

УДК 669. 018. 25:669.24

ВЛАСТИВОСТІ НІКЕЛЕВИХ ПОРОШКОВИХ СПЛАВІВ, ЗМІЦНЕНИХ КАРБІДОМ ТИТАНУ

Т. С. ЧЕРЕПОВА¹, Г. П. ДМИТРІЄВА¹, О. І. ДУХОТА², М. В. КІНДРАЧУК²

¹ Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ;

² Національний авіаційний університет, Київ

Визначено температуру плавлення, твердість та пористість нікелевих порошкових сплавів, отриманих методом гарячого пресування. Вміст карбіду титану в межах від 30 до 60 vol.% забезпечує сплавам опір зношуванню в умовах фретинг-корозії. Отримано показники жаротривкості цих сплавів за температури 1100°C та зносотривкості за температур 20; 850; 950 та 1050°C. Показано, що з підвищенням пористості жаротривкість сплавів знижується, а показники середнього лінійного зносу зростають з підвищенням температури. Отримано сплав оптимального складу з температурою плавлення вищою за 1300°C, який можна застосовувати в авіаційному машинобудуванні.

Ключові слова: нікелеві порошкові сплави, карбід титану, жаротривкість, зносотривкість, температура плавлення.

Ресурс авіаційних двигунів визначають довговічністю деталей його гарячого тракту, таких, зокрема, як робочі лопатки, роботоздатність яких залежить від зносу та корозійно-ерозійної стійкості їх контактуючих поверхонь, а саме, бандажних полиць. Захистити від зношування торці бандажних полиць можна нанесенням на них зносотривкішого матеріалу, ніж матеріал лопатки. Це продовжить їх термін служби та спростить ремонт, який буде полягати в заміні напайок, а не самих лопаток. На сьогодні матеріалами для цього успішно служать ливарні сплави евтектичного типу ХТН-61 та ХТН-62, розроблені Інститутом металофізики НАН України [1, 2].

Внаслідок розроблення газотурбінних двигунів нового покоління і модернізації вже існуючих, коли зі збільшенням ресурсу ставиться завдання підвищення потужності на одиницю маси двигуна, що, відповідно, призводить до збільшення робочих температур і діючих навантажень, необхідно створювати зносотривкі матеріали, які б відповідали цим підвищеним вимогам [3]. Серійні ливарні сплави типу ХТН містять недостатню кількість карбідної фази, обумовлену складом евтектики, і тому не можуть забезпечити високий рівень зносотривкості. Для збільшення вмісту карбіду в сплавах розробка нових матеріалів базувалась на використанні методів порошкової металургії та врахуванні таких конструкційних вимог: питомі контактні навантаження >20 МПа; діапазон робочих температур 20...1100°C; жаротривкість у діапазоні робочих температур на рівні сплавів даного призначення; зносотривкість має перевищувати цю характеристику для сплавів типу ХТН; температура плавлення сплаву повинна задовольняти технологічні умови виготовлення лопаток (дегазація і пайка при 1270°C), тобто бути вищою за 1300°C.

Щоб вирішити це завдання, вже запропонували гарячепресований зносотривкий порошковий сплав на основі кобальту з вмістом карбіду титану до 50 vol.% [4].

Заміна кобальту на нікель у таких сплавах дасть певні переваги, а саме: кращу адгезію при нанесенні на лопатки, які виготовляють з нікелевих сплавів (ЖС32, ЖС6У); близькі з лопатковим матеріалом коефіцієнти термічного розширення; відсутність поліморфних перетворень у сплавах на основі нікелю; здешевлення сплаву через нижчу ціну нікелю.

Найстійкіший до окиснення з-поміж інших карбідів тугоплавких металів є карбід титану [5]. Сплави нікелю з карбідом титану, отримані методом порошкової металургії, мають бути стійкішими проти зношування порівняно з ливарними евтектичними сплавами, оскільки метод дозволяє ввести в композит карбідну фазу в значно більшому обсязі.

Подана робота є певним етапом у розробці зносо- і жаротривких сплавів на основі композитів – металокерамічних матеріалів, дослідженні їх фізико-технічних властивостей та визначенні умов виробництва з метою застосування для зміцнення контактних поверхонь робочих лопаток в авіаційних газотурбінних двигунах.

