

УДК 620.178.16 (045)

А.М. Хімко, к.т.н., доц.
С.М. Задніпровська, асп.
О.Е. Якобчук, старш. викл.

ЗНОСОСТІЙКІСТЬ СПЛАВУ VT-22 З КОЛЬОРОВИМИ СПЛАВАМИ ПІД ЧАС РЕВЕРСИВНОГО ТЕРТЯ

Національний авіаційний університет

Проведено випробування зносостійкості титанового сплаву VT-22 з відомими кольоровими сплавами під час тертя з віброковзаючим контактом. Установлено залежності зношування титанового сплаву від питомого навантаження. Визначено матеріал для контакту з титановим сплавом VT-22, за якого мінімальне сумарне зношування пари тертя.

зносостійкість, коефіцієнт тертя, кольорові сплави, мікротвердість, питоме навантаження, титановий сплав VT-22, топографія поверхонь

Постановка проблеми

У сучасному машинобудуванні, зокрема авіаційному, з кожним роком розширюється використання титанових сплавів через їх властивості, високу механічну міцність. При підвищених температурах (250–500°C) титанові сплави за міцністю перевершують високоміцні сплави алюмінію і магнію.

Мала густина (4500 кг/м³) сприяє зменшенню маси матеріалу, що використовується.

Надзвичайно висока корозійна стійкість обумовлена здатністю титана утворювати на поверхні тонкі (5–15 мкм) суцільні плівки оксиду TiO₂, що міцно пов'язані з масою металу.

Питома міцність (відношення міцності і густини) кращих титанових сплавів досягає 30–35 і більше, що майже удвічі перевищує питому міцність легованих сталей [1].

Але титан значно дорожче за залізо, алюміній, мідь, магній. Унаслідок активної взаємодії при високих температурах, особливо в рідкому стані, зі всіма газами, що становлять атмосферу, титан і його сплави можна плавити лише у вакуумі або в середовищі інертних газів.

Сплави титана мають такі недоліки [1]:

- високу вартість виробництва;
- труднощі залучення у виробництво титанових відходів;
- погані антифрикційні властивості: налипання титана на різні матеріали (титан в парі з титаном не може працювати на тертя);
- високу схильність титана і багатьох його сплавів до водневої крихкості і сольової корозії;
- погану оброблюваність різанням, аналогічну оброблюваність нержавіючих сталей аустенітного класу;
- велику хімічну активність, схильність до зростання зерна за високої температури та фазові перетворення під час зварювального циклу.

© А.М. Хімко, С.М. Задніпровська, О.Е. Якобчук, 2010

Проте титанові сплави з кожним роком все більше впроваджують у виробництво як у машинознавстві, так і в авіаційній промисловості.

Титанові сплави відіграють велику роль в авіаційній техніці, де прагнуть одержати найлегшу конструкцію в поєднанні з необхідною міцністю. Ці матеріали застосовуються в конструкціях авіаційних реактивних двигунів, що дозволяє зменшити їх масу на 10–25 %. З титанових сплавів виготовляють [2]:

- обшивку;
- деталі кріплення;
- силовий набір;
- деталі шасі;
- різні агрегати;
- диски і лопатки компресора;
- деталі напрямного апарата;
- кріплення.

Найбільше в авіабудуванні використовується титановий сплав VT-22 завдяки його більшій антифрикційності порівняно з іншими титановими сплавами. Ці деталі в процесі роботи контактують з різними матеріалами як конструктивно, так і під час тертя.

Аналіз досліджень та публікацій

Зносостійкість титанових сплавів – це актуальна проблема, яка нині вирішена неповністю. Цій проблемі присвячено праці [2–4] та ін.

Автори праці [2] під час досліджень зносостійкості покриття нітриду титану, нанесеного на сплав VT-20 у парі з різними конструкційними матеріалами встановили, що підбір оптимального сполучення матеріалу в кожному конкретному випадку необхідно виконувати індивідуально. Під час цього, необхідно враховувати можливість зміни ведучих фрикційних процесів й інтенсивність зношування контактуючих матеріалів у випадку зміни умов віброконтактного навантаження.

