

М. Кіндрачук

Професор, докт. техн. наук

О. Духота

О. Тісов

Т. Черепова

Національний авіаційний
університет,
м. Київ

УДК 621. 891

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ В ДОСЛІДЖЕННЯХ ТА РОЗРОБЛЕННІ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В УМОВАХ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ФРЕТИНГ-КОРОЗІЇ

У статті наголошено на основних завданнях, які потрібно вирішити при розробленні сучасних високотемпературних сплавів. Також обґрунтовано високі трибологічні характеристики сплавів системи Co-TiC.

високотемпературний сплав, трибологічна характеристика

У загальній проблемі підвищення надійності і ресурсу енергетичних двигунних установок, зокрема авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД), велике значення надається забезпеченню зносостійкості поверхонь деталей гарячої частини, зношування яких переважно обумовлене розвитком процесів високотемпературної фретинг-корозії та динамічного контактного навантаження в режимі удару з проковзуванням (ударний фретинг).

Високий рівень діючих контактних навантажень і температур, нестаціонарність теплового режиму експлуатації висувають до матеріалів трибовузлів гарячої частини ГТД комплекс вимог, серед яких найбільш важливою є забезпечення рівнозношуваності у всьому робочому інтервалі температур [1, 2].

До найбільш відповідальних елементів гарячої частини ГТД, що піддаються зношуванню, відносяться контактні поверхні робочих лопаток турбіни в місцях бандажного з'єднання. Динаміка зношування цих елементів характеризується наявністю двох режимів контактної взаємодії: коливальне відносне переміщення в спряженні в режимі фретинга при умові існування натягу і удару з проковзуванням при втраті натягу і появі зазору.

Натяг в бандажних з'єднаннях знижує рівень вібраційних навантажень лопаток і є необхідною умовою запобігання їх втомному руйнуванню. При втраті натягу і появі в спряженні зазору в наслідок зношування контактних поверхонь в місцях бандажного з'єднання суттєво збільшується рівень діючих на лопатку вібраційних навантажень, що не рідко стає причиною руйнування і обриву лопаток. Одночасно при переході до режиму ударного фретинга різко зростає інтенсивність зношування.

Зазначені умови контактної взаємодії характерні для більшості номінально-нерухомих спряжень деталей гарячої частини ГТД. На сьогодні стосовно до всієї різноманітності існуючих і особливо перспективних жароміцних матеріалів, враховуючи багатокомпонентність їх хімічного складу, фізичних принципів, покладених в основу забезпечення жароміцності та велику кількість діючих на трибосистеми зовнішніх чинників, достатньо повного уявлення про механізм і перебіг процесів зношування в умовах фретинга при високих температурах не склалось. Фактор впливу температури при цьому розглядається з позиції інтенсифікації деформаційних та дифузійних процесів, структурно-термічної активації

окислювальних трибохімічних реакцій, адгезійної взаємодії, ефектів структурної і субструктурної релаксації, алотропічних, структурних та фазових перетворень поверхневих шарів матеріалу в зоні трибоконтакту [1, 3 – 6]. Разом з цим, більшість авторів виконаних досліджень вказують, що провідну роль у формуванні фретенгостійкості матеріалів при підвищених температурах відіграють процеси, розвиток яких визначає утворення і стійкість оксидних плівок на поверхнях контакту. Вважається, що при певних температурах і умовах віброконтактного навантаження оксидні вторинні структури, які утворюються в результаті термічно- і трибоактивованого окиснення поверхонь контакту виконують роль екрануючого захисного прошарку – запобігають схопленню, знижують тертя, зменшують рівень динамічних навантажень матеріалу контактної пари в зонах фрикційного контакту. Триботехнічні властивості і захисна здатність оксидних плівок визначається як самою їх природою, так і несучою здатністю когерентно зв'язаного з оксидною фазою підшарку матеріалу основи [5, 6].