Мета роботи – встановити залежність властивостей пресованих порошкових сплавів на основі нікелю від вмісту карбідної фази, а саме: температури плавлення, жаротривкості за максимальних робочих температур, твердості сплавів та їх зносотривкості в умовах фретинг-корозії.

Матеріали та методи досліджень. Зразки для дослідження виготовили методом гарячого пресування на обладнанні СПД-120 зі сумішей порошків чистих металів фракції 5...20 мкм: нікелю марки ПНЭ-1, хрому ПАХ 99Н5, заліза ПЖВ1, алюмінію ПА-0 і карбиду титану стандарту ТУ 06173-74. Вибирали легувальні добавки для порошкових композитів на основі нікелю за аналогією з легуванням порошкового жаротривкого сплаву на основі кобальту, щоб отримати композиції з високими жаро- і зносотривкістю. В складі металеві частки порошкових сплавів міститься: нікель, хром – 20 mass%, залізо та алюміній – 3 mass%. Для компенсації вільного вуглецю, який присутній у будь-якому карбідному порошку (в складі карбиду титану ~ 1,5%), щоб запобігти утворенню легкоплавкої евтектики між нікелем і карбідом хрому Cr_3C , в деякі сплави додатково вводили гідрид титану TiH . Під час пресування сплавів він запобігає окисненню титану, розкладаючись з підвищенням температури, а звільнений титан зв'язує надлишок вуглецю в карбід.

Компоненти змішували в спирті у планетарному млині САНД упродовж 2 h і висушували на повітрі. Отриману суміш клали в прес-форму з підпресовкою ~ 20 kN. Прес-форму завантажували в індуктор та нагрівали до 1000°C для видалення кисню і пресування в атмосфері CO (монооксид вуглецю). Швидкість зростання температури – 50°C/min, робочу температуру вимірювали оптичним пірометром “Промінь” з похибкою $\pm 20^\circ C$. Оптимальне гаряче пресування відбувалося за таким режимом: $T = 1350^\circ C$, $P = 10$ МПа з витримкою до кінця усадки, яку контролювали індикатором годинникового типу з ціною поділки 0,01 mm. Після шліфування розмір пресованих заготовок ~ 48×35×6 mm. Визначали пористість зразків методом гідростатичного зважування.

Температура гарячого пресування перевищувала температуру плавлення евтектики в системі Ni–TiC [6], що, поміж іншого, сприяло утворенню деякої кількості евтектичної рідини і, як наслідок, зниженню пористості зразків, оскільки основна вимога під час пресування – досягнення її мінімальних значень.

Температури фазових перетворень – початок і кінець плавлення, початок і кінець кристалізації, перетворення в твердому стані – визначали за допомогою диференційного термічного аналізу на обладнанні ВДТА-8М на зразках, вирізаних з пресованих заготовок методом іскрового різання. Нагрівали зразки зі швидкістю 80°C/min в атмосфері гелію.

Жаротривкість сплавів визначали на повітрі за температури 1100°C, нагріваючи зразки в електричній печі опору після вимірювання їх площі поверхні і зважування в тиглях з окису алюмінію. Кожен зразок, вирізаний з пресованих заготовок методом іскрового різання, знаходився в окремому тиглі. Нагрівання в печі контролювали термопарою, загальна витримка – 50 h, охолодження – разом з піччю. Жаротривкість сплаву визначали за збільшенням ваги зразка після кожних 10 h відпалу, віднесеним до його площі поверхні.

Випробовували на зносотривкість пресовані порошкові сплави на основі кобальту, зміцнені карбідом титану, в Київському національному авіаційному університеті на установці для дослідження матеріалів в умовах фретингу МФК-1 [7]. Для забезпечення температурного режиму вона обладнана кільцевою електричною піччю, термопарою та міліамперметром. Зразки для випробувань вирізали з пресованих сплавів іскровим різанням у вигляді кільця зі зовнішнім діаметром 9 mm, товщиною стінки 1,25...1,3 mm та таблетки з діаметром 11 mm, які в вакуумі припаювали до сталевих тримачів високотемпературними припоями ВПр11Н та ВПр24. Зразки утворюють кільцеву доріжку тертя із загальною площею $S = 35 \text{ mm}^2$, ширина доріжки тертя – 1,5 mm. Обладнання дає змогу досліджувати фретинг-корозію в діапазоні частот 10...30 Hz за нормального тиску до 60 МПа і амплітудах 0,001...2,5 mm.

