

УДК 620.179.1(045)

РОЗВИТОК ДЕФОРМАЦІЙНОГО РЕЛЬЄФУ ПРИ ПРОГРАМНОМУ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Карускевич М. В., канд. техн. наук, Маслак Т. П., Капустинский А. А., Сейдаметова Г. С.

Національний авіаційний університет
mkaruskevich@hotmail.com

Випробування зразків алюмінієвого сплаву Д16АТ показали, що деформаційний рельєф, який формується на поверхні плакованого шару в процесі циклічного навантаження є чутливим до зміни режиму циклічного навантаження. Чутливість деформаційного рельєфу до максимального напруження циклу навантаження відмічена як при переході на більш високий рівень напружень, так і при переході на менші циклічні напруження.

Ключові слова: авіаційні конструкції, втомна, алюмінієві сплави, деформаційний рельєф, екструзійно / інтрузійна структура, нагромадження пошкодження.

The fatigue tests of aluminum alloy D16AT have been shown that the deformation relief which is formed on the surface of clad layer under cyclic loading is sensitive to the cyclic loading regime changes. It has been noted there is the deformation relief sensitivity to the maximum cyclic loading under transition from less to high stress level as well as from high to less stress level.

Keywords: aircraft structures, fatigue, aluminium alloys, deformation relief, extrusion / intrusion structure, damage accumulation.

Вступ

Забезпечення економічної ефективності і безпеки експлуатації сучасних літаків ґрунтується на моніторингу технічного стану [1]. Одним із важливих показників технічного стану є рівень нагромадженого втомного пошкодження. На сьогодні запропоновано значну кількість методів неруйнівного контролю, які використовуються для визначення дефектів різного масштабного рівня. В експериментах, результати яких наведені в працях [2—4] та ін., показано, що індикатором нагромадженого втомного пошкодження є деформаційний рельєф, який формується на поверхні плакованих алюмінієвих сплавів при їх циклічному навантаженні. Такий рельєф являє собою систему екструзій, інтрузій, смуг ковзання, що відносить запропонований метод до тих, що ґрунтуються на деформаційних критеріях (рис. 1).

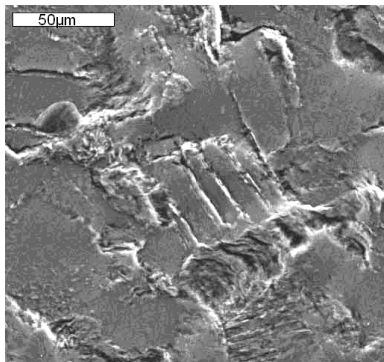


Рис. 1. Зображення деформаційного рельєфу, отримане за допомогою електронного скануючого мікроскопа

Інтенсивність деформаційного рельєфу залежить від кількості циклів навантаження, макси-

мального напруження циклу навантаження, асиметрії циклу [5; 6].

Відомо, що навантаження конструкції літака в польоті і при його русі по землі є нерегулярним. У зв'язку з цим, будь-який метод моніторингу втомного пошкодження повинен бути чутливим до зміни режиму циклічного навантаження.

Необхідність дослідження чутливості деформаційного рельєфу до змін режиму циклічного навантаження визначає актуальність роботи, основні результати якої наведено нижче.

Методика дослідження

Дослідження проведено на зразках алюмінієвого сплаву Д16АТ (рис. 2).

Розмір зразка — 150,0 × 10,0 × 1,0 мм. Для локалізації пошкодження і руйнування зразок має отвір діаметром 1,0 мм.

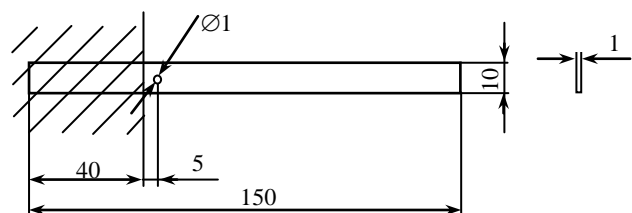


Рис. 2. Зразок для втомних випробувань в умовах консольного згину

Товщина плакованого шару становить 4,0 % від товщини зразка. Розмір зерен технічного алюмінію, які формують плакований шар знаходиться в діапазоні від 0,01 до 0,05 мм.

Циклічне навантаження проводилось консольним згином на машині, спеціально розробленій для випробувань компактних зразків.

Режими випробувань визначались з урахуванням реальних експлуатаційних умов наванта-

ження авіаційних конструкцій, зокрема, обшивки фюзеляжу. Деформаційний рельєф досліджувався поблизу отвору (рис. 3). Розмір ділянки становив $0,3 \times 0,3$ мм.

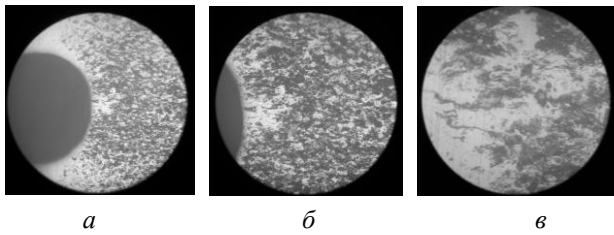


Рис. 3. Цифрові зображення деформаційного рельєфу поблизу концентратора напруження у вигляді отвору за різного збільшення оптичного мікроскопа:
а — $\times 75$ разів; б — $\times 150$ разів, в — $\times 500$ разів

Аналіз деформаційного рельєфу виконувався комп'ютеризованим оптичним методом. Кількісним показником нагромадженого втомного пошкодження вважався запропонований раніше [7] параметр пошкодження D . Параметр пошкодження D визначається як відношення площі поверхні з ознаками деформаційного рельєфу до загальної площі поверхні в полі зору.

Первинною інформацією для визначення параметра пошкодження були цифрові фотографії деформаційного рельєфу, отримані за допомогою металографічного оптичного мікроскопа ММР-4 зі збільшенням $\times 200$. Для автоматизованого обчислення параметру пошкодження застосовувалось спеціально розроблене програмне забезпечення (рис. 4), яке дозволяє виділяти кластери деформаційного рельєфу та обчислити їх відносну площу.

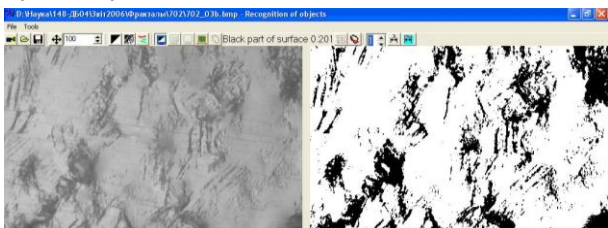


Рис. 4. Вікно програми для визначення параметра пошкодження деформаційного рельєфу

Отже, параметр пошкодження деформаційного рельєфу D є двовимірною характеристикою насиченості поверхні плакованого шару ознаками мікропластичної деформації, яка за певних режимів циклічного навантаження монотонно змінюється відповідно до процесу нагромадження пошкодження.

