

*В.В. Харченко, М.А. Гловин, І.В. Костецький,
О.І. Духота, д.т.н., М.В. Кіндрачук, д.т.н.,
(Національний авіаційний університет, Україна)*

Дослідження впливу додаткового легування ренієм на зносостійкість при зношуванні в умовах високотемпературної фреттинг-корозії.

Представлені результати порівняльних випробувань на зношування в умовах високотемпературної фреттинг-корозії промислового сплаву ХТН-62 та експериментальних сплавів ХТН-63 та ХТН-66, легуваних ренієм в кількості 6 мас.%.

Ресурс роботи авіаційних газотурбінних двигунів значною мірою залежить від зносостійкості контактних поверхонь бандажних полиць робочих лопаток турбіни [1]. Інтенсивне зношування цих елементів відбувається внаслідок відносного вібраційного мікропереміщення спряжених поверхонь в режимі високотемпературної фреттинг-корозії.

Для підвищення зносостійкості торців бандажних полиць турбінних лопаток та їх відновлення при ремонті, застосовують методи наплавлення та напаювання на контактні поверхні захисних шарів і пластин із спеціально розроблених для цього жаро- і зносостійких сплавів. Серед ливарних сплавів зазначеного призначення найбільш сприятливим поєднанням властивостей для температурних умов роботи робочих лопаток турбіни володіють композиційні евтектичні сплави на основі заліза, кобальту і нікелю з карбідами тугоплавких металів. Їх висока жароміцність та зносостійкість досягається завдяки реалізації в структурі принципу композиційного зміцнення відносно пластичної металевої матриці армуючим каркасом твердих високомодульних боридних чи карбідних фаз. Комплексне легування основного матричного металу такими елементами як Cr, Al, W, Fe забезпечує додаткове зміцнення та підвищення їх жаро- і зносостійкості.

На сьогодні одним із розроблених промислових жаро- і зносостійких евтектичних сплавів, який має практичне використання і який за комплексом технологічних та експлуатаційних властивостей найбільш відповідає необхідним вимогам, є складнолегований сплав ХТН-62 системи (Co, Cr, Al, W, Fe) – NbC. Евтектичні сплави цієї системи містять до 19% об. карбідної фази. Підвищення їх міцності і зносостійкості збільшенням вмісту карбідної фази не вдається досягти через надмірне укрупнення кристалів карбідного каркасу і порушення однорідності структури в заевтектичних сплавах. В роботі [2] з метою подальшого підвищення експлуатаційних властивостей сплаву ХТН-62 із стандартним комплексом легування Cr, Al, W, Fe були проведені дослідження впливу додаткового легування Mo, Ta, Hf, Ta, Ce та Re на температуру плавлення і жаростійкість. Отримані результати дозволили серед досліджуваних легувальних елементів визначити Re, як найбільш перспективний для підвищення температури плавлення і жаростійкості сплаву ХТН-62. Легування нікелевих жароміцних сплавів Re в кількості 3-6 мас.%

підвищує структурну стабільність γ твердого розчину, сприяє диспергуванню γ -фази при розпаді пересиченого твердого розчину, що позитивно впливає на жароміцність.

Метою даної роботи є дослідження впливу додаткового легування Re на зносостійкість евтектичних сплавів системи Co–NbC, Ni–NbC при зношуванні в умовах високотемпературної фретинг-корозії.

З урахуванням результатів раніше виконаних досліджень [2-3], для дослідження впливу легування Re на зносостійкість в умовах, наближених до умов зношування контактних поверхонь бандажних полиць робочих лопаток турбіни ГТД, обрано сплави на основі кобальту Co (Cr, Al, W, Fe, Re)–NbC, і нікелю Ni (Cr, Al, W, Fe, Re)–NbC, які отримали відповідно назву ХТН-63 та ХТН-66. Базовим варіантом для порівняння слугував промисловий евтектичний сплав ХТН-62. Хімічний склад досліджуваних сплавів подано у таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних сплавів.

Сплав	Вміст компонентів, мас.%								
	Co	Ni	Nb	C	Cr	Al	W	Fe	Re
ХТН-62	48,2	-	15,5	1,8	20	2	9,5	3	-
ХТН-63	42,2	-	15,5	1,8	20	2	9,5	3	6
ХТН-66	-	42,2	15,5	1,8	20	2	9,5	3	6

Сплави виплавлялися методом електродугової плавки невитратним вольфрамовим електродом на мідному водоохолоджуваному поді в середовищі інертного захисного газу аргону.