Перед випробуваннями робочі поверхні зразків на верстаті шліфували до однакової шорсткості $\sim R_a = 0,32 \text{ }\mu\text{m}$. Триботехнічна пара – однойменна, таблетка нерухома, кільце приводиться в рух. Зношування відбувається на поверхні двох контактуючих зразків. Після випробування вимірювали середній лінійний знос зразків згідно з ГОСТ 23.211-80. Для цього використовували профілометр МОД-201. Круглу поверхню зразка (таблетку) розділяли на 8 секторів, на доріжці тертя в межах одного сектора виконували 5 замірів, виявляли середню лінію робочої поверхні, аналогічно визначали і середню лінію базової поверхні. Середнє лінійне зношування встановлювали за різницею рівнів середніх ліній базової і робочої поверхні на таблетці.

Результати досліджень. Для дослідження властивостей сплавів виготовили пресовані заготовки, склад яких наведений в табл. 1. З них методом іскрового різання виготовили зразки для термічного аналізу розміром $\sim 5 \times 5 \text{ mm}$. Зразки для визначення жаротривкості сплавів вирізали приблизно однакових розмірів $\sim 10 \times 8 \times 5 \text{ mm}$. Розміри зразків для випробувань на зносотривкість вказані вище.

Таблиця 1. Склад і пористість пресованих заготовок

№ зразка	TiC		TiH	Ni	Cr	Al	Fe	Пористість, %
	vol.%	mass%						
1	30	17,84	1,16	55,5	19,6	2,95	2,95	7,1
2	40	25,36	1,64	50,0	17,7	2,65	2,65	4,4
3	40	25,36	1,64	50,0	17,7	2,65	2,65	10,0
4	50	33,8	2,2	43,83	15,51	2,33	2,33	4,32
5	50	33,8	2,2	43,83	15,51	2,33	2,33	3,6
6	60	42,73	2,77	37,33	13,21	1,98	1,98	9,8

Результати визначення температури плавлення сплавів, твердості та приросту їх маси впродовж витримки 50 h за температури 1100°C на повітрі наведені в табл. 2.

Порівняння температури плавлення сплавів з різним вмістом карбіду титану свідчить про її ідентичність – температура плавлення $1320 \pm 10^\circ\text{C}$ притаманна всім зразкам з вмістом карбіду титану від 30 до 50 vol.%. Це очікуваний результат, оскільки всі ці пресовані матеріали мають однакову зв'язку – евтектику між легованим нікелем і карбідом. Виняток становить тільки композиція з вмістом 60 vol.% TiC з температурою плавлення $\sim 1300^\circ\text{C}$ і додатковим перетворенням поблизу цієї температури, що може бути результатом недостатньої кількості металеві зв'язки в заготовці, внаслідок чого не утворюється евтектика між легованим нікелем та карбідом, а реакції взаємодії виникають між окремими складниками шихтової суміші. Нагрівання сплавів на $50 \dots 80^\circ\text{C}$ вище солідусу не призвело до втрати їх форми.

Таблиця 2. Температура плавлення, твердість та жаротривкість сплавів при 1100°C

№ зразка	Температура плавлення, $^\circ\text{C}$	Твердість, HRC	Збільшення маси $\Delta m \cdot 10^{-5} \text{ (g/mm}^2\text{)}$				
			за витримки (h)				
			10	20	30	40	50
1	1330	52	5,79	10,78	14,77	16,17	19,16
2	1320	58	6,5	9,193	10,99	10,99	13,0
3	1310	58	11,15	16,92	19,23	23,46	25,77
4	1320	61	8,92	13,04	15,79	16,25	19,22
5	1310	62	6,62	11,15	12,89	15,68	18,81
6	1300	64	10,44	17,4	22,01	23,34	28,08

Термічні криві порошкових сплавів з вмістом карбіду титану від 30 до 50 vol.% вказують на можливість утворення композиційного матеріалу на основі нікелю, в якому відсутні будь-які перетворення під час нагрівання до температури плавлення. Відсутність додаткових термічних ефектів свідчить про стабільність фазового і структурного складу отриманих композиційних матеріалів. За температур вищих за температуру солідусу сплав втрачає стабільність фазового складу, про що свідчить поява додаткових термічних ефектів під час охолодження. Солідус композиційних матеріалів на основі нікелю з карбідом титану становить $1320 \pm 10^\circ\text{C}$ і не залежить від вмісту карбіду титану в межах від 30 до 50 vol.%.