Результати експериментів

Випробування проводились при ступеневому навантаженні з переходом з меншого рівня до більшого і переходом від більшого рівня до меншого (рис. 5). Отримані дані про еволюцію пара-

метра пошкодження порівнювались з базовими даними про пошкоджуваність за регулярного навантаження. Рівень напружень при регулярному (базовому) навантаженні відповідав умовам навантаження на першому ступені програмного режиму.

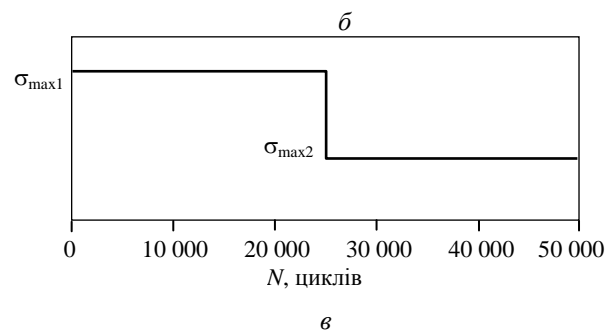
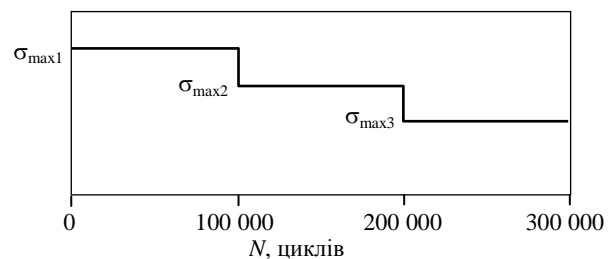
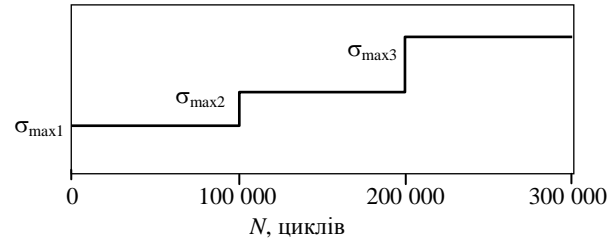


Рис. 5. Схеми програмного навантаження в умовах консольного циклічного згину:
а — схема навантаження зразків серії 1 випробувань;
б — схема навантаження зразків 2 та 4 серії випробувань;
в — схема навантаження зразків серії 3 випробувань

Спостереження проводились на інкубаційній стадії втоми, тобто до появи тріщини довжиною 1,0 мм.

На рис. 5—9 показано еволюцію параметра пошкодження D за циклічного навантаження.

Проведено чотири серії випробувань.

У серії 1:

а) зразок 013 випробувався при постійному максимальному напруженні циклу навантаження $\sigma_{\max 1} = 70,0$ МПа;

б) зразок 007 на першій ступені навантаження випробувався при $\sigma_{\max 1} = 70,0$ МПа; після 100 000 циклів відбувався перехід на режим $\sigma_{\max 2} = 120,0$ МПа, після 200 000 циклів — перехід на $\sigma_{\max 3} = 200,0$ МПа;

в) зразок 006 на першому ступені навантаження випробувався при $\sigma_{\max 1} = 80,0$ МПа; після 100 000 циклів відбувся перехід на режим $\sigma_{\max 2} = 120,0$ МПа; після 200 000 циклів відбувся перехід на $\sigma_{\max 3} = 200,0$ МПа.

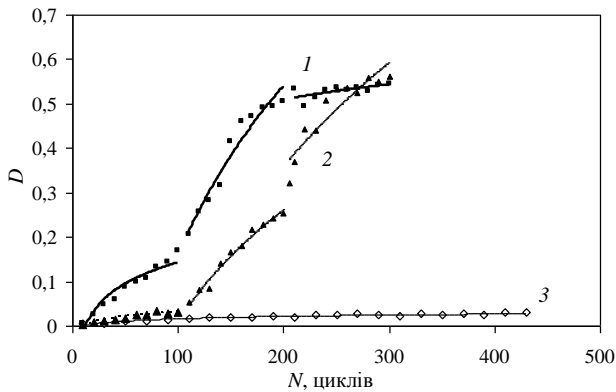


Рис. 6. Еволюція параметрів деформаційного рельєфу при програмному навантаженні за схемою «низьке-високе»:
1 — зразок 006; 2 — зразок 007; 3 — зразок 013

У серії 2:

а) зразок 005 випробувався при постійному максимальному напруженні циклу навантаження $\sigma_{\max 1} = 200,0$ МПа; після 100 000 циклів відбувався перехід на режим $\sigma_{\max 2} = 120,0$ МПа, після 200 000 циклів — перехід на $\sigma_{\max 3} = 80,0$ МПа;

б) зразок 004 на першій ступені навантаження випробувався при $\sigma_{\max 1} = 200,0$ МПа; після 100 000 циклів відбувався перехід на режим $\sigma_{\max 2} = 150,0$ МПа, після 200 000 циклів — перехід на $\sigma_{\max 3} = 100,0$ МПа.

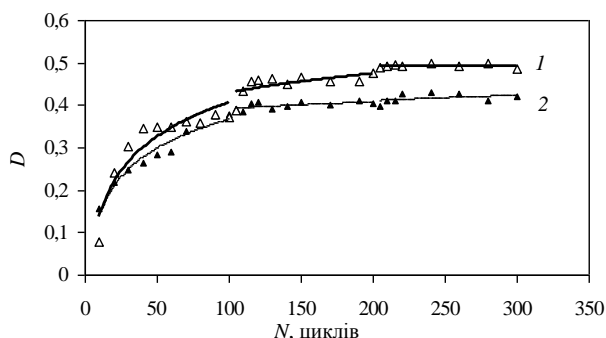


Рис. 7. Еволюція параметрів деформаційного рельєфу при програмному навантаженні за схемою «високе-низьке»:
1 — зразок 004; 2 — зразок 005

У серії 3:

а) зразок 014 випробувався при постійному максимальному напруженні циклу навантаження $\sigma_{\max 1} = 200,0$ МПа;

б) зразок 012 на першому ступені навантаження випробувався при $\sigma_{\max 1} = 200,0$ МПа; після 25 000 циклів відбувався перехід на режим $\sigma_{\max 2} = 80,0$ МПа;

в) зразок 011 на першому ступені навантаження випробувався при $\sigma_{\max 1} = 200,0$ МПа; після 25 000 циклів відбувався перехід на режим $\sigma_{\max 2} = 70,0$ МПа.

