

УДК 621.891

О. І. ДУХОТА¹, О. В. ПІСОВ¹, Т. С. ЧЕРЕПОВА², Г. П. ДМИТРИЄВА²,
В. В. ХАРЧЕНКО¹

¹Національний авіаційний університет

²Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України

ТРИБОТЕХНІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ЗНОСОСТІЙКИХ МАТРИЧНО-НАПОВНЕНИХ СПЛАВІВ

Розглянуті питання оцінки зносостійкості високотемпературних сплавів, які пропонуються для застосування в гарячій частині турбіни високого тиску газотурбінних двигунів. Сплави систем Co-TiC, Ni-TiC та ЖС32-TiC з різним об'ємним вмістом зміцнюючої карбідної TiC складової виготовлено методом ізостатичного гарячого пресування. Досліджено вплив температури випробувань і пористості сплавів на їх зносостійкість в умовах фретинг-корозії. Аналіз отриманих результатів дослідження зразків на основі кобальту показав, що за загальної тенденції до втрати зносостійкості із підвищенням пористості найбільш значне зниження зносостійкості проявляють зразки із спечених порошкових пресовок з пористістю понад 10%. Аналіз концентраційних залежностей інтенсивності зношування показує, що найбільша зносостійкість порошкових сплавів досліджуваних систем досягається за вмісту зміцнюючої карбідної TiC складової, в області концентрацій, близькій до 50 об. %.

Ключові слова: високотемпературний фретинг, зносостійкий матрично-наповнений сплав системи Co-TiC, Ni-TiC та ЖС32-TiC, пористість, спікання.

Вступ. У загальній проблематиці забезпечення надійності авіаційних трибосистем велике значення надається підвищенню зносостійкості контактних поверхонь деталей гарячої частини газотурбінних двигунів. Як свідчить аналіз, зношування таких деталей відбувається переважно в результаті розвитку процесів високотемпературного фретинга.

В практиці енергетичного та авіаційного двигунобудування для підвищення зносостійкості деталей гарячої частини, зокрема робочих лопаток турбіни, на сьогодні застосовують технології електроіскрового легування, аргонодугового, мікроплазмового та електроннопроменевого наплавлення, високотемпературного вакуумного напаявання пластин спеціальних жаро- і зносостійких високотемпературних сплавів. Виконані в останні роки дослідження з розробки нового класу таких матеріалів дозволили створити ряд ливарних сплавів з високою температурою плавлення, здатних забезпечити тривалий ресурс роботи трибоспрями робочих лопаток турбіни при температурах до 1173 К – 1273 К [1; 2]. В основу забезпечення жароміцності і зносостійкості таких сплавів покладено принцип композиційного, каркасного армування відносно пластичної металеві матриці кристалами твердих високомодульних боридних та карбідних фаз, який реалізується в структурі складнолегованих сплавів на основі заліза і кобальту в процесі їх евтектичної кристалізації. Найбільш сприятливим поєднанням властивостей для умов роботи при високих температурах володіють складнолеговані евтектичні сплави ХТН-37, ХТН-61, ХТН-62 систем Co-NbC та Co – (Ti, Nb)C, які уже застосовуються на ряді авіаційних газотурбінних двигунів у якості матеріалів для зміцнення і відновлення контактних поверхонь робочих лопаток турбіни методами аргонно-дугового наплавлення і високотемпературного припаявання пластин. Лабораторні і експлуатаційні випробування показали високу зно-

состійкість таких сплавів, яка в умовах високотемпературного фретингу значно перевищує зносостійкість традиційних жароміцних сплавів.

Разом з тим, уже зараз, у зв'язку з постійно зростаючими вимогами до збільшення питомої потужності і ресурсу, при створенні двигунів нового покоління ставиться задача подальшого підвищення експлуатаційних характеристик деталей, зокрема зносостійкості трибоспрямих робочих лопаток турбіни з можливістю забезпечення їх роботи при температурах 1323 К і вище. В рамках вирішення цієї проблеми були розроблені і запропоновані для використання в якості високотемпературних зносостійких матеріалів гарячепресовані порошкові сплави на основі кобальту і карбиду титану [3].

Принцип, покладений в основу створення високотемпературних зносостійких матеріалів такого типу ґрунтується на можливості отримання методом порошкової металургії композиційних дисперсно-зміцнених псевдо-сплавів (у подальшому порошкові композиційні сплави), в яких тугоплавкі тонкодисперсні включення зміцнюючої фази можуть штучно вводиться в матрицю в готовому стані і практично в будь-якій потрібній пропорції. Властивості таких матеріалів залежать від властивостей матриці і матеріала наповнювача, кількості, дисперсності та способу введення фази наповнювача в матрицю.