Випробування на зношування проводилось на установці тертя МФК-1 за методикою, описаною в роботі [4]. Для випробувань при підвищених температурах установка МФК-1 додатково обладнана кільцевою нагрівальною електричною піччю. Для розміщення зразків в зоні нагріву використовувались спеціальні подовжені утримувачі. В торці утримувачів впаювались зразки, виготовлені із досліджуваних сплавів (нерухомий зразок у вигляді циліндра, рухомий контрзразок у вигляді циліндричної втулки). Припаювання зразків здійснювалось у вакуумі високотемпературним припосом ВПр-24, який використовується для напаювання захисних пластин із промислового сплаву ХТН-62 на контактні поверхні бандажних полиць робочих лопаток турбіни. Зразок і контрзразок утворюють в зоні контакту кільцеву поверхню тертя.

Випробування проводились в парах тертя зразок-контрзразок із одноіменних матеріалів при наступних умовах віброциклічного навантаження: питома навантаження на контактні поверхні зразків $P = 20$ МПа, амплітуда вібропереміщень $A = 120$ мкм, частота коливань $f = 30$ Гц, база випробування $N = 5 \cdot 10^5$ циклів. Температура нагріву зразків $T = 1073$ К.

Знос зразків визначався лінійним методом з точністю $1 \cdot 10^{-4}$ мм. Середнє значення лінійного зносу зразків перераховувались в об'ємний знос на одиницю площі контакту (приведений об'ємний знос V пр, $\text{мм}^3/\text{мм}^2$).

Дослідження поверхонь тертя проводилось за допомогою оптичного світлового мікроскопа МІМ-7 з цифровою приставкою. Мікроструктурний аналіз виконано з використанням оптичного мікроскопа "Neophot-32".

Структурні дослідження додатково легованого сплаву ХТН-62 вказують на те, що найбільш оптимальною є помірно заевтектична структура, оскільки такий сплав містить найбільшу допустиму кількість карбідної фази. При більшому вмісті цієї фази стає неможливою виплавка його методом індукційної плавки у вогнетривких тиглях 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, наприклад, в чисто евтектичному сплаві, високотемпературна зносостійкість буде істотно нижчою. Найбільш оптимальна структура сплаву у вихідному стані представлена первинними (надлишковими) кристалами карбіду ніобію та подвійною евтектикою, яка містить дві фази – твердий розчин легуючих елементів в кобальті і слабологований карбід ніобію.

Результати порівняльних випробувань на зношування досліджуваних сплавів подано на рис. 1.

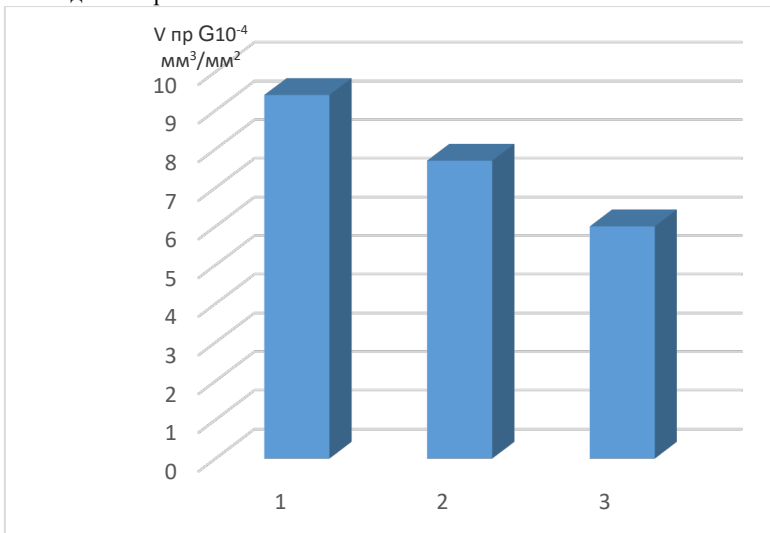


Рис. 1 Діаграма питомого об'ємного зносу сплавів ХТН-62(1), ХТН-63(2), ХТН-66(3) при випробуванні на зношування в умовах високотемпературної фретинг-корозії. Умови віброциклічного навантаження: питоме навантаження на контактні поверхні зразків $P = 20$ МПа, амплітуда вібропереміщення $A = 120$ мкм, частота коливань $f = 30$ Гц, база випробувань $N = 5 \cdot 10^5$ циклів. Температура нагріву зразків $T = 1073$ К. Пари одноіменні.