Результати досліджень триботехнічних характеристик, отримані для різних груп матеріалів – чистих металів, різного класу сталей, жароміцних сплавів, композиційних матеріалів на основі тугоплавких і інтерметалідних сполук [1, 3–5, 7–8] дозволили виявити характерну закономірність температурних залежностей величини фретинг-зносу. У загальному випадку для кожного конкретного матеріалу існує область температур, в діапазоні яких відбувається зміна механізму і інтенсивності зношування. Процеси контактної взаємодії, що розвиваються при температурах нижче критичних, контролюються звичайними для фретинг-корозії втомно-окиснювальними і абразивними механізмами зношування. Підвищення температури в цьому діапазоні сприяє інтенсифікації окиснення та, відповідно, формуванню на поверхні трибоконтакту оксидних плівок і, як правило, супроводжується зниженням коефіцієнта тертя та величини зносу. Оскільки процеси формування і зношування захисного прошарку протікають одночасно, інтенсивність зношування буде визначатись механізмами і кінетикою протікання реакцій окиснювання поверхонь трибоконтакту і диспергування оксидних фаз.

За температур, вищих за критичні, характер процесів контактної взаємодії змінюється. Переважний розвиток у фрикційному контакті за цих температур набувають процеси адгезійно-молекулярної взаємодії і схоплення, що супроводжуються різким зростанням коефіцієнта тертя і зносу, який реалізується переважно у формі локальних глибоких пошкоджень поверхонь трибоконтакту.

Діапазон критичних температур пов'язують з порушенням цілісності оксидної плівки внаслідок зменшення при високих температурах напруження пластичної течії і втрати несучої здатності матеріалу основи [5, 6]. Причиною руйнування оксидних плівок можуть бути також напруження, обумовлені відмінністю в значеннях постійних кристалічної ґратки оксидних фаз і матеріалу основи та термічні напруження при надмірному зростанні товщини оксидної плівки [9]. З практичної точки зору для трибовузлів, що працюють в умовах підвищених температур, критична температура є параметром трибосистеми,

яка визначає перехід від допустимих масштабів поверхневого руйнування і зношування до недопустимих. Розвиток цих процесів контролюється механізмом і кінетикою трибохімічних реакцій на контактних поверхнях деталей, високотемпературними властивостями вторинних оксидних фаз і матеріалу основи, рівнем діючих в зонах фактичного контакту температур і навантажень.

Таким чином, для визначення принципів забезпечення зносостійкості матеріалів в умовах високотемпературного фретинга фізичну модель трибосистеми необхідно розглядати з позиції взаємного впливу температури та процесів фрикційної взаємодії на трансформацію структури, властивостей і механізмів розвитку поверхневого руйнування матеріалів. Температурна залежність параметрів зносостійкості, при цьому, буде визначатись як вихідними властивостями матеріалів контактної пари, так і набутими в результаті дії на трибосистему деформаційних, термічних і окислювальних процесів властивостями поверхневих шарів.

У 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 зносостійких високотемпературних сплавів. Виконані в останні роки дослідження з розробки нового класу таких матеріалів дозволили створити ряд сплавів з високою температурою плавлення, здатних забезпечити тривалий ресурс роботи трибоспряжень робочих лопаток турбіни при температурах до 1173 К – 1273 К [2, 10–11]. В основу забезпечення жароміцності і зносостійкості таких сплавів покладено принцип композиційного, каркасного армування відносно пластичної металевої матриці високоміцними кристалами карбідних фаз, який реалізується в структурі складноколегованих евтектичних сплавів на основі заліза і кобальту в процесі кристалізації. Найбільш оптимальним поєднанням властивостей для умов роботи при високих температурах мають складноколеговані евтектичні сплави системи Co-NbC та Co – (Ti; Nb)C (ХТН-37; ХТН-61; ХТН-62), які уже застосовуються на ряді авіаційних газотурбінних двигунів у якості матеріалів для зміцнення і відновлення контактних поверхонь робочих лопаток турбіни методами аргоно-дугового наплавлення і високотемпературного припаявання пластин. Лабораторні й експлуатаційні випробування показали високу зносостійкість таких сплавів, яка в умовах високотемпературного фретинга значно перевищує зносостійкість традиційних жароміцних сплавів [1, 2].