Закономірним є також зростання твердості за Роквеллом досліджуваних зразків зі збільшенням у них вмісту карбіду титану – від 52 HRC при 30 vol.% TiC до 64 HRC при 60 vol.% TiC.

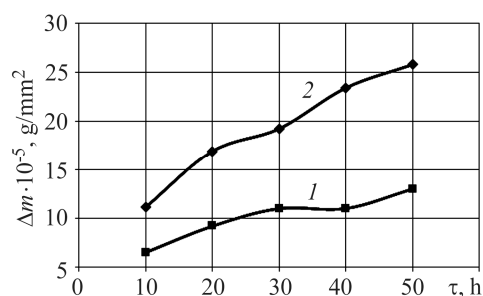
Результати дослідження жаротривкості композиційних порошкових матеріалів на основі нікелю свідчать, що ця їх властивість значно менше залежить від вмісту карбідної складової, ніж від пористості зразків. Зразки № 4 і № 5 з вмістом 50 vol.% TiC і з пористістю 4,32 і 3,6% характеризуються майже однаковою жаротривкістю. Водночас для зразків № 2 і № 3, що містять 40 vol.% карбіду титану, збільшення маси впродовж відпалу за 50 h відрізняється майже вдвічі. Пористість зразка № 3 визначена як 10%, а пористість зразка № 2 як 4,4% (рис. 1). Порівняльний аналіз дає змогу зробити висновок: компактніший матеріал має кращу жаротривкість.

Випробовували на зносотривкість пресовані порошкові сплави на основі нікелю, зміцнені карбідом титану, в умовах віброциклічної взаємодії (фретинг-процес без розкриття стику). За одиницю виміру взяли 1 млн. циклів навантаження. Цілком очевидно, що зі збільшенням часу випробування інтенсивність зношу-

вання зростатиме. Середній лінійний знос сплавів оцінювали за амплітуди коливань 120 μm та навантаження 30 МПа.

Рис. 1. Жаротривкість порошкових сплавів № 2 (1) і № 3 (2), пористість 4,4 і 10%, відповідно.

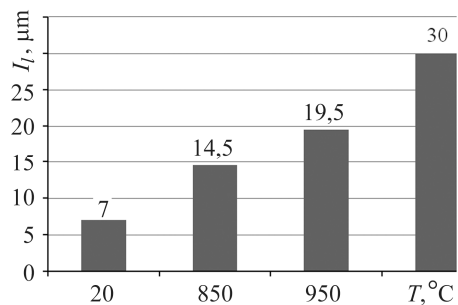
Fig. 1. Heat resistance of powder alloys number 2 (1) and 3 (2), the porosity is 4.4 and 10%, respectively.



Середній лінійний знос всіх випробуваних сплавів за кімнатної температури був одного порядку і становив 7...10 μm . Перспективний з точки зору зносотривкості сплав з максимально прийнятним вмістом карбіду титану (50 vol.%) та задовільними характеристиками твердості, температури плавлення та жаротривкості випробовували за підвищених температур – 850, 950 та 1050°C (рис. 2). Зі збільшенням температури його зношування поступово зростає.

Рис. 2. Середній лінійний знос сплаву № 4 за різних температур (амплітуда 120 μm , навантаження 30 МПа, база випробувань – 1 млн. циклів).

Fig. 2. The average linear wear of alloy number 4 at different temperatures (amplitude 120 μm , load 30 МПа, database test – 1 million cycles).



Під час аналізу зразків після випроб встановлено, що за підвищених температур вони окислювались до темно-сірого кольору без істотних слідів лущення і відшаровування окислів. Всім зразкам більшою чи меншою мірою притаманні такі особливості фретинг-знос, як відсутність слідів взаємного переміщення матеріалу та утворення гладкої блискучої (глазурованої) поверхні в зоні контакту (рис. 3).

