,10	10,70
3	1315	4,77	7,34	8,44	9,17	10,27
4	1305	4,84	6,29	7,74	10,16	12,10
5	1320	4,88	5,65	8,74	9,76	9,76
6	1335	5,05	5,05	7,07	10,11	12,02
7	1340	3,00	7,22	9,54	12,94	16,20
8	1320	10,44	11,41	13,15	13,08	13,36
9	1315	3,02	4,36	5,40	5,40	6,92
ХТН-62	1315	7,62	9,57	11,75	13,80	21,50

Дослідженим сплавам притаманна типова структура помірно заевтектичних двофазних серійних кобальтових сплавів з карбідом ніобію, структурними складниками яких є нерозвинені дендрити твердого розчину на основі кобальту (світла фаза) та карбіду ніобію (темна) в евтектиці (рис. 2).

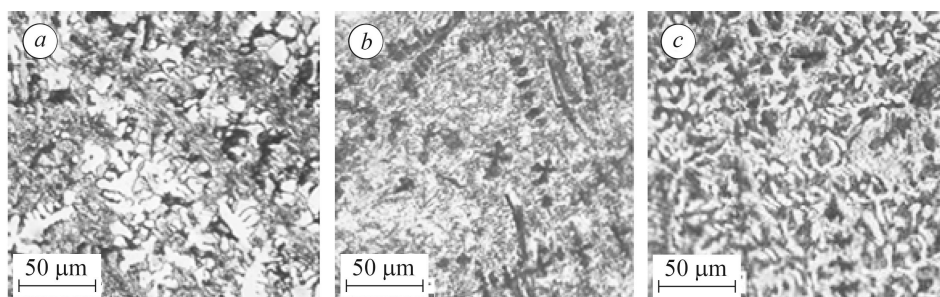


Рис. 2. Структура серійного ливарного сплаву ХТН-62 з різним вмістом ренію ($\times 500$): $a - 1\%$; $b - 4,5\%$; $c - 9\%$.

Fig. 2. Structure of XTH-62 alloy with different rhenium content ($\times 500$): $a - 1\%$; $b - 4.5\%$; $c - 9\%$.

За результатами дослідження, тривкість легованих ренієм сплавів до окиснення після 50 h циклічного відпалу при 1100°C вища, ніж серійного. Апроксимація отриманих даних до 100 h свідчить про те, що окиснення з часом уповільнюватиметься. Розподіл елементів у поверхневому шарі сплаву з вмістом 4,5% Re після 50 h окиснення ілюструє картограма (рис. 3).

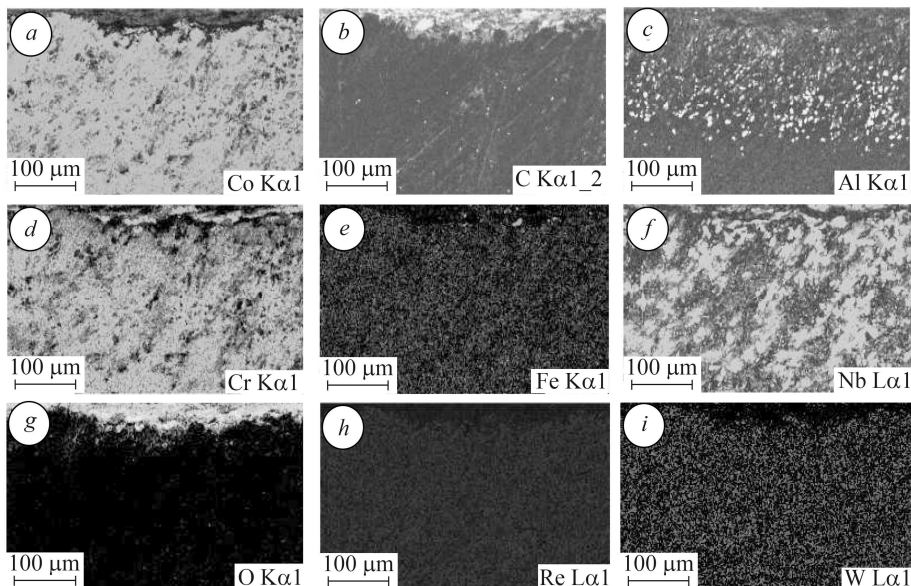


Рис. 3. Картограма краю окисненого зразка сплаву ХТН-62 з 4,5% Re.

Fig. 3. The map of elements distribution on the edge of the oxidized sample of the XTH-62 alloy with 4.5% Re.