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 трибоспряжень робочих лопаток турбіни. Однією із основних вимог до таких матеріалів є збереження в заданому діапазоні робочих температур достатньо високого рівня міцності. Ця вимога передбачає підбір такого складу компонентів і принципів конструювання структури матеріалу, які були б здатні мінімізувати ефекти, пов'язані

Склад досліджених композиційних матеріалів

№ пор.	Марка матеріалу	Склад компонентів							Спосіб виготовлення
		Co, % мас.	Cr, % мас.	Al, % мас.	Fe, % мас.	W, % мас.	TiC, %об. / % мас.	NbC, %об. / % мас.	
1	ХТН-62	48,25	20,0	2,0	3,0	9,5	–	19/17,25	Е. Д. П
2	П-69Л	55,5	19,6	2,95	2,95	–	30/19	–	Е. Д. Е
3	П-76П	43,83	15,5	2,33	2,33	–	50/36	–	Г. П

Примітка. Е. Д. Г – електродугове плавлення; Г. П – гаряче пресування.

з механізмами температурного зменшення і протистояти розвитку високотемпературної пластичної деформації. Відносно невеликий об'ємний вміст зміцнюючої карбідної фази, яка утворюється при кристалізації евтектик Co-NbC, Co – (Ti; Nb)C обмежує рівень характеристик жароміцності цих сплавів і унеможливує подальше підвищення їх зносостійкості за рахунок створення структур із більшим співвідношенням вмісту зміцнюючої фази до матричного металу. У зв'язку з цим, на сьогодні дослідження з розробки матеріалів для трибовузлів, здатних забезпечити тривалий ресурс роботи деталей при високих температурах, розвиваються у трьох напрямках: пошук композиційних систем здатних утворювати в процесі кристалізації із розплаву евтектичної структури із збільшеним у порівнянні зі сплавами системи Co-NbC, Co – (Ti; Nb)C, вмістом зміцнюючої фази; створення на основі принципу дисперсійного зміцнення штучних спечених композиційних псевдосплавів; пошук комплексу легуючих елементів, які одночасно здатні підвищити характеристики жароміцності і жаростійкості сплаву та в результаті селективного окислення утворювати в області робочих температур ефективні у триботехнічному відношенні захисні окисні плівки.

Комплексні дослідження, виконані у зазначених напрямках, дозволили розробити високотемпературні жароміцні і жаростійкі евтектичні сплави та композиційні порошкові псевдосплави триботехнічного призначення на основі системи Co – TiC [12; 13]. Склад і результати оцінювання зносостійкості розроблених матеріалів при випробуванні в умовах високотемпературного фретинга у порівнянні з промисловим евтектичним сплавом ХТН-62 системи Co-NbC наведені відповідно у табл. 1 і на рис. 1.

Як видно з рис. 1 в досліджуваному діапазоні температур композиційні матеріали П-69Л і П-76П на основі системи Co – TiC значно перевищують по зносостійкості сплав ХТН-62 системи Co-NbC.

Фрактографічний аналіз стану поверхонь тертя, а також металаграфічні дослідження структури приповерхневих шарів ливарних евтектичних сплавів ХТН-62 і П-69Л після випробування на зношування дозволили зробити висновок про розвиток в зоні трибоконтакта помітної пластичної деформації. Ознаки пластичної деформації приповерхневих шарів сплаву ХТН-62 спостерігаються уже при температурі 1073 К і проявляються в утворенні деформаційного рельєфу у вигляді напливів (рис. 2,а),

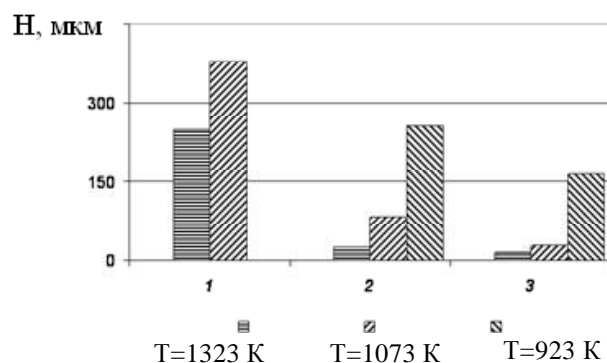


Рис. 1. Діаграма середнього лінійного зносу сплавів ХТН-62 (1), П-69Л (2) та П-76П при випробуванні на зношування в умовах високотемпературного фретинга: умови віброконтактного навантаження: $A=120$ мкм; $P=30$ МПа; $N=5 \cdot 10^6$ цикл. Пари однойменні

руйнуванні і подрібненні окремих фрагментів карбідних кристалів (рис. 2,б). Подібна картина розвитку деформаційних процесів в зоні трибоконтакта сплаву П-69Л спостерігається при температурі 1323 К (рис. 2,в).

