

УДК 621.2.082.18

О. В. ТИЦОВ

Національний авіаційний університет, Україна

## АНАЛІЗ ТРИБОЛОГІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ЛИВАРНИХ КОБАЛЬТОВИХ СПЛАВІВ В УМОВАХ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ФРЕТИНГУ

*У роботі досліджено трибологічну поведінку ливарних евтектичних сплавів на основі кобальту, зміцнені карбідами ніобію та титану в умовах високотемпературного фретингу. Проаналізовано перебіг фізичних і хімічних процесів, що відбуваються на поверхнях тертя.*

**Ключові слова:** високотемпературний фретинг, кобальт, карбід ніобію, карбід титану, зносостійкість, поверхневе деформування.

**Вступ.** У сучасних умовах високої конкуренції на ринку авіаційних перевезень постійно зростає роль надійності і довговічності літальних апаратів, особливо якщо брати до уваги вартість ремонту і витрати на підтримання льотної придатності. Тут особливо варто виділити газотурбінний двигун і деталі гарячої частини газового тракту. Виходячи з кількості деталей на двигун, умов роботи і частоти виходу з ладу до найбільш значущих слід віднести робочі лопатки турбіни, і особливо – робочі поверхні бандажних полиць [1]. Внаслідок їх зношування суттєво зростає вібронавантаження двигуна і інших агрегатів та елементів конструкції літака, що пришвидшує їх руйнування. Підвищення працездатності і ресурсу цього трибосполучення є одним із найбільш важливих завдань під час модернізації існуючих і особливо – при створенні двигунів нового покоління [2, 3], де поряд із покращеними робочими характеристиками суттєво зростають навантаження від газового потоку, а також і від високих температур.

Для досягнення покращених трибо логічних характеристик бандажного сполучення робочих лопаток турбіни розроблено велику кількість матеріалів, покриттів і технологій їх нанесення, зі своїми перевагами і недоліками. В роботах [4, 5] показано, що ефективним методом підвищення зносостійкості бандажних полиць може бути напаявання зносостійких матеріалів, у тому числі і евтектичних сплавів на основі кобальту, у тому числі і експериментального сплаву П-69 [6].

**Метою** даної роботи є дослідження фізичних і хімічних процесів, що перебігають на поверхнях тертя ливарних евтектичних сплавів на основі кобальту, зміцнених карбідами титану, в умовах високотемпературного фретингу. Для порівняння отриманих результатів використовували сплав ХТН-69, що сьогодні використовується для напаявання на контактні поверхні бандажних полиць лопаток турбіни з метою їх відновлення та поверхневого зміцнення.

**Матеріали і методика дослідження.** Ливарні евтектичні сплави виготовлялися методом електродугового плавлення в атмосфері аргону. Для досягнення рівномірного розподілу легувальних елементів у всьому перетині матеріалу проводили чотирикратне переплавлення з перевертанням виливків. Склад досліджених сплавів наведено в табл.

Дослідження трибологічних характеристик зразків використано стандартну методику для дослідження матеріалів в умовах високотемпературного фретингу з кільцевим контактом в однойменних парах тертя на установці МФК-1 [7].

Таблиця

Склад композиційних сплавів

Сплав	Co % мас	TiC % мас	NbC % мас	Cr % мас	Al % мас	Fe % мас	W % мас
ХТН-62	48,25	0	19/17,25	20	2	3	9,5
П-69	55,5	30/19	0	19,6	2,95	2,95	0

Параметри навантаження обрали наступними: питоме контактне навантаження –  $P = 30$  МПа; амплітуда відносного переміщення зразків –  $A = 120$  мкм; частота коливань – 30 Гц; база випробувань –  $5 \cdot 10^6$  цикл.; температура оточуючого середовища – 650-1050 °С. Фотографування і поверхні для металографічного аналізу виконували за допомогою електронного мікроскопа РЕММА, а також – світлового мікроскопа МІМ-10.

**Результати проведених досліджень** засвідчили (рис. 1), що за температури 650 °С сплав П-69 значно перевищує за зносостійкістю сплав ХТН-62. Із подальшим зростанням температури різниця продовжує збільшуватися.