Матеріали та методика досліджень. Сплави виготовляли методом гарячого ізостатичного пресування порошкових сумішей відповідного складу, отриманих змішуванням у планетарному млині порошоків основного металу матричної фази, порошоків легуючих елементів і карбідної фази. Режимы гарячого пресування обирались за результатами досліджень впливу температури, тиску, тривалості витримки пресування на щільність і пористість отриманих пресовок.

Для порівняльної оцінки зносостійкості при фретинг-зношуванні були виготовлені порошкові сплави на основі кобальту та нікелю з різним об'ємним вмістом зміцнюючої карбідної TiC фази. Крім цього, досліджувались також порошкові композиційні сплави системи ЖС32-TiC, для отримання яких в якості матричної фази застосовувався порошок жароміцного дисперсно-твердіючого нікелевого сплаву ЖС32. Склад досліджуваних матеріалів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Склад досліджуваних композиційних матеріалів

№ зразка	Матеріал	Склад компонентів, об. %			Тип матеріалу
		Со легований	Ni легований	TiC	
1	ПК-30	70,0	-	30,0	порошковий, системи Co(Cr; Al; Fe) – TiC
2	ПК-40	60,0	-	40,0	
3	ПК-50	50,0	-	50,0	
4	ПК-60	40,0	-	60,0	
5	ПН-30	-	70,0	30,0	порошковий, системи Ni(Cr; Al; Fe) – TiC
6	ПН-40	-	60,0	40,0	
7	ПН-50	-	50,0	50,0	
8	ПН-60	-	40,0	60,0	
9	ЖС32-30			30,0	порошковий дисперсно-твердіючий Ni-сплав ЖС32 – TiC
10	ЖС32-40			40,0	
11	ЖС32-50			50,0	

Матрична фаза кожного сплаву містить 20 мас.% Cr, 3 мас.% Al і 3 мас.% Fe. Легування хромом і алюмінієм підвищує стійкість сплавів до високотемпературного окислення, додавання заліза стабілізує ГЦК модифікацію кобальту. Стабільна при порівняно високих температурах і більш пластична кубічна модифікація стає внаслідок присадки заліза стійкою і при низьких температурах, що є необхідним для основного призначення матриці – перерозподіл навантажень на карбідну складову сплаву.

Випробування на зношування проводились за методикою, описаною у роботі [3].

Результати досліджень та їх обговорення. На першому етапі досліджували вплив пористості та вмісту зміцнюючої карбідної фази на зносостійкість композиційних порошкових дисперсно-зміцнених сплавів.

Дослідження з визначення впливу пористості проводились на зразках із сплавів ПК-30 і ПК-50, які мали різну пористість. Значення пористості сплавів і результати виробувань з визначення їх зносостійкості наведено у табл. 2 та на рис. 1.

Таблиця 2

Пористість і інтенсивність зношування композиційних порошкових сплавів ПК-30, ПК-50

№ зразка	Матеріал	Пористість, %	Інтенсивність зношування, $I_h^* \times 10^{-8}$
1	ПК-30	3,2	1,7
2	ПК-30	25,0	6,0
3	ПК-50	3,1	1,3
4	ПК-50	10,4	1,5
5	ПК-50	28,0	5,0

*Умови віброконтактного навантаження: амплітуда відносного переміщення $A = 200$ мкм, питоме контактне навантаження $P = 30$ МПа, частота вібропереміщень $\nu = 30$ Гц, зовнішня температура $T = 293$ К, база випробувань $N = 2 \cdot 10^6$ цикл. Пари однойменні.

Аналіз отриманих результатів показує, що за загальної тенденції до втрати зносостійкості із підвищенням пористості найбільш значне зниження зносостійкості проявляють зразки із спечених порошкових пресовок з пористістю понад 10%. Так, за прийнятих умов фретингу, приріст інтенсивності зношування високопористих зразків сплаву ПК-50 на одиницю приросту пористості майже на порядок вищий ніж у низькопористих зразків з пористістю меншою за 10% (рис. 1).

Дослідження впливу вмісту зміцнюючої TiC-фази на зносостійкість проводилась на сплавах систем Co(Cr; Al; Fe)-TiC, Ni(Cr; Al; Fe)-TiC, ЖС32-TiC з різним об'ємним співвідношенням у композитах матричної і карбідної фаз. З метою мінімізації негативного впливу пористості і забезпечення можливості адекватного співставлення експериментальних результатів для виготовлення зразків відбирались пресовки, пористість яких становила не більше 10 %.