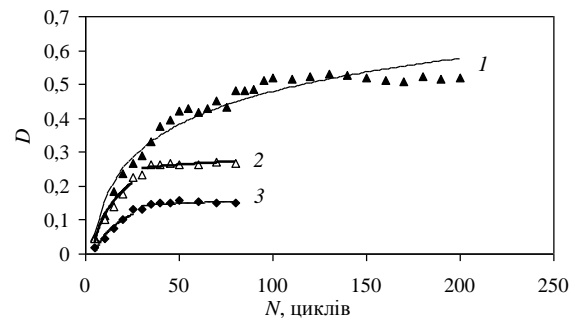


Рис. 8. Еволюція параметрів деформаційного рельєфу при програмному навантаженні за схемою «високе-низьке»:
1 — зразок 014; 2 — зразок 012; 3 — зразок 011

У серії 4:

а) зразок 015 випробувався при постійному максимальному напруженні циклу навантаження $\sigma_{\max 1} = 200,0$ МПа;

б) зразок 016 на першій ступені навантаження випробувався при $\sigma_{\max 1} = 200,0$ МПа; після 35 000 циклів відбувався перехід на режим $\sigma_{\max 2} = 135,0$ МПа; після 100 000 циклів відбувався перехід на режим $\sigma_{\max 3} = 70,0$ МПа.

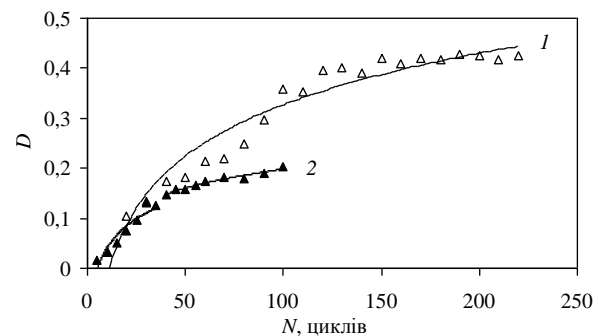


Рис. 9. Еволюція параметрів деформаційного рельєфу при програмному навантаженні за схемою «високе-низьке»:
1 — зразок 015; 2 — зразок 016

Як видно з наведених графіків відповідні залежності мають чітко виражені ознаки зміни швидкості пошкоджуваності при напрацюваннях, що відповідають зміні рівня напруження.

Кореляційний аналіз отриманих даних вказує на доцільність апроксимації залежностей параметра пошкодження D від кількості циклів N за регулярного навантаження і перших ступенях програмного навантаження логарифмічними функціями.

Апроксимація логарифмічними функціями була доцільною при всіх обраних режимах навантаження.

Підсумовування нагромадженого втомного пошкодження під час виконання спрощених інженерних розрахунків виконується найчастіше відповідно до лінійного правила Майнера, або його модифікацій [8].

Відомо, що одним з недоліків правила Майнера є те, що воно не враховує послідовність прикладених навантажень.

У зв'язку з цим, розглянемо яким чином послідовність навантажень впливає на еволюцію параметра D в описаному вище експерименті.

Зразки 006 і 005 випробувались за програмами, кожна з яких містила три ступеня навантаження по 100 тис циклів у кожному (зразок 006 поданий на рис. 6 (крива 1), зразок 005 поданий на рис. 7 (крива 2). Напруження в ступенях становили 80,0; 120,0 і 200,0 МПа.

Зразок 006 випробувався за програмою «низьке-високе», тобто з послідовним збільшенням від ступеня до ступеня максимального напруження циклу навантаження від 80, 0 до 200,0 МПа.

Зразок 005 випробувався з послідовним зменшенням максимального напруження циклу навантаження від 200,0 до 80,0 МПа.

Відповідно до правила Майнера, обидва зразки повинні були мати однакове накопичене пошкодження. Водночас відомо, що послідовність напружень «низьке-високе» має більш пошкоджувальну дію, ніж послідовність «високе-низьке».

Фактом, що потребує пояснення і додаткових експериментів, є встановлена тенденція до прискорення темпу зростання насиченості рельєфу не тільки при зростанні напруження, що є цілком логічним, але і протягом декількох тисяч циклів навантаження одразу після переходу на нижчий ступінь навантаження.

Результати наведеного експерименту відображають фізично обґрунтований ефект циклічного зміцнення, який не враховується правилом лінійного підсумовування втомного пошкодження. Так, для зразка 006, який випробувався за більш пошкоджувальною програмою «низьке-високе» значення параметру пошкодження D , після 300 тис. циклів становить 0,62, а для зразка 005, який випробувався при послідовності напружень «високе-низьке», яка, як правило, призводить до затримки процесу пошкодження, параметр пошкодження D становить 0,51.

Висновки

Проведені експерименти вказують на чутливість деформаційного рельєфу до зміни режиму навантаження, що створює передумови для використання параметрів деформаційного рельєфу як показників нагромадженого втомного пошко-

дження як при регулярному, так і не регулярному циклічному навантаженні.

Враховуючи стохастичну природу втоми металів, кількісне визначення впливу послідовності прикладених напружень різного рівня на процес нагромадження пошкоджень потребує проведення додаткового дослідження в статистичному аспекті. Крім того, подальші дослідження повинні містити випробування не тільки при спрощених ступеневих програмних режимах, але і при квазівипадкових режимах, які моделюють експлуатаційні спектри навантаження авіаційних конструкцій.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Lloyd P. A. Structural health monitoring systems-benefits and airworthiness issues / P. A. Lloyd // The Aeronautical journal. — 2008. — № 5. — P. 285—289.*
2. *Оценка накопленного усталостного повреждения по насыщенности и фрактальной размерности деформационного рельефа / М. В. Карускевич, Е. Ю. Корчук, Т. П. Маслак [та ін.] // Проблемы прочности. — 2008. — № 6 (396). — С. 128—135.*
3. *Карускевич М. В. Зразок-свідок втомного пошкодження авіаційних конструкцій / М. В. Карускевич, О. Ю. Корчук, Д. М. Костенюк, Є. В. Каран // Вісник інженерної академії України. — 2009. — № 3-4. — С. 219—224.*
4. *Karuskevich M. Extrusion / intrusion structures as quantitative indicators of accumulated fatigue damage / M. Karuskevich, O. Karuskevich, T. Maslak, S. Schepak // XV International Colloguium Mechanical fatigue of metals XV-ICMFM, 13—15 Sept., 2010: abstract — Opole, Poland, 2010. — P. 27.*
5. *Маслак Т. П. Регресійні моделі еволюції параметрів деформаційного рельєфу під час циклічного навантаження / Т. П. Маслак // Вісник НАУ. — 2008. — № 1 (34). — С. 89—92.*
6. *Карускевич М. В. Оцінка довговічності плакованих алюмінієвих сплавів при асиметричному циклічному навантаженні / М. В. Карускевич, А. Д. Погребняк, Т. П. Маслак, С. В. Щепак // Вісник НАУ. — 2009. — № 2 (39). — С. 52—56.*
7. *Деклараційний патент на корисну модель № 3470 «Спосіб визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за станом деформаційного рельєфу поверхні плакуючого шару» / С. Р. Ігнатович, М. В. Карускевич, О. М. Карускевич — 15.11.2004, Бюл. № 11.*
8. *Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. — М. : Машиностроение. — 1984. — 312 с.*

Стаття надійшла до редакції 14.12.2010.

УДК 621.891

УСТАНОВКА ТА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ

Кіндрачук М. В., д-р техн. наук, проф., Кульгавий Е. А., Данілов А. П., Хлевна Ю. Л.