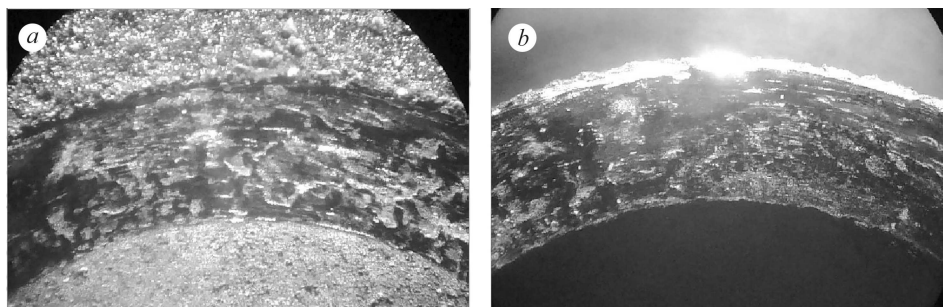


Рис. 3. Поверхня тертя таблетки (a) і кільця (b) сплаву № 4 при 950°C, амплітуді 120 μm і навантаженні 30 МПа. $\times 10$.

Fig. 3. Friction surface of tablets (a) and a ring (b) of the alloy number 4 at 950°C, amplitude 120 μm and load 30 МПа. $\times 10$.

Глазування поверхні, яке спостерігали на всіх зразках, є позитивним явищем, оскільки така поверхня дуже щільна, відрізняється високою твердістю і

зносотривкістю. Металографічним аналізом встановили, що в зоні глазування утворилися щільні аморфні окисли, які запобігають шкідливому під час тертя явищу “схоплення” та перенесенню матеріалу в зоні контакту.

ВИСНОВКИ

Підсумовуючи отримані результати, можна зробити основний висновок: властивості порошкових пресованих сплавів на основі легованого нікелю з карбідом титану дозволяють використовувати їх як композиційний матеріал для зміцнення бандажних полиць робочих лопаток газотурбінних двигунів. Ці сплави зносотривкіші, ніж литі, завдяки більшому вмісту карбідів; їх можуть застосовувати в інтервалі температур до 1100°C через температуру плавлення, вищу за 1300°C; вони володіють високою жаротривкістю. Оптимальні властивості має сплав на основі легованого нікелю з вмістом карбіду титану ~ 50 vol.%. Отримані результати є основою для подальших промислових випробувань створених матеріалів тертя авіаційного призначення.

РЕЗЮМЕ. Определены температура плавления, твердость и пористость никелевых порошковых сплавов, полученных методом горячего прессования. Содержание карбида титана в пределах от 30 до 60 vol.% обеспечивает сплавам сопротивление износу в условиях фреттинг-коррозии. Получены показатели жаростойкости этих сплавов при температуре 1100°C и износостойкости при температурах 20; 850; 950 и 1050°C. Показано, что с повышением пористости жаростойкость сплавов снижается, а показатели среднего линейного износа растут с повышением температуры. Получен сплав оптимального состава с температурой плавления выше 1300°C, который может найти применение в авиационном машиностроении.

SUMMARY. Melting temperature, hardness and porosity of nickel powder alloy obtained by hot pressing are determined. Titanium carbide content ranging from 30 to 60 vol.% provides wear resistance of the alloys under fretting fatigue. The characteristics of heat resistance of these alloys at 1100°C and durability at temperatures of 20; 850; 950 and 1050°C are investigated. It is established that with increasing porosity the alloy the heat resistance decreases, and the average linear wear rates increase with increasing temperature. The optimal composition of the alloy with a melting point higher than 1300°C, which can be used in aviation engineering, is obtained.

1. *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.*
2. *Зносостійкий 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. Семирга // Наука та інновації. – 2014. – 10, № 4. – С. 22–31.*
3. *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.*
4. *Патент України № 92883. Сплав на основі кобальту / Т. С. Черепова, Г. П. Дмитрієва, Н. В. Андрійченко. – Опубл. 10.12.2010; Бюл. № 23.*
5. *Войтович Р. Ф. Окисление карбидов и нитридов. – К.: Наук. думка, 1981. – 192 с.*
6. *Дмитриева Г. П., Разумова Н. А., Шурин А. К. Фазовые равновесия в сплавах систем Ni–TiC–MeC (Me: Zr, Hf, Nb, Ta) // Металлы. – 1986. – № 1. – С. 206.*
7. *Духота О. І., Тісов О. В. Дослідження зносостійкості жароміцних композиційних сплавів в умовах високотемпературного фретингу // Проблеми тертя та зношування. – К.: НАУ, 2010. – № 53. – С. 195–200.*

Одержано 08.12.2015