Додатково, з застосуванням отриманих у роботі [4] аналітичних співвідношень розраховувались значення коефіцієнтів напружень композиційного матеріалу від дії сили нормального тиску і сили тертя. Розрахунки проводились на прикладі модельного сплаву Co-TiC з нелегованою кобальтовою матрицею і вмістом TiC в межах від 10 до 80 об.%. Припускалось, що за такого об'ємного вмісту включень карбідної фази і співмірності їх розмірів з глибиною залягання точки максимальної концентрації напружень, напружено-деформований стан фрикційно-навантаженого поверхневого шару гетерогенного композиційного

матеріалу можна подати моделлю, близькою до моделі розподілу локальних полів напружень, прийнятої для ідеалізованого лінійно-армованого середовища.

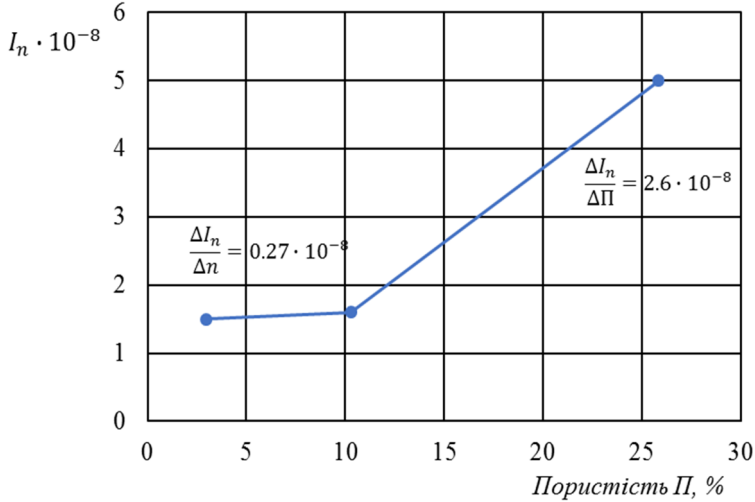


Рис. 1. Графік залежності інтенсивності зношування композиційних порошкових сплавів ПК-50 системи Co(Cr; Al; Fe)-TiC від пористості. Умови відро контактного навантаження: амплітуда відносного переміщення $A = 200$ мкм, питоме контактне навантаження $P = 30$ МПа, частота вібропереміщень $\nu = 30$ Гц, зовнішня температура $T = 293$ К, база випробувань $N = 2 \cdot 10^6$ цикл. Пари однойменні.

Результати досліджень на зношування досліджуваних порошкових сплавів та розрахункові залежності максимальних коефіцієнтів концентрації напружень поздовжнього стиснення (K_T) і поздовжнього зсуву (K_{Tr}) від об'ємного вмісту в композиції Co-TiC карбідних включень представлені відповідно на рис. 2. і рис. 3.

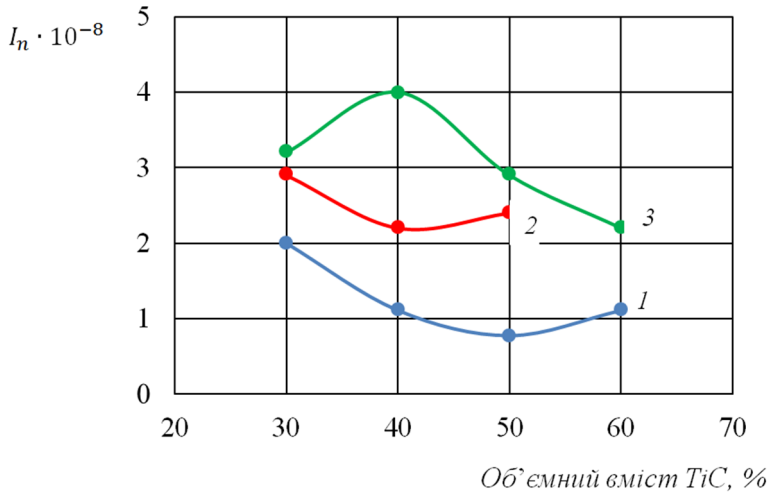


Рис. 2. Залежність інтенсивності зношування композиційних порошкових сплавів від об'ємного вмісту TiC: 1 – сплави системи Ni(Cr; Al; Fe)-TiC; 2 – сплави системи ЖС32-TiC; 3 – сплави системи Co(Cr; Al; Fe)-TiC. Умови віброконтактного навантаження: $A = 120$ мкм; $P = 30$ МПа; $\nu = 30$ Гц; $T = 293$ К; $N = 1 \cdot 10^6$ цикл. Пари третя однойменні.