Національний авіаційний університет

kindrachuk@ukr.net

Розглянуто методику визначення характеристик зношування у вигляді статистичних моделей. Застосування статистичного аналізу пов'язано із внутрішньою структурою процесу зношування, наведено приклад побудови характеристики у вигляді полінома другого ступеня. Подано установку випробування, її характеристики та схеми випробувань.

Ключові слова: математична модель, установка випробування, планування експерименту.

The method of definition of characteristics of deterioration in the form of statistical models is considered. Application of the statistical analysis is connected with internal structure of process of deterioration, the example of constructions of the characteristic in the form of a polynomial of the second degree is resulted. The following test setup, its characteristics, and circuit testing.

Keywords: mathematical model, installation testing, designed experiment.

Вступ

На сьогодні сформувався та набув розвитку новий підхід до оцінки значення матеріалу, що працює в умовах тертя в забезпеченні зносостійкості. Він передбачає провідну роль поверхні та її властивостей (а не об'ємних властивостей, як це було загально прийнято) у забезпеченні триботехнічних та міцнісних властивостей виробів [1].

Важливу роль, при цьому, відіграють самоутвірні трибологічні структури. Для їх вивчення необхідно мати установку та схеми випробування, що будуть забезпечувати якнайкращі умови створення трибоstruktur.

Постановка задачі

Під час дослідження триботехнічних пар виникають проблеми, які пов'язані з нерівноважністю та динамікою станів у трибологічному контакті, а також складністю в реалізації схем та умов випробування, що будуть описувати реальні умови роботи вузлів тертя. Це визначається не тільки здатністю інструмента, але і внутрішнім механізмом трибологічних процесів.

Мета роботи

1. Методика організації проведення експериментів, з використанням установки тертя, яка дає змогу отримати оптимальні умови для появи триботехнічних структур з подальшим їх вивченням.

2. Аналіз установки схем випробування з різним коефіцієнтом перекриття.

3. Метод визначення параметрів зношування, аналіз отриманих даних.

Аналіз досліджень

Методи дослідження як в трибології, так і в інших науках умовно можна розділити на: теоретичні, теоретико-експериментальні і експериментальні [2].

Теоретичний метод побудований на узагальненні накопиченого досвіду або результатів експериментальних досліджень. Цей метод ґрунтується на математичному плануванні експериментів, регресійному і дисперсійному аналізі.

Теоретико-експериментальний метод припускає створення або розвиток теорії з подальшою перевіркою експериментом, уточненням і визначенням необхідних параметрів.

Експериментальний — припускає встановлення зв'язку між функціями і аргументами. Другий і третій перелічені методи досліджень тісно зв'язані між собою і часто виступають єдиним цілим. У будь-якому випадку, побудова теорії потребує експериментального підтвердження.

Проведення експериментів пов'язане з чималими фінансовими витратами і часто потребує тривалого часу. Для зменшення вищезазначених витрат, необхідно використовувати математичний апарат, без втрати якості та достовірності результатів.

Трибологічні процеси — тертя, знос, відмови відбуваються в трибологічних системах, коли в контакті діє навантаження і відбувається відносний рух твердих тіл. Якщо навантаження відсутнє або рух не відбувається, то й не відбуваються триботехнічні процеси, тобто триботехнічний процес обов'язково знаходиться, в якійсь точці двовимірного простору швидкостей і навантажень. Ураховуючи випадковість процесу зношування, що перебуває під впливом цілого комплексу змінних факторів, у цій статті обмежимося залежністю між навантаженням P , швидкістю V та зносом i .

Результати досліджень

Процес зношування в часі складається з двох нерівних етапів — *припрацювання* та *стаціонарного стану*.

На етапі припрацювання формуються трибологічні структури, потім процес флюктує у стаціонарному режимі з постійним середнім значенням і дисперсією. Надмірне збільшення трибоструктури обмежений ентропією, а нижній рівень — вільною енергією. Формули для швидкості зношування $i(t) = dI(t)/dt$ та зносу $I(t)$, як функції часу t , мають вигляд

$$i(t) = (i_0 - \langle i \rangle) \exp\left(-\frac{t}{T}\right) + \langle i \rangle; \quad (1)$$

$$I(t) = (i_0 - \langle i \rangle) T \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right] + \langle i \rangle t, \quad (2)$$

де i_0 та $\langle i \rangle$ — початкове і середнє стаціонарне значення швидкості зношування; T — час релаксації припрацювання; $I(t)$ — знос.

Експоненти в правій частині формули (1) і (2) описують еволюційний процес припрацювання, при цьому тривалість припрацювання оцінює час релаксації T , а внесок припрацювання в знос —

$$\text{функціонал } I_0 = (i_0 - \langle i \rangle) T \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right].$$

На цьому етапі переважає прагнення вільної енергії до мінімуму, у контакті відбувається агрегація часток, які переносяться; внутрішні потоки речовини спрямовані на формування трибоструктури і збільшення її об'єму, а потік речовини із системи зменшується, поки не досягне стаціонарного рівня. У стаціонарному стані трибоструктура флюктує біля середнього значення, протягом однієї флюктуації частина речовини виходить із системи у вигляді продуктів зношування, а потім трибоструктура відновлюється.

Якщо трибоструктура відновлюється на часовому інтервалі τ , то знос $I(t)$ на цьому інтервалі можна розглядати як незалежну величину. Тоді, відповідно до центральної граничної теореми, при $t \gg \tau$ знос $I(t)$ має нормальний розподіл і його можна навести у вигляді

$$I(t) = \langle i \rangle t \pm \eta \sigma \tau (t/\tau)^{\frac{1}{2}}; \quad (3)$$

$$\langle i \rangle = I(t)/t \pm \eta \sigma \tau (t/\tau)^{-\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

де $\langle i \rangle$ — середнє значення стаціонарного процесу; σ — середньоквадратичне відхилення; η — гауссівська величина з одиничною дисперсією.

Згідно з виразами (3) і (4) дисперсія зношування збільшується в часі пропорційно t/τ ; а дисперсія оцінки середнього $\langle i \rangle$ зменшується як $(t/\tau)^{-1}$. Оцінка $\langle i \rangle$ стає точнішою зі збільшенням часу дослідження, а оцінка на часових інтервалах менших τ не має сенсу, внаслідок її невизначеності. Інтервал кореляції τ у різних трибосистемах може досягати декількох десятків і навіть сотень годин. Це означає, що тривалість досліджень під

час оцінки параметрів інтенсивності зношування визначається не тільки дозволяючою здатністю інструмента, але і внутрішньою структурою самого процесу. Оптимальна тривалість дослідження повинна знаходитися в діапазоні від трьох до шести інтервалів τ .

Для кожної антифрикційної системи на просторі швидкостей і навантажень існує область, у кожній точці якої визначено стійкий стаціонарний стан. Ця область обмежена аномальними станами, у яких значимою стає ймовірність відмови.

В області стаціонарних станів швидкість зношування має властивість однорідності, розподілена за нормальним законом і не залежить від часу. Тому цей процес можна представити статистичними моделями регресійного аналізу у вигляді полінома другого ступеня [3].