У роботі [3] під час досліджень зносостійкості титанових сплавів автор показав, що найбільшу зносостійкість серед досліджуваних сплавів має сплав ВТ-22. Зношування титанових сплавів визначається їхньою міцністю, твердістю, корозійною стійкістю, схильністю до насичення водню і водневої окрихкості [1; 3]. Оптимальне сполучення цих властивостей забезпечить найбільш високий опір зношуванню.

Титановий сплав, з огляду своїх особливостей до схоплювання, практично не застосовується без поверхневої обробки (поверхнево-пластичне деформування, хіміко-термічна обробка, напилювання газотермічними покриттями і т.д.). Але обробці піддаються переважно ті ділянки, де відбувається заплановане конструктором переміщення – тертя. Однак існує безліч місць на великих авіаційних деталях (пресові посадки, шліцьові з'єднання, місця стяжки кріпленням, заклепками і т.д.), де відбуваються мікропереміщення, – внаслідок розвитку фретинг-корозії. Ці ділянки практично не піддаються обробці.

Дотепер не знайдено матеріалу, задовільно працюючого в парі з незміцненим титаном.

Метою роботи є визначення зносостійкості незміцненого титанового сплаву ВТ-22 у парі з кольоровими сплавами при реверсивному терті, та підбір оптимального сполучення матеріалів залежно від зміни умов навантаження.

Методика випробувань на зносостійкість

Випробування на зносостійкість проводили на установці, що імітує вібрацію МФК-1 за схемою контакту площа–площа відповідно до ГОСТ 23.211-80.

Сутність методу полягає в тому, що циліндричний рухливий зразок (контрзразок), який стикається торцем із нерухомим циліндричним зразком при заданому тиску, приводиться в зворотно-обертальний рух із заданими амплітудою і частотою.

Дослідження виконувалися за навантаження 10, 20 та 30 МПа й амплітуді 130 та 175 мкм. Частота коливань залишалася незмінною і становила 30 Гц. База випробувань відповідала $5 \cdot 10^5$ циклів. Дослідження зміни лінійного зношування й інтенсивності зношування кольорових сплавів проводилися на повітрі під час тертя без мастил.

Зразки являють собою циліндричні ролики діаметром 20 мм, виготовлені з титанового сплаву ВТ-22, термообробленому на прийнятому для авіації режимі тріступеневої обробки, що полягає в стабілізуючому відпалі, м'якому загартуванні на повітрі з наступним старінням [4].

Контртіла для випробувань виготовлялися зі сплавів БрОФ-10-1, БрБ2, БрАЖ-9-4, ВТ-22, МЛ5, Д16Т, 7Х21ГАН5Ш та 95Х18Ш. Матеріали вибиралися з розрахунку одних з найбільш розповсюджених кольорових сплавів, що застосовуються в авіації.

Вимірювалося лінійне зношування нерухомого зразка за допомогою оптиметра вертикального типу ИКВ, за задану кількість циклів, за значенням якого визначається зносостійкість досліджуваного матеріалу. Кількість експериментів становило по три на кожену точку.

Зносостійкість титанового сплаву ВТ-22 з кольоровими сплавами

Результати досліджень показано на рис. 1 та 2 [5].

З аналізу гістограми зносостійкості матеріалів випливає, що зношування титанового сплаву ВТ-22 значно менше, ніж зношування випробуваних кольорових матеріалів. Виключенням є лише сталь 07Х21ГАН5Ш, зносостійкість якого значно вище за ВТ-22, що пояснюється більшою твердістю сплаву за рахунок вмісту нікелю і значної частки хрому – 21%. На рис. 2 показано, що найбільше зношування титанового сплаву ВТ-22 спостерігається під час тертя двох нержавіючих сталей 95Х18Ш та 07Х21ГАН5Ш.

Причому зношування титанового сплаву в парі з 95Х18Ш значно більший ніж під час тертя з 07Х21ГАН5Ш на всьому діапазоні навантажень. При збільшенні навантаження також збільшується різниця зношування між двома кривими. При навантаженні в 10 МПа зношування титанового сплаву в парі з Д16Т дещо вищий ніж при терті в парі з 07Х21ГАН5Ш.