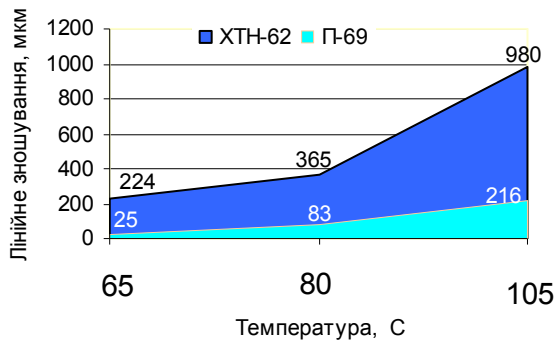
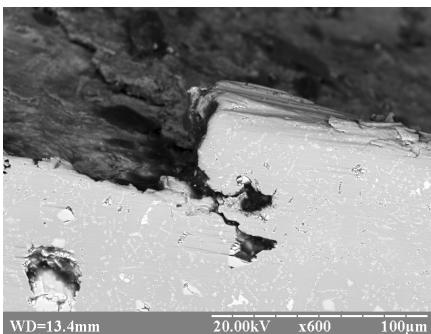
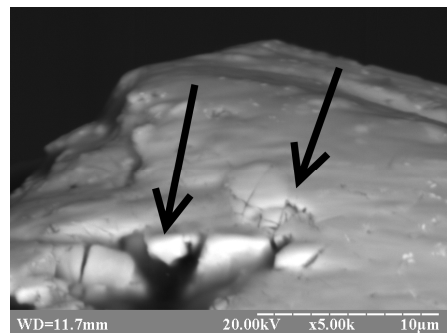


Рис. 1 Зношування композиційних сплавів на основі кобальту в умовах високотемпературного фретингу

Аналіз стану поверхні тертя, а також стану матеріалу під доріжкою тертя шарів (рис. 2) дозволяє зробити висновок про руйнування внаслідок пластичного деформування. Таким чином, в результаті дії зовнішнього циклічного навантаження в матеріалі виникають знакозмінні напруження, що призводять за високих температур до утворення деформаційного рель'єфу у вигляді напливів металу. Крім того, деформування викликає появу тріщин у зернах карбідів, особливо – в первинних кристалах.



а



б

Рис. 2 Мікроструктура сплаву ХТН-62 під доріжкою тертя, а – деформування поверхні тертя; б – руйнування первинних кристалів карбиду ніобію

Внаслідок цього подрібнені й викришені карбіди потраплятимуть у зону тертя, і це підвищить інтенсивність абразивного зношування. Тривала дія знакозмінних навантажень призводить до збільшення інтенсивності пластичних деформацій поверхні. При досягненні межі втомної міцності виступи мікронерівностей пластично деформуються. Унаслідок цього утворена захисна оксидна структура відділяється від механічно нестійкого підповерхневого шару матеріалу (рис. 3, *a*). Таке сколювання відбувається на ділянках фактичного контакту, що сприяє процесам відкривання ювенільних ділянок металу і схоплюванню. Крім того, поверхні таких сколів мають підвищену дефектність кристалічної ґратки, що сприяє їх активному окисленню. Високу інтенсивність поверхневого деформування можна пояснити низьким вмістом карбіду ніобію в сплаві, а також – його низькою жаростійкістю при температурах вище 800 °С [8].

На макрорівні багаторазово повторюване накладання напружень, що перевищують межу текучості матеріалу, призводить до мікрODEFORMУВАННЯ І втомного руйнування поверхні тертя, утворення характерного «терасоподібного» мікрорельєфу (рис. 3, *б*).

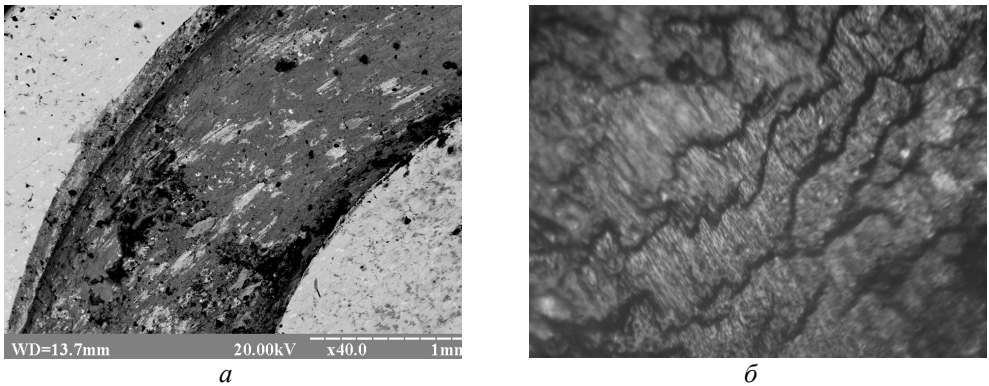


Рис. 3 Топографія поверхні тертя сплаву ХТН-62: *a* – загальний вигляд,  $\times 40$ ; *б* – втомне руйнування поверхні тертя (утворення «терасоподібного рельєфу»),  $\times 500$