Моделі регресійного аналізу не включають тимчасових співвідношень, тому їх можна використовувати як характеристики стаціонарних однорідних процесів.

Проведення багатофакторних експериментів передбачає такі етапи робіт:

- попереднє вивчення об'єкта досліджень;
- вибір факторів і плану експериментів;
- кодування факторів;
- розробка матриці планування експериментів;
- проведення експериментів;
- аналіз та обробка отриманих результатів;
- визначення коефіцієнтів регресії;
- оцінка значущих коефіцієнтів регресії;
- побудова поліномної моделі та перевірка її

на адекватність.

Область варіювання визначається шляхом побудови спеціального експерименту, за принципом імітації роботи вузла тертя. При цьому варіюються рівні кожного з факторів до значень, що порушують однорідність процесу. В кожній точці ставиться не менше п'яти дослідів. Отримані результати є базою при порівняльних випробуваннях нових матеріалів. Отже, отримання максимуму інформації при найменших витратах — основна мета планування експерименту.

Знаходження функцій, що задають зв'язок між факторами P, V та параметрами зношування i , область однорідності процесів зручно описувати виразом у вигляді полінома.

Факторний план одночасно варіює всі фактори таким чином, що ефект кожного фактора оцінюється за всією сукупністю дослідів.

Оскільки необхідно оцінити два фактори, виникає задача проведення двофакторного експерименту [4].

Модель процесу двофакторного експерименту другого порядку має вигляд:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_1 x_1^2 + b_2 x_2^2,$$

де y — досліджуваний фактор; x_1 і x_2 — варійовані фактори; $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12}$ — емпіричні коефіцієнти, які потребують визначення за результатами багатфакторного експерименту.

Для того, щоб оцінити всі коефіцієнти квадратичної моделі, треба мати плани, в яких кожен фактор варіюється не менш ніж на трьох рівнях. Існує велике різноманіття планів двофакторних експериментів другого порядку. Вони за рівнем відображення реальності процесів, що описуються, майже рівноцінні, але відрізняються обсягом експериментальних робіт.

Розглянемо як альтернативу три плани, що найбільш часто трапляються:

1) двофакторний ортогональний центральний композиційний план (ОЦКП) другого порядку, реалізація якого передбачає:

- кількість варіантів дослідів — 9;
- три рівня експериментів (+1, 0, -1);

2) центральний некомпозиційний план другого порядку, для реалізації якого необхідно:

- провести 10 варіантів експерименту;
- забезпечити параметри x_2 на рівнях 0,866 і -0,866;

3) центральний композиційний рототабельний план (ЦКРП) другого порядку для двох факторів, який широко використовується в інженерній практиці. Цей план реалізується:

- проведенням 10 дослідів;
- забезпеченням параметрів регульованого фактора в найвищих точках із значеннями x_1 — (+0,5) (-0,5); та x_2 — (+0,87) (-0,87).

Порівняно з іншими планами, критерій оптимальності мають композиційні рототабельні плани другого порядку (рис. 1).

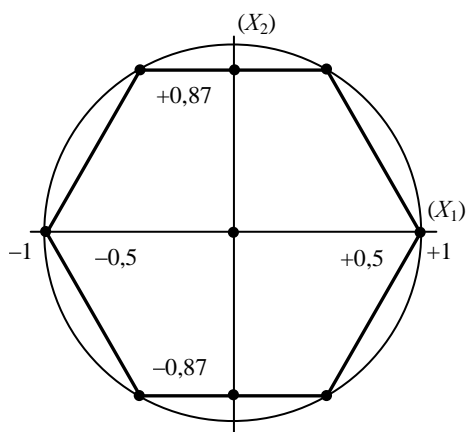


Рис. 1. Центральний рототабельний план другого порядку

ЦКРП другого порядку для двох факторів подано в таблиці, де фактор X_1 варіюється на п'ятьох рівнях, а фактор X_2 — на трьох.

Матриця центрального рототабельного плану другого порядку для двох факторів

Номер досліду	X_1	X_2	X_1^2	X_2^2	X_1X_2
1	-1	0	1	0	0
2	1	0	1	0	0
3	0,5	0,87	0,25	0,75	0,43
4	0,5	-0,87	0,25	0,75	-0,43
5	-0,5	0,87	0,25	0,75	-0,43
6	-0,5	-0,87	0,25	0,75	0,43
7—10	0	0	0	0	0

Для забезпечення експериментальної частини використовується установка тертя, що зображена на рис. 2.

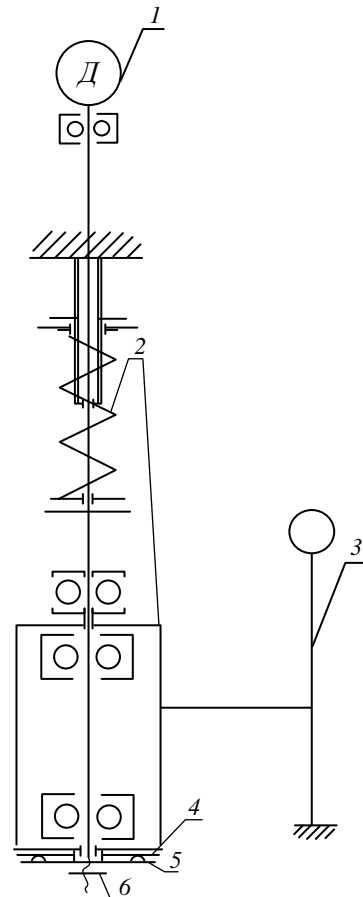


Рис. 2. Принципова схема установки тертя:

- 1 — двигун; 2 — механізм навантаження;
- 3 — тензосистема; 4 — зразок (нерухомий);
- 5 — контр зразок (рухомий); 6 — контрвайка

Машина тертя призначена для випробувань конструкційних матеріалів на тертя та зношування і визначення їх триботехнічних характеристик.

Ця установка складається з приводу 1 з регулюванням швидкості обертання від 1 м/с до

37 м/с; механізму навантаження 2 з діапазоном навантаження 1 – 40 МПа, що навантажує зразок 4 при контактному терті з рухомим контр зразком 5. Контрзразок фіксується на валу приводу контргайкою 6. Сила тертя визначається за допомогою тензосистеми — 3.

Конструкцією передбачено випробування кільцеподібних зразків з внутрішнім діаметром 20 мм, за наступними схемами: «кільце—сектор» (рис. 3), «кільце—кільце» (рис. 4) та «кільце—сфера» (рис. 5).