Дослідження показують, що титан і його сплави під час роботи з іншими металами або переносяться (налипають) на поверхню більш твердого металу, після чого тертя протікає як в парі титан–титан, або відбувається перенесення більш м'якого металу на поверхню титана, і тертя протікає як в однійменній парі з м'якого металу. У таких парах спостерігається і взаємне перенесення.

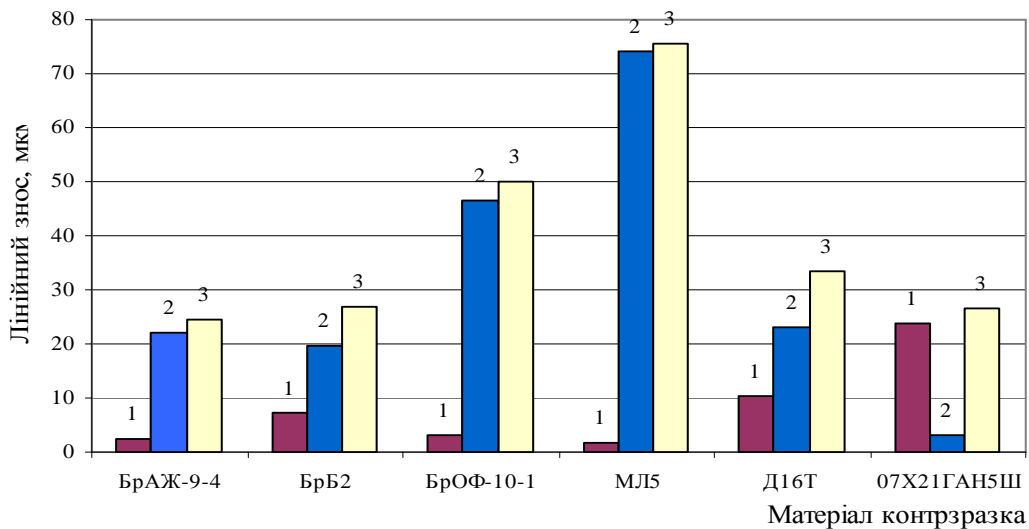


Рис. 1. Гістограми зміни лінійного зношування титанового сплаву VT-22 (1) та кольорових сплавів (2) за питомого навантаження в 20 МПа та амплітуді в 130 мкм; 1 – лінійне зношування титанового сплаву VT-22; 2 – лінійне зношування авіаційних кольорових матеріалів; 3 – сумарне зношування пари тертя

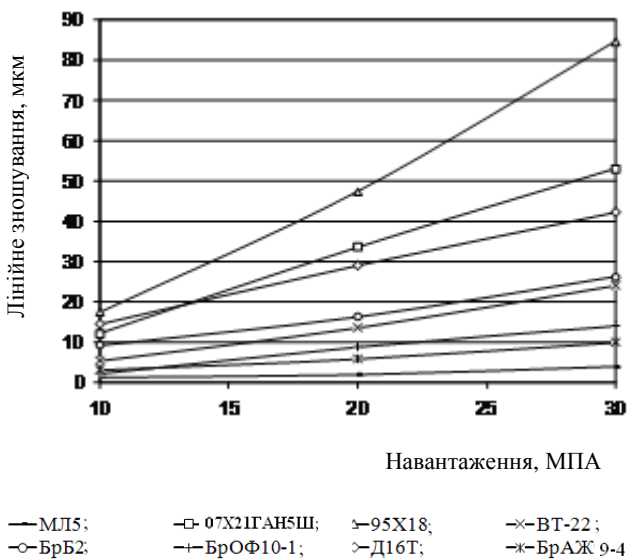


Рис. 2. Зносостійкість сплаву VT-22 з кольоровими сплавами при зміні питомого навантаження ($P = 20$ МПа, $A = 175$ мкм)

Тертя титанового сплаву по нержавіючим сталям відбувається аналогічно описаному механізму для пари тертя титан–титан. У цьому випадку інтенсивність зношування титана звичайно пропорційна тиску, коефіцієнт тертя досягає значень, близьких до його значень при терті титана по титану. Тертя носить характер схоплювання. Розрив зміцнених деформацією і газонасичення містків зварювання відбувається в глибині поверхні титанових зразків. У результаті поверхня сталевого контртіла виявляється покритою частинками налиплого сплаву титана.