Аналіз концентраційних залежностей інтенсивності зношування (рис. 2) показує, що найбільша зносостійкість порошкових сплавів досліджуваних систем досягається за вмісту карбідної TiC-фази в області концентрацій, близькій до

50%об. Цій же області відповідають мінімальні значення коефіцієнтів концентрації напружень в модельному композиті від дії сили нормального тиску і сили тертя (рис. 3).

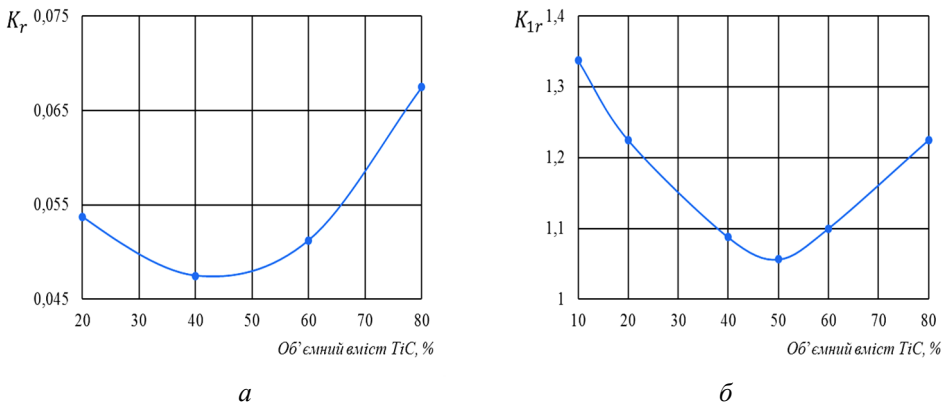


Рис. 3. Розрахункові значення максимальних коефіцієнтів концентрації напружень поздовжнього стиснення K_r (а) і поздовжнього зсуву $K_{1r}^{1,4}$ (б) в композиті Co-TiC залежно від об'ємного вмісту включень TiC

Таким чином, отримані результати свідчать про те, що існує гранично допустима величина пористості і оптимальна концентрація зміцнюючої карбідної фази, за яких у досліджуваних композиційних порошкових сплавах досягається найбільша стійкість до фретингового зношування. Як видно з рис. 2 та рис. 3, для забезпечення максимальної зносостійкості сплавів їх пористість повинна бути мінімально можливою, а об'ємний вміст включень зміцнюючої TiC-фази знаходитись в області концентрацій, близькій до 50%об. Очевидно, що за такого вмісту карбідної фази формується найбільш сприятливе у відношенні як об'ємної міцності композиту, так і напружено-деформованого стану його фрикційно навантажених поверхневих шарів співвідношення і морфологія включень твердої карбідної TiC-фази і пластичної металевої матриці.

На другому етапі проводились експериментальні дослідження зносостійкості порошкових композиційних сплавів ПК-50, ПН-50, ЖС 32-50 з максимально прийнятним вмістом карбиду титану при зношуванні за умов високотемпературного фретингу. Як і в попередніх дослідженнях зразки виготовлялись із гарячепресованих заготовок, пористість яких не перевищувала 10%. Величини середнього лінійного зносу зразків досліджуваних сплавів, отримані за результатами випробувань, представлені у табл. 3.

Таблиця 3

Результати оцінювання зносостійкості сплавів ПК-50, ПН-50, ЖС32-50 в умовах високотемпературного фретингу

№ зразка	Матеріал	Середній мінімальний знос, мкм температура, K^*		
		1123	1223	1323
1	ПК-50	9,0	32,0	59,0
2	ПН 50	14,5	19,5	30,0
3	ЖС 32-50	7,5	12,0	16,5

*Умови віброконтактного навантаження: $A = 120$ мкм; $P = 30$ МПа; $v = 30$ Гц; $N = 1 \cdot 10^6$ цикл. Пари тертя одинищені.

Як видно із отриманих даних (табл. 3), за однакового об'ємного вмісту змінюючої карбідної TiC-фази зносостійкість порошкових композиційних сплавів на основі нікелю вища, ніж сплаву ПК-50 на основі кобальту. Одночасно, дослідження виконані в Інституті металофізики НАН України, показали високу жаростійкість порошкових композиційних сплавів системи Ni(Cr; Al; Fe)-TiC і відсутність у цих сплавах фазових та інших перетворень при нагріванні, що свідчить про стабільність їх фазового і структурного складу.