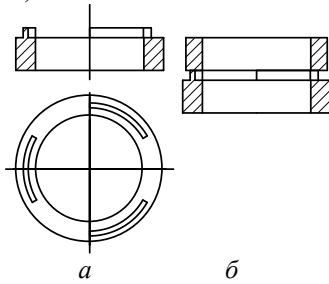


Рис. 3. Випробування пари тертя «кільце—сектор»: а — рухомий зразок—сектор; б — схема тертя

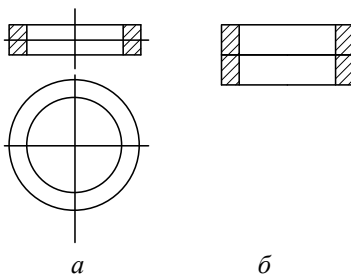


Рис. 4. Випробування пари тертя «кільце—кільце»: а — рухомий зразок—кільце; б — схема тертя

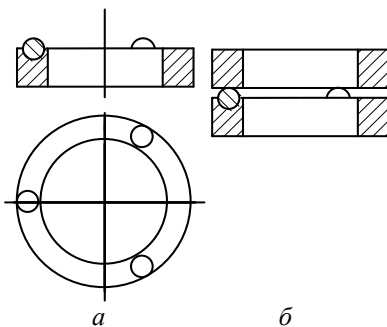


Рис. 5. Випробування пари тертя «кільце—сфера»: а — рухомий зразок—сфера; б — схема тертя

При випробуванні зразків «кільце—кільце» коефіцієнт перекриття якого становить ($\rho = 1$), за рахунок чого складаються умови, коли зовнішнє середовище не потрапляє в область фактичного контакту. Тобто доступ змащувального матеріалу в цьому випадку буде мінімальним. При такому виді працездатність пари тертя визначається триботехнічними властивостями матеріалів.

Пари тертя «кільце—сектор» та «кільце—сфера» мають коефіцієнт перекриття менший

одиниці ($\rho < 1$), що збільшує підведення мастильного матеріалу. Активізована поверхня тертям більше часу взаємодіє з середовищем мастила. За рахунок оптимальнодостатнього підведення мастила створюються умови для формування трибологічних структур, які впливають на процеси зношування.

Пара тертя «кільце—сектор» та «кільце—кільце» забезпечує однорідність умов по площі контакту та постійність номінального навантаження в процесі експерименту.

При випробуванні пари тертя «кільце—сфера» коефіцієнт перекриття значно менший одиниці ($\rho \ll 1$). Це забезпечує найкраще змащування поверхонь тертя, та як наслідок створює оптимальні умови для утворення трибоструктур на поверхнях контакту. Така схема випробування не дає змоги встановити нормоване питоме навантаження, оскільки при збільшенні зносу, зростає коефіцієнт перекриття, тому питоме навантаження усереднене.

Однак збільшення площі контакту дає змогу здійснювати вимірювання лінійного зносу з дуже високою точністю, за допомогою геометричного розрахунку (рис. 6).

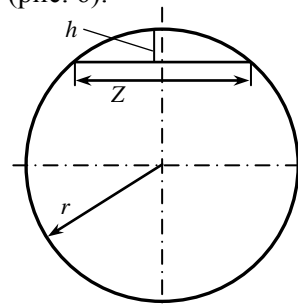


Рис. 6. Схематичне зображення контртіла «сфери»

Лінійний знос розраховується за формулою

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{Z^2}{4}}$$

де h — висота дуги (лінійний знос); r — радіус сфери; Z — хорда (діаметр плями зносу).

Отже, для визначення лінійного зносу необхідно за допомогою оптичного мікроскопа проводити замірювання діаметра плями. Це дає можливість значною мірою зменшити час проведення експерименту та збільшити точність вимірювання.

Висновки

Проведення досліджень новітніх матеріалів трибологічного призначення обумовлене: необхідністю чутливого обладнання; наявністю установок, які дають можливість проводити випробування за необхідних умов та параметрів швидкості та навантаження, а також мінімізувати три-

валість досліджу та фінансові затрати на його проведення.

Тривалість дослідження під час оцінки характеристик зношування визначається дозволяючою здатністю інструменту, а також внутрішньою структурою процесу.

Дослідження повинно бути в діапазоні від трьох до шести часових інтервалів відновлення трибоструктур, або значення зносу — не менше трьох мінімальних поділок інструменту, які визначаються безпосередньо в процесі експерименту. Ефективним шляхом зменшення часових витрат на експеримент є застосування методів математичної статистики і планування експерименту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Прусаков Б. А. Проблемы материалов в XXI веке (обзор) / Б. А. Прусаков // *Металловедение и термическая обработка металлов*. — 2001. — № 1. — С. 3—5.
2. Суслов А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. — М.: Машиностроение, 2002. — 684 с.
3. Налимов В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. — М.: Наука, 1971. — 436 с.
4. Кульгавый Э. А. Триботехнические характеристики и их применение. Проблемы трибологии / Э. А. Кульгавый. — 2003. — № 3. — С. 51—61.

Стаття надійшла до редакції 17.12.2010.

УДК: 621.88.088 (045)

ЗНОСОСТІЙКІ ТА ЖАРОСТІЙКІ СПЛАВИ НА ОСНОВІ КОБАЛЬТУ

Кіндрачук М. В., д-р техн. наук, проф., *Тісов О. В.*

Національний авіаційний університет

tissova@ukr.net

Досліджено триботехнічні характеристики композиційних жароміцних сплавів на основі кобальту. Проаналізовано вплив їх структури на зносостійкість. Визначено перспективний сплав, що може використовуватись під час ремонту та відновлення робочих лопаток турбін ГТД.

Ключові слова: кобальт, карбід титану, порошковий сплав, жароміцність, зносостійкість.

Current paper investigates tribotechnical properties of high temperature composite cobalt-based alloys. The influence of internal structure on their wear resistance was considered. Article points on the possibility to use them as materials at GTE turbine blades manufacturing and restoration procedures.

Keywords: cobalt, titanium carbide, powder alloy, heat resistance, wear resistance.

Стан проблеми. На сьогодні в умовах постійного зростання вартості паливно-мастильних матеріалів, все більш важливим стає питання розробки більш ефективних енергетичних установок. Для підвищення економічності авіаційних двигунів необхідною умовою, крім застосування новітніх конструкторських рішень, є підвищення температури згоряння палива і, як наслідок, підвищення температури газу на вході в турбіну. Це призводить до підвищення екстремальності умов роботи робочих лопаток турбіни, зокрема — підвищується температура, швидкість зміни температур (термоудар), вібраційне навантаження, зростає зношування. Отже, потрібні нові матеріали, які б задовольняли підвищені вимоги.

У той час, як промислові лопаткові сплави на основі нікелю (наприклад, ЖС-32 тощо) володіють достатньою об'ємною міцністю, поверхнева міцність їх недостатня. За умов контактної силового і термічного навантаження [1] в поверх-

невому шарі цих матеріалів відбувається збіднення легуючими елементами в результаті їх окиснення, відбувається процес руйнування робочих поверхонь і вихід лопаток з ладу, а отже, — і всього двигуна, виникає необхідність ремонту.

Тому, при загальній тенденції до зростання міжремонтних і загальнотехнічних ресурсів ставиться завдання подальшого підвищення межі допустимих навантажень і температур експлуатації лопаток, поліпшення їх триботехнічних характеристик.