Зносостійкість титанового сплаву VT-22 зі сплавом алюмінію Д16Т при навантаженні в 10 МПа така, як і під час випробувань із нержавіючими сплавами.

Значне зношування титанового сплаву відбувається внаслідок окиснювання поверхні алюмінієвого сплаву й утворення в зоні тертя твердих абразивних часток Al_2O_3 . Це підтверджує топографія доріжок тертя (рис.3. з, л).

При збільшенні навантаження до 30 МПа зношування титанового сплаву дещо менше ніж у сплаву 07X21GAN5Ш.

Зі збільшенням навантаження дія твердих абразивних часток на м'якому алюмінієвому сплаві проявляється менше.

Під час тертя берилієвої бронзи BrB2 та сплаву VT-22 відбувається подібна картина, що і Д16Т з VT-22, але не настільки явна.

Окисли берилію BeO мають меншу твердість (близько 13 ГПа) і розмір, ніж корунд, що досягає твердості в 25 ГПа [6].

У результаті на поверхні, як титанового сплаву, так і контртіла відбувається інтенсивне абразивне зношування, що підтверджує топографія поверхонь тертя (рис. 3, б, д).

Під час випробування титанового сплаву по титановому сплаву відбувався постійне перенесення матеріалу на найбільш зміцнену поверхню. Аналіз зносостійкості сплаву VT-22 по VT-22 за зміни питомого навантаження показує, що зношування титанового сплаву більший ніж у бронз BrOF10-1, BrAJ9-4 та магнієвого сплаву ML5.