Біля поверхні зразка формується шар твердих карбідів, що, вочевидь, унеможливує втрати сплавом високотемпературної зносотривкості (рис. 3b, f). На краю окисненої поверхні зафіксували тонкий щільний шар захисних оксидів на основі хрому, який уповільнює окиснення. Захисні оксиди не утворюються на початку відпалу, в якому вирізняються дві стадії – перехідна та сталого окиснення [10]. Зародки оксиду CoO (рис. 3a, g) ростуть швидше, ніж захисні Cr_2O_3 (рис. 3d, g) і Al_2O_3 (рис. 3c, g), які формуються на стадії сталого окиснення і не відлущуються з поверхні зразка. Легувальні елементи W, Fe, Re рівномірно розподілені по об'єму зразка (рис. 3e, h, i). За даними ЕДС крихкі продукти окиснення, що обсіпались з поверхні зразків, на $\sim 60\%$ складаються з оксидів $(\text{FeNb})_2\text{O}_6$, $\text{Nb}_{12}\text{O}_{29}$,

Co₄Nb₂O₉. На поверхні залишається захисний прошарок, який містить ~ 90% шпінелі кохроміту (Co, Fe⁺⁺)(Cr, Al)₂O₄. Суттєво поліпшити жаротривкість серійного сплаву ХТН-62 при 1100°C можна додатковим легуванням 3...9 mass% Re [11].

ВИСНОВКИ

Легування 3...9 mass% Re вдвічі підвищує жаротривкість серійного зносо- тривкого кобальтового сплаву ХТН-62 при 1100°C, не впливаючи на температуру плавлення і евтектичну структуру.

РЕЗЮМЕ. Методами физико-химического анализа исследовано влияние 1...9 mass% рения на температуру плавления, структуру и жаропрочность литейного серийного сплава ХТН-62, применяемого для защиты от износа контактирующих поверхностей рабочих лопаток газотурбинных двигателей (ГТД). Установлено, что при оптимальном его содержании от 3 до 9 mass% сопротивление сплава окислению при 1100°C повышается в 2 раза. При этом температура плавления сохраняется не ниже 1300°C и не изменяется структура, потому он перспективный для использования в жестких условиях работы ГТД.

SUMMARY. The influence of 1...9 mass% rhenium on melting temperature, structure and heat-resistance of foundry industrial XTH-62 alloy, used for wear protection of contact working surfaces of gas turbine blades (GTB) was investigated by the methods of physicochemical analysis. It was established that at the optimal rhenium content from 3 to 9 mass% the oxidation resistance of the alloy increases two-fold at 1100°C. In this case a melting temperature remains not lower than 1300°C and the structure does not change, thus making it prospective for use in aggressive working conditions of GTB.

1. *Dmitrieva G., Cherepova T.* Melting diagram of cobalt-rich alloys in the system C–Co–Nb // *Chemistry of Metal and Alloys*. – 2015. – № 8. – P. 83–90.
2. *Структура* и свойства износостойкого сплава на основе кобальта с карбидом ниобия / Г. П. Дмитриева, Т. С. Черепова, Т. А. Косорукова, В. И. Ничипоренко // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2015. – **37**, № 7. – С. 973–986.
3. *Зносоустійкий* сплав для захисту контактних поверхонь робочих лопаток авіаційних двигунів від окислення при високих температурах / Т. С. Черепова, Г. П. Дмитрієва, А. В. Носенко, О. М. Семіра // *Наука та інновації*. – 2014. – **10**, № 4. – С. 22–31.
4. *Восстановление* работоспособности ГТД с применением новых технологий и материалов / В. А. Леонтьев, С. Д. Заличихис, Э. В. Кондратюк, В. Е. Замковой // *Вестник двигателестроения*. – 2006. – № 4. – С. 99–103.
5. *Пейчев Г. М., Замковой В. Е., Андрейченко Н. В.* Сравнительная характеристика износостойких сплавов для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток газотурбинных двигателей // *Вестник двигателестроения*. – 2009. – № 2. – С. 123–125.
6. *Строение* эвтектических псевдобинарных сплавов переходных металлов с фазами внедрения / А. К. Шурин, О. М. Барабаш, Г. П. Дмитриева, В. Е. Панарин, Т. Н. Легкая // *Металлы*. – 1974. – № 6. – С. 183–187.
7. *Storms E. K.* *The Refractory Carbides*. – М.: Academic Press, 1970. – 304 p.
8. *Рений* в жаропрочных никелевых сплавах для лопаток газовых турбин / Е. Н. Каблов, Н. В. Петрушин, Л. Б. Василенок, Г. И. Морозова // *Материаловедение*. – 2000. – № 12. – С. 23–29.
9. *Патент* України на корисну модель № 39450. Сплав на основі кобальту / А. К. Шурін, Т. С. Черепова, Н. В. Андрейченко, В. Е. Замковий. – Опубл. 25.02.2009; Бюл. № 4.
10. *Золотаревский В. С.* *Механические свойства металлов*. – М.: МИСИС, 1998. – 400 с.
11. *Патент* України на винахід № 105154. Жаростійкий кобальтовий сплав / Т. С. Черепова, Г. П. Дмитрієва. – Опубл. 10.04.2014; Бюл. № 7.

Одержано 07.08.2018