Аналіз останніх досліджень. Значних результатів у вирішенні цієї проблеми вдалось досягти завдяки впровадженню у виробництво сплаву ХТН-61 на основі кобальту [2]. Це дало змогу підвищити ресурс двигуна Д18-Т до 12000 год при використанні сплаву під час виготовлення лопаток і до 60 000 год при їх ремонті [3]. Проте його жаростійкість невисока. Це означає, що він володіє запасом зносостійкості, котрий можна

реалізувати шляхом підвищення стійкості до окиснення. Таким вимогам відповідає новий сплав ХТН-62[4].

Як відомо, одним з найважливіших факторів, що визначають опір матеріалів зношуванню, є їх структура, а також властивості, взаємне розташування, кількісне співвідношення і характер взаємодії окремих складових структури [5; 6]. Велике значення мають процеси, що протікають на поверхнях тертя матеріалів. Як приклад оберемо один з відомих способів підвищення трибологічних характеристик сплавів через реалізацію принципу Шарпі–Бочвара, що вказує на необхідність одержання гетерогенної за розподілом і механічними характеристиками структури, що

складається з м'якої пластичної основи з розташованими в ній твердими включеннями. Для роботи при високих температурах матриця, як і наповнювач, повинна додатково мати високу жаростійкість. У цій роботі пропонується використовувати як матеріал для поверхневого зміцнення робочих поверхонь бандажних полиць ГТД порошкового сплаву з використанням зв'язків легovanого кобальту і карбиду титану як наповнювача.

Завданням дослідження — знайти такий матеріал, котрий за підвищеної робочої температури мав би вищі значення зносостійкості, ніж базовий сплав ХТН-62.

Склад композиційних порошкових і ливарних сплавів наведено в таблиці.

Склад композиційних сплавів

№ з/п	Co, %	TiC, %, об.	NbC, %, об.	Твердість, HRC	Пористість, %	Тип сплаву
1*	80	—	20	42	0	Ливарний
2	70	30	—	46	0	Ливарний
3	70	30	—	45	25	Порошковий
4	50	50	—	57	28	Порошковий
5	50	50	—	63	3,1	Порошковий

Примітка: *— сплав ХТН-62. Кобальтова матриця сплавів 2—5 за складом відповідає матриці сплаву ХТН-62.

Порошкові сплави були виготовлені методом гарячого пресування за таких умов:

Температура пресування 1300—1400 °С

Тиск 3—5 кН

Час витримування 10—20 хв

Методика експерименту. З метою оцінки зносостійкості використовувалась установка МФК-1. Для забезпечення температурного режиму вона

додатково обладнана кільцевою електричною піччю, термопарою та міліамперметром.

Робоча пара (рис. 1) являє собою рухомий зразок з кільцевим виточенням, до якого за допомогою високотемпературного припою кріпиться втулка, що притискається до нерухомого зразка. Нерухомий зразок виконано аналогічним способом.

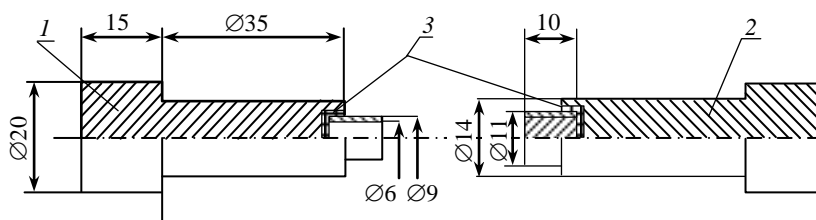


Рис. 1. Зразки для випробування на фретинг-корозію:

1 — рухомий; 2 — нерухомий; 3 — припій

Після випробування вимірювали середній лінійний знос зразків за допомогою оптиметра.

Установка дає змогу проводити дослідження фретинг-корозії в діапазоні частот 10—30 Гц за нормального тиску до 40 МПа і при амплітудах вібропереміщення 0,001—2,5 мм. Установлення величини переміщення рухомого зразка щодо нерухомого виконується за допомогою регульова-

ного ексцентрика. Точне підстроювання амплітуди ковзання в межах 0—0,015 мм регулюються спеціальним гвинтом. Випробування проводились в однойменних парах за таких умов віброциклічного навантаження:

питоме контактне навантаження — $P = 30$ МПа;
амплітуда відносного переміщення зразків — $A = 120$ мкм;

частота коливань — $\nu = 30$ Гц;
 база випробувань — $2 \cdot 10^6$ і $5 \cdot 10^6$ цикл;
 температура оточуючого середовища — 20°C
 і 650°C .

Для визначення величини зношування згідно з ДСТУ 23.211-80 за формулою

$$J = \frac{\sum_i^j h_i}{2AN}$$

визначали інтенсивність зношування: де h — лінійний знос; A — амплітуда; N — кількість циклів вібронавантаження.

Результати дослідження подано на рис. 2.

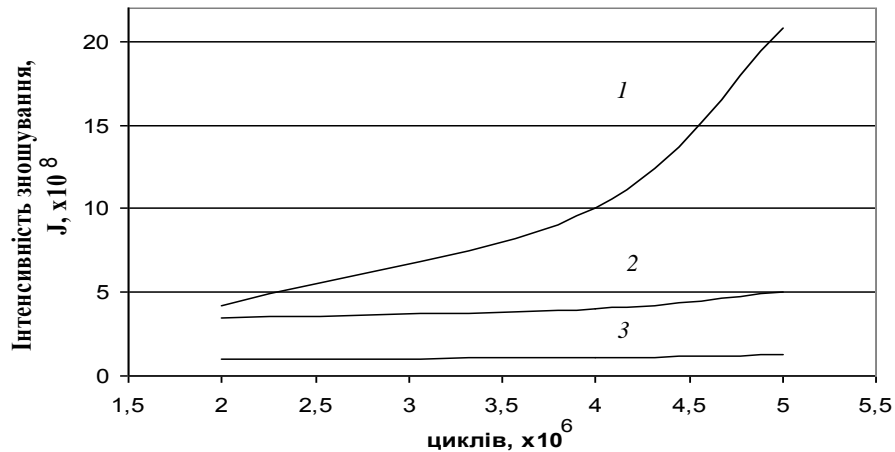


Рис. 2. Результати випробувань сплавів в умовах високотемпературного фретингу:
 1 — сплав 1; 2 — сплав 2; 3 — сплав 5

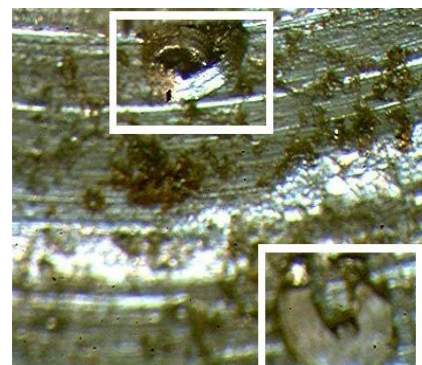
Під час випробувань не вдалось оцінити зносостійкість композиційний порошкових сплавів з високою пористістю (3 і 4). Уже на початковому етапі експерименту спостерігались коливання сили тертя в межах 15—20 % з частотою в 8—10 с. Через $2 \cdot 10^6$ циклів спостерігалось руйнування рухомих зразків на декілька частин, а також відокремлення нерухомого зразка від основи паралельно лінії припою. Це пояснюється недостатньою здатністю пористого матеріалу релаксувати напруження.