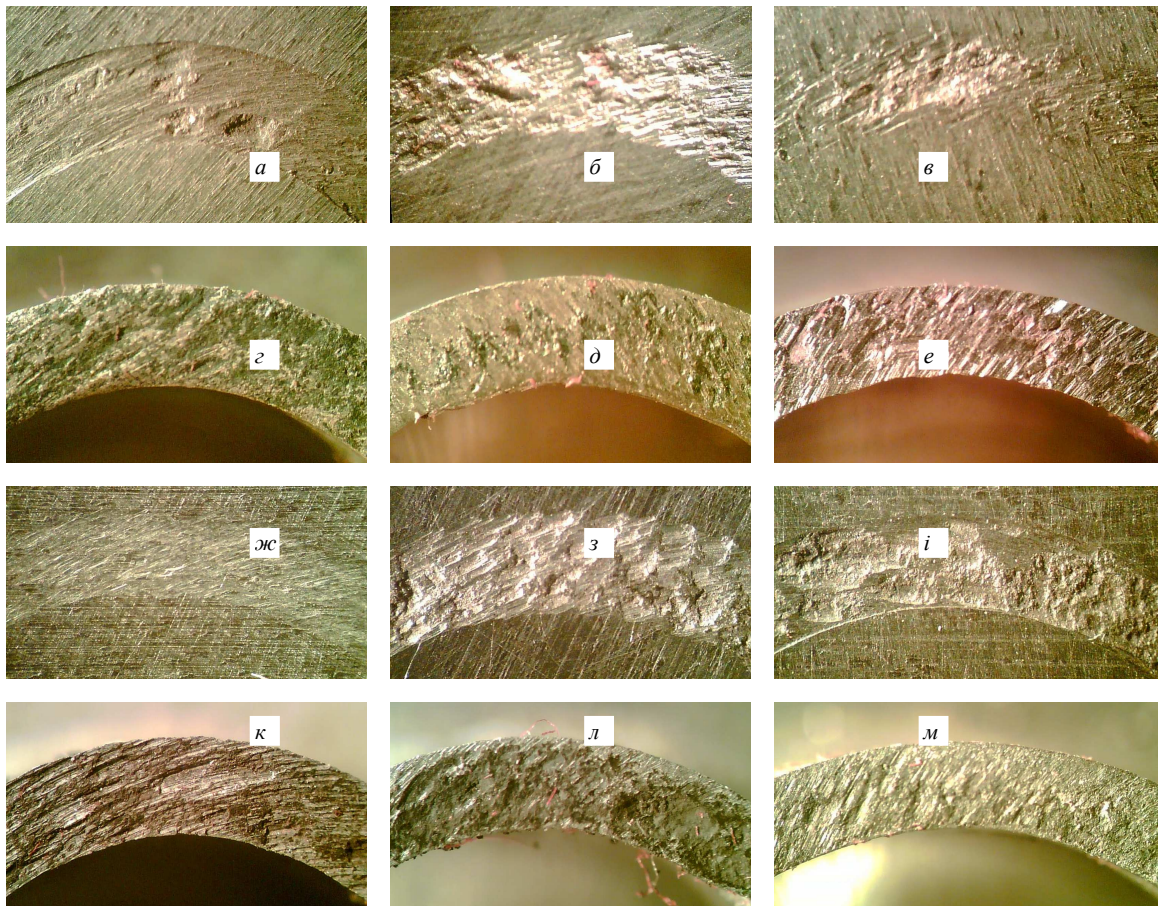


Рис. 3. Топографія тертя нерухомого (*а, б, в, ж, з, і*) і рухомого (*г, д, е, к, л, м*) зразків під час випробувань на зносостійкість ($A - 130$ мкм, $P - 20$ МПа):

- а* – сплав ВТ-22 у парі з бронзою БрОФ10-1;
- б* – сплав ВТ-22 у парі з бронзою БрБ2;
- в* – сплав ВТ-22 у парі з бронзою БрАЖ9-4;
- г* – БрОФ10;
- д* – БрБ2;
- е* – БрАЖ99-4;
- ж* – сплав ВТ-22 у парі з МЛ5;
- з* – сплав ВТ-22 у парі з Д16Т;
- і* – сплав ВТ-22 у парі з 7Х21ГАН5Ш;
- к* – МЛ5;
- л* – Д16Т;
- м* – 7Х21ГАН5Ш

Крива зносостійкості сплаву ВТ-22 (рис. 2) майже еквідистантна відносно кривої зносостійкості сплаву ВТ-22 з берилієвою бронзою БрБ2, що вказує на однаковий механізм зношування. Але під час тертя титану з бронзою БрБ2 відбувається абразивне зношування, а з титаном відбувається взаємне перенесення більш м'якого титана на більш зміцнений і в деяких випадках спостерігається вибіркоче перенесення.

Високе зношування сплаву ВТ-22 з ВТ-22 пояснюється тим, що значна частина титанового сплаву зі зразка перенесена на контрзразок у вигляді розмазаного матеріалу в процесі схоплювання.

Найменша зносостійкість у парі тертя сплаву ВТ-22 з магнієвим сплавом МЛ5. Причому зношування сплаву ВТ-22 мінімальний, а зношування контртіла максимальний серед випробуваних матеріалів.

При збільшенні питомого навантаження з 10 до 30 МПа зношування титанового сплаву ВТ-22 майже не змінився. Подібна картина пояснюється досить м'якими [6], дрібнодисперсними окислами і самим магнієвим сплавом МЛ5, що працювали як проміжний шар. Це підтверджує топографія поверхонь тертя, показана на рис. 3, *ж*, *і*, та коефіцієнт тертя (див. таблицю).

**Коефіцієнт тертя сплаву VT-22 у парі
з кольоровими матеріалами від напрацювання**

Напрацювання циклів	Матеріал контрзразка					
	БрАЖ 9-4	БрБ2	БрОФ- 10-1	МЛ5	Д16Т	07Х21ГАН5Ш
$3 \cdot 10^5$	0,22	0,28	0,28	0,14	0,33	0,19
$5 \cdot 10^5$	0,20	0,25	0,25	0,12	0,22	0,17

Сталі коефіцієнти тертя титанового сплаву VT-22 у парі з авіаційними конструкційними кольоровими сплавами при напрацюванні в $3 \cdot 10^5$ та $5 \cdot 10^5$ циклів подано в таблиці.

Найбільший коефіцієнт тертя під час зношування з матеріалом Д16Т унаслідок дії абразивних часток. Найменший коефіцієнт пари тертя VT-22 – МЛ5. Це пояснюється дією проміжних дрібнодисперсних окислів сплаву МЛ5 та малою мікротвердістю магнієвого сплаву [7].

Невеликий коефіцієнт тертя спостерігається також у пари тертя сплавів 07Х21ГАН5Ш та VT-22. Однак зношування титану при цьому один з найбільших.