У порівнянні з ливарними евтектичними сплавами ХТН-62 і П-69Л у всьому досліджуваному діапазоні високих температур мікрорельєф поверхні і структура сформованого приповерхневого шару композиційного порошкового матеріалу П-76П не містять явно виражених ознак пластичної деформації. Як видно з рис. 2,в, у приповерхневому шарі взаємне розташування зерен зміцнюючої карбідної фази в матриці мало відрізняється від вихідної мікроструктури матеріалу. Не виявляються також мікротріщини і викришування карбідної фази з поверхні тертя.

В умовах високотемпературного фретинга, як сказано вище, при розвитку в зоні контакту значної пластичної деформації порушується цілісність захисних окисних плівок, що супроводжується схопленням, глибинним руйнуванням та супроводжується більш інтенсивним зношуванням матеріалів контактної пари. Виходячи з визначеного механізму поверхневого руйнування, підвищення зносостійкості в ряду досліджуваних матеріалів ХТН-62 - П-69Л - П-76П можна пояснити збільшенням об'ємного вмісту зміцнюючої карбідної фази. Більш високій зносостійкості ливарного евтектичного сплаву П-

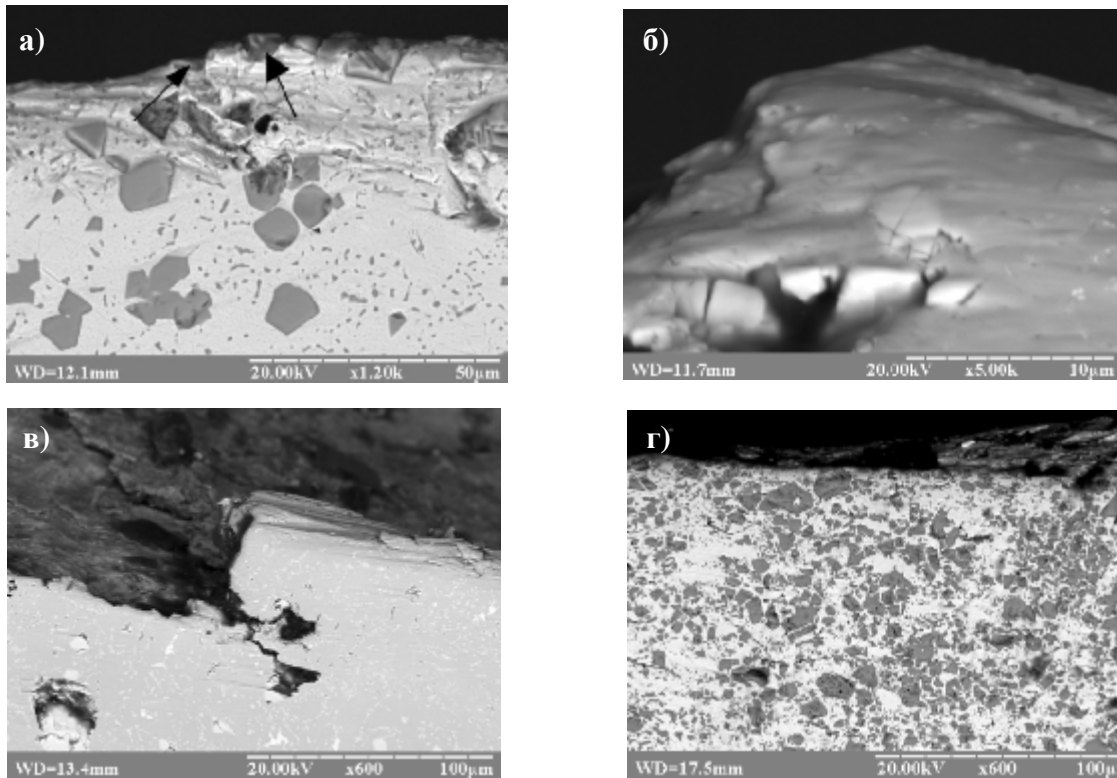


Рис. 2. Деформаційна структура сплавів ХТН-62 (а, б), П-69Л (в) і П-76П (г) в зоні трибоконтакту після випробування на зношування при температурах 1073 К (а, б) і 1323 К (в, г): Умови віброконтактного навантаження: $A=120$ мкм; $P=30$ МПа; $N=5 \cdot 10^6$ цикл. Пари однойменні