Внаслідок цього в приповерхневому шарі формується мережа тріщин, відбувається їх накопичення і переростання в магістральні.

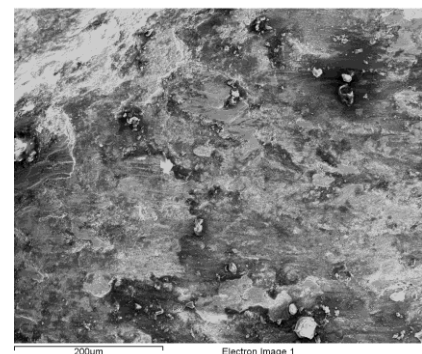
Базовий литий сплав 1 у процесі тертя за кімнатної температури схильний до утворення стружки (рис. 3). На його поверхні утворюється плівка оксидів, котра швидко руйнується. При цьому оголюються значні за площею ділянки металу, котрі у свою чергу швидко зношуються.

Аналогічно себе поводить і сплав 2, хоча вищий вміст карбіду титану в матриці забезпечує значно кращі триботехнічні характеристики. В обох випадках порушуються умови утворення і стійкості вторинних структур, що викликає руйнування поверхневих шарів основного матеріалу.

Сплав 5, за результатами випробувань, володіє найвищою зносостійкістю. Це пояснюється підвищеним вмістом карбідів і низькою пористістю, що запобігає поширенню втомних тріщин всередину матеріалу.



a, x50



b, x200

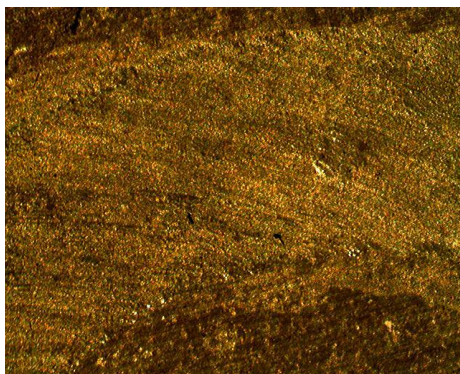
Рис. 3. Топографія поверхні тертя сплаву 1 після випробувань:

a — утворення стружки ($2 \cdot 10^6$ циклів, $t = 20^\circ\text{C}$);
b — інтенсивне руйнування оксидної плівки ($5 \cdot 10^6$ циклів $t = 650^\circ\text{C}$)

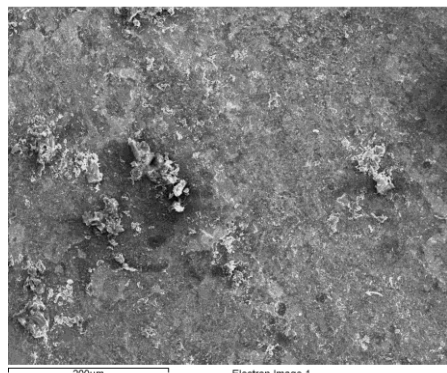
Як відомо [7], структурно неоднорідний матеріал зношується в парах тертя як одне ціле тому, що в процесі тертя відбувається перерозподіл

питомого навантаження: воно збільшується для більш зносостійких включень і зменшується для менш зносостійких. Тому частинки карбіду титану, розміщуючись на ділянках фактичного контакту, запобігають при цьому руйнуванню захисних оксидних плівок.

Крім того, ці плівки мають щільну структуру і бездефектну поверхню (рис. 4) і тому зношування має рівномірний характер.



а, х30



б, х200

Рис. 4. Топографія поверхні сплаву 5 після випробувань:

а — ($2 \cdot 10^6$ циклів, $t = 20$ °С); б — ($5 \cdot 10^6$ циклів $t = 650$ °С)

Це забезпечує матеріалу зниження інтенсивності дифузії кисню в глибину, і як наслідок — підвищується жаростійкість. Усі ці умови забезпечують стабілізацію процесу зношування і високу зносостійкість сплаву. Очевидно, що цей матеріал працює в такому діапазоні навантажень і швидкостей вібропереміщення, при котрому в зоні контакту утворюються структури, що найбільш ефективно розсіюють введену в трибосистему енергію.

Висновки

1. Високопористі сплави не витримують режиму навантаження і руйнуються внаслідок утомного руйнування вже на початковому етапі випробування.

2. Сплави з низьким вмістом карбідів формують крихку оксидну плівку, яка швидко руйну-

ється і оголює ділянки чистого металу, що призводить до підвищеного зношування. Крім того, вони схильні до утворення стружки за низьких температур.

3. Порошковий сплав з високим вмістом карбідів утворює щільну оксидну плівку, яка захищає поверхню від впливу окислювального середовища.

Карбідна фаза, розташовуючись на ділянках фактичного контакту, сприймає на себе більшу частину навантаження запобігаючи при цьому руйнуванню оксидної плівки.

З огляду на його високу зносостійкість як за підвищених, так і кімнатних температур, а також на рівномірність зношування, цей сплав є перспективним для подальших досліджень і може бути використаним як матеріал для напаявання при відновленні контактних поверхонь бандажних полиць робочих лопаток турбін ГТД, а також під час їх виготовлення.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Несущая* способность лопаток газовых турбин при нестационарном тепловом и силовом воздействии / [Г. И. Третьяченко, С. В. Кравчук, Р. И. Курят, А. П. Волощенко]. — К. : Наук. думка, 1975. — 295 с.
2. *Пат. ІА 8240А* України, с22с19/07. Сплав на основі кобальту / А. К. Шурин, Г. П. Дмитрієва, Т. С. Черепова, Н. В. Андрейченко [та ін.]. — № 93006979, опубл. 29.03.96. Бюл. № 1.
3. *Восстановление* работоспособности ГТД с применением новых технологий и материалов / [В. А. Леонтьев, С. Д. Зиличихис, Э. В. Кондратюк, В. Е. Замковой] // Вестник двигателестроения. — № 4. — 2006. — С. 99—103.
4. *Композиційні* сплави для зміцнення контактних поверхонь бандажних полиць газотурбінних двигунів / [О. І. Духота, М. В. Кіндрачук, О. В. Тісов, Т. С. Черепова] // Проблеми трибології. — № 4. — 2010. — С. 101—104.
5. *Поверхностная* прочность материалов при трении / под ред. Б. И. Костецкого. — К. : Техника, 1976. — 291 с.
6. *Костецкий Б. И.* Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении / Б. И. Костецкий] // Трение и износ. — 1985. — Т. 6, № 2. — С. 201—212.
7. *Присевок А.Ф.* Исследование механизма разрушения сплавов при их трении о закреплённые абразивные зёрна / А. Ф. Присевок, Г. М. Яковлев, В. И. Даукнис // Прогрессивная технология машиностроения. — Минск : Высшая школа, 1971. — С. 120—126.

Стаття надійшла до редакції 22.12.2010.