Висновки. За результатами іспитів в умовах фретинг-корозії зносостійкість матеріалів матрично-наповненого типу на основі системи Ni(Cr; Al; Fe)-TiC при температурах вищих за $T=1123\text{K}$ перевершує зносостійкість порошкових сплавів на основі легovanого кобальту з карбідом титану. Встановлені гранично допустима величина пористості і оптимальна концентрація зміцнюючої карбідної фази кількістю 50 об.%, за яких у досліджуваних композиційних порошкових сплавах досягається найбільша стійкість до фретингового зношування, що робить можливим використання їх для трибовузлів деталей гарячої частини ГТД.

Список літератури

1. Богуслаев В. А. Контактное взаимодействие сопряженных деталей ГТД / В. А. Богуслаев, Л. И. Ившенко, А. Я. Качан, В. Ф. Мозговой. – Запорожье: Изд-во ОАО «Мотор Сич», 2009. – 328 с.
2. Пейчев Г. И. Износостойкие сплавы для контактных поверхностей деталей ГТД / Г. И. Пейчев, А. К. Шулин, Л. И. Ившенко и др. // Весник двигателестроения. – 2006. – №2. – с. 188 – 192.
3. Духота О. І. Композиційні сплави для зміцнення контактних поверхонь бандажних полиць газотурбінних двигунів / О. І. Духота, М. В. Кіндрачук, О. В. Тісов, Т. С. Черепова // Проблеми трибології. – 2010. – №4. – С. 101 – 104.
4. Кіндрачук М.В. Трибологія/ М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, М.І. Пашечко, Є.В. Корбут. – «НАУ-друк», 2009. – 253 с.

Стаття надійшла до редакції 15.09.2017

Духота Олександр Іванович — канд. техн. наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри технологій відновлення авіаційної техніки Національного авіаційного університету. nau12@ukr.net

Тісов Олександр Вікторович — канд. техн. наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри машинознавства Національного авіаційного університету. nau12@ukr.net

Черепова Тетяна Степанівна — старший науковий співробітник Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, старший науковий співробітник, кандидат технічних наук. cherepova_ts@meta.ua

Дмитрієва Галина Петрівна — старший науковий співробітник Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, старший науковий співробітник, кандидат технічних наук. galina1225@gmail.com

Харченко Володимир Володимирович — аспірант кафедри машинознавства Національного авіаційного університету. nau12@ukr.net

*O. I. DUKHOTA, O. V. TISOV, T. S. CHEREPOVA, G. P. DMYTRIIEVA,
V. V. KHARCHENKO*

TRIBOTECHNICAL INVESTIGATIONS OF HIGH-TEMPERATURE SENSORY MATRIX-SUPPLIED ALLOYS

The questions of creation of high-temperature wear-resistant alloys for increase of wear resistance of parts of the hot part of gas turbine engines by the method of isostatic hot pressing are considered. The alloys of the Co-TiC, Ni-TiS and GS32-TiC systems with different volumetric content of the absorbing carbide TIC phase are manufactured. The influence of porosity of carbide phase and temperature on wear resistance in conditions of fretting corrosion is investigated. The analysis of the results of the investigation of samples from PC-30 and PC-50 alloys showed that samples of sintered powder presses with a porosity of more than 10% are shown in the general tendency to lose wear resistance with increasing porosity. The obtained results indicate that there is a maximum permissible value of porosity and an optimal concentration of a reinforcing carbide phase, in which the highest resistance to friction wear is achieved in the composite powder alloys under study.

Keywords: high-temperature fretting, wear-resistant matrix-filled alloy of Co-TiC, Ni-TiS and GS32-TiC, porosity, sintering.

References

1. Boguslaev V. A. Kontaknoe vzaimodejstvie soprjazhennykh detalej GTD / V. A. Boguslaev, L. I. Ivshhenko, A. Ja. Kachan, V. F. Mozgovoj. – Zaporozh'e: Izd-vo OAO «Motor Sich», 2009. – 328 s.
2. Pejchev G. I. Iznosostojkie splavy dlja kontaknykh poverhnostej detalej GTD / G. I. Pejchev, A. K. Shurin, L. I. Ivshhenko i dr. // Vesnik dvigatelestroenija. – 2006. – №2. – s. 188 – 192.
3. Dukhota O. I. Kompozytsiini splavy dlja zmitsnennia kontaknykh poverkhon bandazhnykh polyts hazoturbinykh dvyhuniv / O. I. Dukhota, M. V. Kindrachuk, O. V. Tisov, T. S. Cherepova // Problemy trybolohii. – 2010. – №4. – S. 101 – 104.
4. Kindrachuk M.V. Trybolohiia/ M.V. Kindrachuk, V.F. Labunets, M.I. Pashechko, Ye.V. Korbut. – «NAU-druk», 2009. – 253 s.