Під час тертя в ямки та бороздки (рис. 3, *г*) на титановому зразку накопичилися дрібнодисперсні оксиди титанового сплаву, що працювали як проміжний шар. Велике зношування титанового сплаву пояснюється постійним схопленням титану з твердішою поверхнею нержавіючої сталі і, як наслідок, постійним та інтенсивним його зношуванням.

Високі коефіцієнти тертя також спостерігаються і при терті зі сплавами БрБ2 та БрОФ10-1. Однак аналіз топографії доріжок тертя (рис. 3, *а, б*) показує різні процеси, які відбуваються при зношуванні цих матеріалів. Під час тертя бронзи БрБ2 високий коефіцієнт тертя та глибокі ямки на топографії вказують на абразивний характер зношування. Зовсім інша картина спостерігається під час тертя бронзи БрОФ10-1.

Поверхня тертя титанового сплаву гладка з дрібними подряпинами. У деяких місцях є глибокі вириви внаслідок схоплювання. Олов'яниста бронза має дуже високі характеристики за зносостійкості з твердими загартованими сталлями, де реалізується ефект без-зношування.

Під час випробувань з титановим сплавом спостерігаємо дещо подібну картину. Зношування титану одне з самих низьких, високе зношування матеріалу БрОФ-10-1 пояснюється вмістом олова в бронзі, що

під час тертя розмазується по поверхні сплаву VT-22 і інтенсивно окиснюється. Зношування титанового сплаву при зміні питомого навантаження одне з найменших. За навантаження в 10 МПа зношування дещо вище за зношування титану в парі з бронзою БрАЖ9-4. Зі збільшенням навантаження до 30 МПа зносостійкість титану в парі з бронзою БрАЖ9-4 збільшується.

Топографії поверхонь тертя сплаву VT-22 у парі з бронзою БрАЖ9-4 показують, що механізм зношування дещо проміжний між абразивним зношуванням, як при терті бронзи БрБ2 зі сплавом VT-22, та механохімічним зношуванням, як при терті бронзи БрОФ10-1 зі сплавом VT-22. При терті пари VT-22 – БрАЖ9-4 спостерігається досить високе зношування бронзи та відносно низьке зношування титанового сплаву. Причиною цього може бути вміст алюмінію, який під час тертя окиснюється та утворює корунд. Оскільки по-верхнева міцність сплаву VT-22 вище, то відбувається інтенсивне зношування матеріалу бронзи. Підбір матеріалу деталі літального апарата для контакту з титановим сплавом VT-22 необхідно робити в комплексі, розглядаючи зносостійкість пари тертя. Лише два матеріали найбільш прийнятні для цього використання: бронза БрОФ10-1 на основі олова та бронза БрАЖ9-4 на основі заліза й алюмінію залежно від необхідної твердості контрдеталі. Титановий сплав у парі з цими матеріалами залишається найбільш зносостійким. Але якщо розглядати сумарне зношування пари тертя, то найбільш сприятливим матеріалом є бронза БрАЖ9-4. Для контакту можна також використовувати матеріал МЛ5, але зношування магнієвого сплаву найвище серед випробуваних матеріалів, що погано відобразиться на парі тертя в цілому.

Висновки

1. Визначено характер залежностей зношування титанового сплаву VT-22 від питомого навантаження під час тертя в парі з різними кольоровими сплавами. Лінійний характер кривих зношування титанового сплаву вказує на те, що зміна механізму зношування відбувається поступово.

2. Підтверджено, що найбільш сприятливим матеріалом для контакту з титановим сплавом VT-22 є бронза БрАЖ9-4. Сумарне зношування цього сплаву найменше серед випробуваних матеріалів.