69Л і композиційного порошкового сплаву П-76П, у порівнянні зі сплавом ХТН-62, сприяє також підвищена жароміцність за рахунок більш високих характеристик високо-температурної міцності карбіду титана у порівнянні з карбідом ніобія, а також виключення із їх складу такого легуючого елемента, як вольфрам, який входить до складу сплаву ХТН-62. В процесі окиснення вольфраму утворюється рихлий маломіцний оксид WO_3 , наявність якого має негативний вплив на зносостійкість.

Література

1. Богуслаев В. А. Контактное взаимодействие сопряженных деталей ГТД / В. А. Богуслаев, Л. И. Ивченко, А. Я. Качан, В. Ф. Мозговой. – Запорожье изд. ОАО “Мотор Сич”, 2009. – 328с.
2. Пейчев Г. И. Износостойкие сплавы для контактных поверхностей деталей ГТД / Г. И. Пейчев, А. К. Шурин, Л. И. Ивченко и др. // Весник двигателестроение. – 2006. - №2. – С. 188-192.
3. Уотерхауз Р. Б. Фреттинг-коррозия. – Л.: Машиностроение, 1976. – 272с.
4. Hurriks P. L. The Mechanism of Fretting and the Influence of Temperature // And Lubric and Tribol. – 1975. – Vol. 27. - №6. – P. 209-214; 1976. - Vol. 28. - №1. – P. 9-17.
5. Шевеля В. В. Фреттинг-коррозия конструкционных материалов при повышенных температурах / В. В. Шевеля, А. В. Карасьов. // Трение и знос. – 1982. – Т. III, №2. – С. 257-264.
6. Шевеля В. В. Фреттинг-усталость металлов / В. В. Шевеля, Г. С. Калда. – Хмельницкий, изд. “Поділля”, 1998. 299с.
7. Iwabuchi A. Fretting wear of Inconel 625 at high temperature and high vacuum // Wear. – 1985. - №1-3. – P. 163-175.
8. Желов О. С. Износ металлов при фреттинг-коррозии в диапазоне среднеобъемных температур 18-200 °С // Проблемы трения и изнашивания: Наук. техн. сб. – К.: Техника. – 1979. – №16. – С. 46-51.
9. Окисление металлов. Том 1. Теоретические основы // Под ред. Ж. Бенера. – М.: Изд-во “Металлургия”, 1968. – 498с.
10. А. с. 674458 СССР МКИ⁵ С38/54. Сплав на основе железа / А. К. Шурин, В. Е. Панарин, Л. И. Ивченко, В. С. Попов. (СССР). - №2580991/22-02. – 1979.
11. Пат. України UA 8240 А, С 22С19/02. Сплав на основі кобальту / А. К. Шурін, Г. П. Дмитрієва, Т. С. Черєпова, Н. В. Андрєйченко. - №93006979; Опубл. 29. 03. 96, Бюл. №1.
12. Пат. України №69065 Зносостійкий композиційний сплав на основі кобальту. МПК: С22С19/07 (2006. 01); С22С29/10 (2006. 01). Заявл. 28. 07. 2011, опубл. 25. 04. 2012. Бюл. №8. – 5с. /Т. С. Черєпова, М. В. Кіндрачук, О. І. Духота, О. В. Тісов.
13. Духота О. І. Композиційні сплави для зміцнення контактних поверхонь бандажних полиць газотурбінних двигунів /О. І. Духота, М. В. Кіндрачук, О. В. Тісов //Проблеми трибології. – №4 (58). – 2010. – С. 101 – 104.

Отримана 25.07.12

M. Kindrachuk, O. Dukhota, O. Tisov, T. Cherepova
Modern trends in investigation and elaboration of alloys for high-temperature fretting-wear applications
 National Aviation University, Kyiv

The paper focuses on main tasks which should be solved in order to elaborate modern high-temperature alloy. Authors give explanation for high tribological properties of Co-TiC cemented carbides.