В результаті заміни карбіду ніобію на карбід титану збільшилися міцність і жаростійкість наповнювача. Збільшення також і кількості карбідної фази у ливарному сплаві П-69 до 30 % об. дозволило значно зменшити інтенсивність деформаційних процесів на поверхнях тертя. Аналіз мікроструктури поверхневого шару евтектичного сплаву на основі кобальту П-69 дає підстави вважати, що такої його кількості недостатньо, щоб запобігти деформуванню поверхневого шару, тому руйнування поверхонь цього матеріалу внаслідок пластичного деформування в умовах високотемпературного фретингу достатньо виражене. Типова деформаційна структура поверхневого шару під «доріжкою» тертя сплаву П-69 зображено на рис. 4, *a*. Витягнутість карбідів і їх щільне прилягання один до одного в умовах деформування призводить до руйнування і дроблення видовжених зерен. В результаті цього зміцнююча фаза викришується, утворюючи порожнини в металі.

Супутнім процесом, пов'язаним з поверхневим деформуванням, є викришування крупних карбідних зерен з поверхні тертя (рис. 4, *б*). Такі зерна, з розміром 10...40 мкм. при певних умовах зовнішнього знакозмінного динамічного навантаження можуть відігравати роль абразивних частинок.

Можна припустити, що тріщини у великих первинних карбідних зернах, а також – руйнування витягнутих дрібних призводить до знеміцнення поверхневого шару металу. Як наслідок, процеси деструкції пришвидшуються, активізується

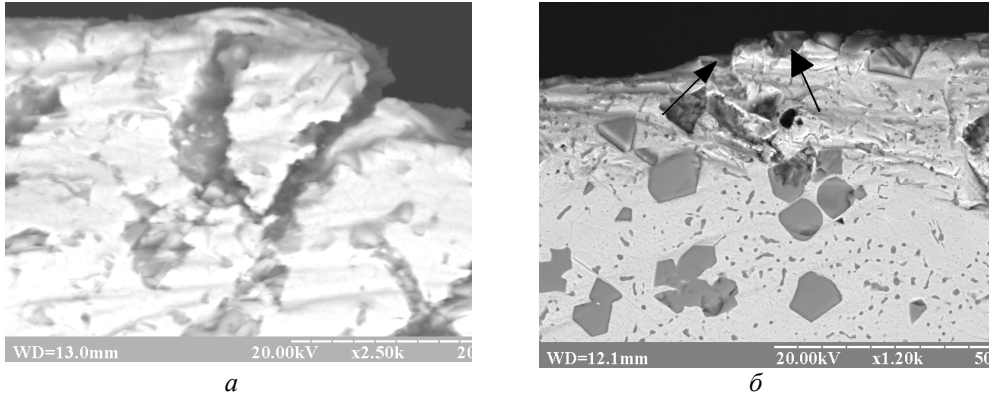


Рис. 4. Мікроструктура сплаву П-69 під доріжкою тертя. *a* – руйнування карбідних зерен,  $\times 2500$ ; *б* – деформування поверхневого шару, викришування карбідів (показано стрілками),  $\times 1200$

схоплювання поверхонь тертя, перенесення матеріалу, неможливість відновлення захисного оксидного шару, однак такий процес активно розвивається лише за температури  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ . За нижчих температур ( $650$  і  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) під поверхневий шар достатньо міцний, і його деформування не виявлено.

Загалом, підсумовуючи вищевикладений матеріал, можна стверджувати, що для досліджуваних матеріалів процес зношування, а відповідно – і сукупність фізичних та хімічних процесів є схожою. Їх можна поділити на кілька етапів, що перераховані нижче.

1. На етапі припрацювання на поверхнях тертя утворюються захисні оксидні шари, відбувається окиснення поверхні карбідних зерен і матеріалу матриці. Утворюються дифузійні потоки з глибини сплаву хімічних елементів, що більш активно окислюються – хрому та алюмінію. З підвищенням температури ці процеси пришвидшуються. В мікровпадинах поверхні накопичуються продукти зношування.

2. Унаслідок тривалого навантаження в умовах високотемпературного фретингу і зростання товщини оксидного шару, особливо за температур до  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , відбувається початкове накопичення втомного пошкодження, поява незначних за площею і розміром деформованих ділянок матеріалу, які привляються у вигляді тріщин оксидного шару на поверхні тертя.

3. Деформування поверхневого шару матеріалу призводить до руйнування і викришування карбідної фази з поверхні, результатом чого є зменшення досліджених евтектичних сплавів. Деформування також призводить до руйнування оксидного шару.

4. Внаслідок великої дефектності поверхонь сколів, частинок відокремленого і деформованого металу відбувається інтенсифікація процесів окислення, порушується рівновага між утворенням і руйнуванням захисних поверхневих шарів.