Література

1. Горынин И.В. Титан в машиностроении / И.В. Горынин, Б.Б. Чечулин. – М.: Машиностроение 1990. – 400 с.
2. Васильев О.І. Дослідження впливу природи контактуючих матеріалів на зносостійкість вакуумних іонно-плазмових покриттів в умовах фреттинг-корозії / О.І. Васильєв, В.В. Присяжнюк // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2006. – Вип. 45. – С. 119–126.
3. Духота А.И. Обеспечение работоспособности титановых деталей в условиях фреттинг-коррозии / А.И. Духота // Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: спец. 05.02.04. – К.: КИИГА, 1982. – 24 с.
4. Масленков С.Б. Стали для высоких температур / С.Б. Масленков, Е.А. Масленкова / справ. в 2-х кн. – Кн. 2. – М.: Металлургия, 1991. – С. 583–586.
5. Хімко А.М. Фретингостійкість сплаву ВТ-22 з авіаційними матеріалами / А.М. Хімко // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2006. – Вип. 46. – С. 84–90.
6. Физико-химические свойства окислов: справ / Г.В. Самсонов, А.Л. Борисова, Т.Г. Жидкова и др. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.
7. Афтаназів І.С. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням: навч. посіб. для студ. машинобуд. спец. вищ. навч. закл / І.С. Афтаназів, А.П. Гаврин, П.О. Киричок // І.С. Афтаназів, А.П. Гаврин, П.О. Киричок. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 516 с.
8. Солонина О.П. Жаропрочные титановые сплавы / О.П. Солонина, С.Г. Глазунов. – М.: Металлургия, 1979. – 448 с.

Стаття надійшла до редакції 21.10.09.

А.Н. Химко, С.Н. Заднепровская, А.Е. Якобчук

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СПЛАВА ВТ-22 С ЦВЕТНЫМИ СПЛАВАМИ ПРИ РЕВЕРСИВНОМ ТРЕНИИ

Национальный авиационный университет

износостойкость, коэффициент трения, микротвердость, титановый сплав ВТ-22, топография поверхностей, удельная нагрузка, цветные сплавы

В статье представлены результаты испытаний неупрочненного титанового сплава ВТ-22 с авиационными цветными сплавами при реверсивном трении скольжения. Основной задачей работы являлся подбор оптимального сочетания материалов в зависимости от изменения условий нагружения. Исследование износостойкости сплава ВТ-22 проводили в парах с БрОФ-10-1, БрБ2, БрАЖ-9-4, ВТ-22, МЛ5, Д16Т, 7Х21ГАН5Ш и 95Х18Ш. Установлены зависимости изнашивания материалов при давлениях 10, 20 и 30 МПа. Линейный характер кривых изнашивания титанового сплава указывает на то, что изменение механизма изнашивания происходит постепенно. Представлены гистограммы износа цветных материалов и суммарный износ пары трения. Наиболее предпочтительным материалом для контакта с неупрочненным титановым сплавом ВТ-22 является бронза БрАЖ-9-4. Наименьший износ установлен среди испытанных материалов. Представлены установленные коэффициенты трения титанового сплава ВТ-22 в паре с авиационными конструкционными цветными сплавами. Результаты работы будут актуальны для машиностроительной промышленности, где применяется неупрочненный титановый сплав ВТ-22 в паре с цветными сплавами.

Andriy M. Khimko, Svitlana M. Zadneprovskaya, Alexander E. Yakobchuk

WEAR RESISTANCE OF ALLOY VT-22 WITH NON-FERROUS ALLOYS AT REVERSE FRICTION

National Aviation University

friction coefficient, microhardness, nonferrous materials, specific loading, surface topography, titanium alloy VT-22, wear resistance

The article presents the results of tests of non hardened titanium alloy VT-22 with aviation non-ferrous alloys in reverse sliding friction. The main objective of the work is the selection of the optimum combination of materials depending on changes in loading conditions. Study of alloy VT-22 wear resistance was carried out in pairs with БрОФ-10-1, БрБ2, БрАЖ-9-4, ВТ-22, МЛ5, Д16Т, 7Х21ГАН5Ш and 95Х18Ш. The dependencies of the materials wear at pressures 10, 20 and 30 Mpa we determined. The linear nature of titanium alloy wear curves indicates that the change in the wear mechanism occurs gradually. The histograms of non-ferrous materials wear and the total wear of the friction pair are presented. It is established that the bronze БрАЖ-9-4 is the most preferable material for contact with non hardened titanium alloy VT-22, the least wear among the tested materials. The established coefficients of the titanium alloy VT-22 friction in pair with aviation structural non-ferrous alloys are presented. The results of research will be relevant for the engineering industry, where non hardened titanium alloy VT-22 in pair with non-ferrous alloys is applied.