Як витікає із співставлення отриманих значень величин зносу, за прийнятих параметрів фрикційно-контактного навантаження і температури $T = 1073$ К легованих ренієм сплавів ХТН-63 та ХТН-66 перевищують зносостійкість промислового сплаву ХТН-62 відповідно у 1,2 і 1,6 рази. При цьому необхідно відзначити, що за однакового складу і вмісту легуючих елементів більш високу зносостійкість має сплав ХТН-66 на основі нікелю у порівнянні із сплавом на ХТН-63 на основі кобальту.

Мікроскопічний аналіз стану поверхонь тертя зразків після випробувань на зношування показав, що на поверхні трибоконтакту усіх досліджуваних сплавів формується досить щільні оксидні плівки, які покривають від 80% до 90% всієї площі трибоконтакту. На зразках сплавів ХТН-63, ХТН-66 на окремих ділянках спостерігались ознаки того, що під час тертя трибоплівка допускала певну пластичну деформацію. При цьому на таких ділянках явних ознак руйнування захисного оксидного шару не виявлялось.

Дослідженнями [5] встановлено, що однією з основних умов забезпечення високого рівня зносостійкості металів та металічних сплавів при зношуванні в умовах високотемпературної фретинг-корозії є формування і стійкість на поверхнях вторинних оксидних плівок. Такі вторинні структури, які утворюються в результаті високотемпературного трибоактивованого окиснення, будуючи в ультрадисперсному, тонкоплівковому стані виконують роль екрануючого захисного прошарку. Їх захисну дію пов'язують з запобіганням розвитку процесів схоплення та адгезійного руйнування, а також перерозподілом та зниженням в зоні трибоконтакта напружень від дії зовнішніх зусиль і сил тертя.

Згідно з визначеними принципами [5] для забезпечення стійкості оксидних плівок до руйнування, з одного боку, матеріал основи в робочому діапазоні температур повинен зберігати достатньо високу міцність. З другого боку, сама оксидна плівка повинна допускати певний рівень пластичної деформації. Цю умову можна визначити як критично допустиму для даної системи “метал-оксид” і температурно-силових умов фретинга деформацію, яку може допускати оксидна плівка без руйнування. Закономірно, що за інших однакових умов, температура досягнення такої деформації і її величина буде тим більшою, чим більша жароміцність матеріалу основи, менша товщина і більша пластичність оксидної плівки. Такій умові в найбільшій мірі можуть відповідати некристалічні аморфні склоподібні оксидні плівки. Вважається, що такі плівки навіть за звичайних температур можуть витримувати значну пластичну деформацію і здатні швидко відновлюватися при руйнуванні.

Висновки. Поліпшення умов для утворення некристалічних аморфних оксидних плівок сприяє обробленню поверхні високоенергетичним лазерним випромінюванням з метою отримання аморфних поверхневих шарів металу, а також введення в матеріал основи спеціальних склоутворюючих легуючих домішок. В цьому плані більш високу зносостійкість сплавів ХТН-63 та ХТН-66 порівняно з промисловим сплавом ХТН-62 можна пояснити тим, що легування ренієм поряд з підвищенням температури плавлення (а, відповідно, і жароміцності), сприяє зниженню ступеня кристалічності вторинних оксидних

трибоплівков. Відповідно підвищується їх пластичність та стійкість до руйнування.

Список літератури

1. Організація та триботехнології авіаремонтного виробництва / А.П. Кудрін, О.І. Духота, М.В. Кіндрачук, Г.М. Зайвенко. – К.: НАУ, 2015. – 242 с.
2. Dependence of properties of cobalt alloy HTN-62 on additional alloying / T.S. Cherepova, G.P. Dmitrieva, T.V. Pryadko et al. // *Function Materials*. – 2021. – 28, №2 – P. 69-75.
3. Research of the Properties of Co-TiC and Ni-TiC Hip-Sintered Alloys / T.S. Cherepova, G.P. Dmitrieva, O. Tisov, O. Dukhota, M. Kindrachuk // *Acta Mechanica and Automatica*.: – 2019. Vol.13(f). – P. 57-67.
4. Тісов О.В. Нові особливості утворення трибоструктур на поверхні тертя спеціальних сплавів системи So-TiS / О.В. Тісов // *Проблеми трибології*. – 2015. – №3. – С. 6-13.
5. Духота О.І. Еволюційна модель трибо системи на загальні принципи забезпечення зносостійкості матеріалів в умовах високотемпературного фретингу // *Проблеми тертя та зношування*.: – 2015. – №4(69). – С. 10-20.