Таким чином, можна стверджувати, що вміст карбіду ніобію в сплаві ХТН-62 на рівні  $20\%$  є недостатнім для зміцнення матриці і запобігання пластичним деформаціям за умов, у яких відбувалося дослідження. Збільшення вмісту карбідної фази може істотно поліпшити трибологічні властивості сплаву.

Заміна карбіду ніобію карбідом титану із одночасним зростанням його частки в сплаві до  $30\%$  суттєво покращує властивості сплаву. Процеси деформації

стають істотними за температури близько 1000 °С, тоді як для сплаву ХТН-62 ці процеси стають істотними за температур 800 °С.

**Висновки.** На основі металографічних аналізу встановлено провідні процеси, що перебігають на поверхнях тертя евтектичних сплавів на основі кобальту, зміцнених карбідами ніобію і титану. Встановлено, що зростання вмісту карбідної фази зростає міцність поверхневого шару, знижується інтенсивність деформування поверхневого шару матеріалу і руйнування захисного оксидного шару. Також суттєво покращується зносостійкість сплаву в умовах високо температурного фретингу. Збільшення вмісту карбідної складової сприятиме подальшому зміцненню матеріалу, покращенню його трибологічних властивостей. Однак, для евтектичних сплавів гострою є проблема зростання розміру первинних кристалів, що окрихчуватиме сплав. Зменшити розмір карбідів, і одночасно збільшити їх частку в сплаві можна шляхом використання модифікаторів при кристалізації або нерівноважних умов кристалізації.

#### Список літератури

1. Івченко Л. Й. Процеси контактної взаємодії в трибоз'єднаннях і зносостійкість жароміцних сплавів в екстремальних умовах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук.: 05.02.04 «тертя та зношування в машинах» // Л. Й. Івченко. – Запорізький державний технічний університет. – 1999 – 36с.
2. Контактное взаимодействие сопряженных деталей ГТД./ [В. А. Богуслаев, Л. И. Ивченко, А. Я. Качан, В. Ф. Мозговой.] Издательский комплекс ОАО «Мотор Сич». –2009. – 328 с.
3. Ивченко Л. И. Изнашивание жаропрочных материалов при вибрациях. / [Л. И. Ивченко, А. Я. Качан] // Вестник двигателестроения. № 2.– 2008. С. 160-163.
4. Композиційні сплави для зміцнення контактних поверхонь бандажних полиць робочих лопаток газотурбінних двигунів / [М. В. Кіндрачук, О. І. Духота, Т. С. Черепова, О. В. Тісов] // Проблеми трибології: Міжнародний науковий журнал – 2010. - №4.- С. 101-104.
5. Кіндрачук М. В. Зносостійкі та жароміцні сплави на основі кобальту / [М. В. Кіндрачук, О. В. Тісов] // Наукоємні технології. Науковий журнал.– К.: вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк». – 2010. - №2 . – С. 26 – 29.
6. Пат. 69065 України, МПК С22С. 19/07 (2006.01). Зносостійкий композиційний сплав на основі кобальту / Т. С. Черепова, М. В. Кіндрачук, О. І. Духота, О. В. Тісов. Заявл. 28.07.2011; Опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8. – 4 с.
7. Духота О. І. Дослідження зносостійкості жароміцних композиційних сплавів в умовах високотемпературного фретингу / [О. І. Духота, О. В. Тісов] // Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник – К.: НАУ – 2010. - №53. – С.195-200.
8. Войтович Р. Ф. Окисление карбидов и нитридов / Р. Ф. Войтович – К.: Наукова думка.–1981р. – 191с.

---

*O. V. TISOV*

**TRIBOLOGICAL BEHAVIOUR OF CAST COBALT-BASED ALLOYS  
UNDER HIGH TEMPERATURE FRETTING-WEAR**

The work investigates the tribological behaviour of eutectic cobalt-based cast alloys reinforced by Titanium and Niobium carbides under high temperature fretting-wear. The temperature range of wear testing – 650-1050°C. It was found that the main processes running on the friction surfaces are the metal deformation, grinding and destruction of carbides, deterioration of protective oxide layer, at high temperature and massive deformation galling take place. Increase of carbide phase ratio in the alloy is a proposition in order to decrease the rate of destruction of the material.

**Keywords:** high temperature fretting-wear, Cobalt, Titanium carbide, Niobium carbide, wear resistance, surface deformation.

**Тісов Олександр Вікторович** – канд техн. наук, доцент кафедри машинознавства, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 78 42, E-mail: [tissov@ukr.net](mailto:tissov@ukr.net).