

УДК 629.735.03-585-233.3:620.178.16(045)

О.С. Тугарінов, канд. техн. наук, доц.
Я.Д. Шевченко, старш. викл.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС АВІАЦІЙНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

НАУ, кафедра збереження льотної придатності авіаційної техніки
E-mail: avscosm@nau.edu.ua

Розглянуто питання визначення зміни концентрації продуктів зносу в мастилі залежно від характеру зношення контактних поверхонь зубчастих коліс. Показано зміну концентрації заліза в мастилі при прогресуючому зносі.

The question of definition of change of concentration of products of deterioration in oil is considered depending on character of deterioration of contact surfaces of cogwheels. Change of concentration of iron in oil is shown at progressing deterioration.

Постановка проблеми

Аналіз відмов і несправностей авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) показує, що в деяких випадках працездатність двигуна лімітують зубчасті колеса редукторів і коробок приводів агрегатів.

Для видів ушкодження зубів встановлено таку класифікацію:

- руйнування під впливом згибних напружень (поломка зубів);
- стомлений знос з викришуванням робочих поверхонь зубів (піттинг);
- схоплювання (заїдання);
- механічне зношування;
- пластична деформація поверхового шару робочих поверхонь зубчастих коліс.

Майже всі ушкодження, за винятком першого, є різними видами зносу, що безпосередньо пов'язані з характером змащування.

Зубчасті колеса авіаційних двигунів виготовляються з високоміцних сплавів із використанням спеціальних хіміко-термічних методів обробки та працюють в умовах великих навантажень.

Незважаючи на високі технології виготовлення і точність складання, у реальних зубчастих колесах авіаційних конструкцій виникають деякі відхилення.

Окрім того, зміцнені робочі поверхні зубів важко притираються, що утруднює вирівнювання навантаження по довжині зуба [1].

Унаслідок цього відбувається нерівномірний знос поверхонь зубів.

Найбільш характерним для них є втомлений знос з утворенням дрібних раковин, виразок від викришування матеріалу (піттинг).

Так, за даними праці [2] до 70% зубчастих коліс авіаційних двигунів відбраковуються внаслідок з'явлення на зубах осередків утомленого зносу.

За твердженням Б.Д. Грозіна [3] в деяких несприятливих випадках унаслідок піттингу термін експлуатації зубчастих коліс може скоротитись у 20 – 30 разів.

У праці [4] наведено методи прогнозування зносу та оцінки довговічності вузлів тертя деталей, що піддаються стиранню, але ці методи не враховують піттинг.

Крім того, більшість випробувань, які досліджують піттинг, проводилися з зубчастими колесами невисокої твердості [5].

У зв'язку з цим були проведені дослідження процесу втомленого викришування (піттингу) азотованих зубчастих коліс з високою поверхневою твердістю.

Мета дослідження – оцінювання можливості прогнозування довговічності зубчастих коліс авіаційних ГТД, які піддаються в процесі експлуатації втомленому викришуванню (піттингу).

Випробувальний стенд

Випробування зубчастих коліс проводилися на стенді (рис. 1), в якому навантаження на їх контактну поверхню здійснювалося по замкненому силовому контуру поворотом шарнірно-закріпленого корпусу редуктора. Це давало можливість змінювати навантаження на зубчасті колеса, які досліджуються в широкому діапазоні без зупинки стенда.

Навантаження на працюючому стенді здійснювалось східчасто шляхом установки противагів на важіль рухомого редуктора.

Для змащування використовували масло МК-8, яке подавалося з бака 15 нагнітальною помпою 14, безпосередньо в зону контакту робочих поверхонь зубів 9, 10 у кількості 4 л/хв.

У лінії відкачки мастила перед помпою відкачки встановлено магнітний фільтр-сигналізатор стружки 16.

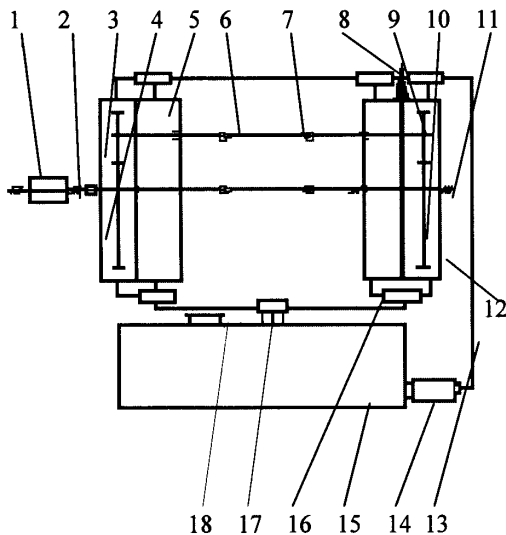


Рис. 1. Кінематична схема випробувального стенда: 1 – електродвигун; 2 – пружна муфта; 3, 4 – зубчасті колеса редуктора; 5 – корпус нерухомого редуктора; 6 – вали з'єднувальні; 7 – шарніри карданні; 8 – важіль навантаження; 9–10 – зубчасті колеса, які досліджуються; 11 – опора редуктора, що навантажується; 12 – корпус редуктора, що навантажується; 13 – лінія високого тиску; 14 – масляна помпа; 15 – масляний бак; 16 – фільтр-сигналізатор стружки; 17 – помпа відкачки мастила; 18 – лінія зливу

Випробування та їх результати

Прискореним випробуванням піддавалися зубчасті колеса з модулем 3, кількістю зубів 24/45, довжиною зуба 10 мм, кутom зачеплення 20°, які виготовлені зі сталі 12ХН4А-Ш і пройшли цементацію та загартування.

Товщина цементованого шару після шліфування дорівнює 0,6 – 0,9 мм, твердість цементованої поверхні $R_c \geq 58$, нецементованої – $R_c = 31-41$.

На початку випробування 30 хв проводили притирання зубчастих коліс при питомому тиску на поверхні контакту 8,9 МПа (90 кг/см²), після чого навантаження підвищувалося до 15,7 МПа (160 кг/см²). З цим навантаженням зубчасті колеса притирались 10 – 12 год до встановлення плям контакту, що охоплюють повністю робочі зони поверхонь, що контактують.

Притирання та випробування проводили з постійною швидкістю обертання 1600 об/хв. Для виключення впливу зупинок і запусків на знос зубчастих коліс зупинку і запуск стенда проводили без навантаження.

У процесі експерименту навантаження зубчастих коліс підбиралося так, щоб воно відповідало контактній напрузі $\sigma_k = 1040$ МПа, а температура мастила стабілізувалася на рівні 75°C. Методику виявлення виду зносу на основі візуального обстеження та металографічного аналізу розроблено й описано Б.І. Костецьким [6].

Як критерій початку руйнування брали прогресуючий пітінг (з'явлення пітінгу на трьох зубах).

При випробуваннях з періодичністю 3 год, що відповідало напрацюванню $4 \cdot 10^6$ циклів, відбирали проби мастила для визначення концентрації продуктів зношення у ньому шляхом спектрального аналізу за допомогою фотоспектрометра, який дозволяє проводити кількісний аналіз десяти хімічних елементів, що знаходяться в мастилі.

Як показали дослідження, найбільш інформативним свідком зношення зубчастих коліс, які випробувались, виявився залізо Fe.

Після відбору проб масла стенд зупинявся та проводився візуальний контроль стану робочої поверхні зубів, оцінка наявності й аналіз структури продуктів зносу на магнітному фільтрі-сигналізаторі.

На рис. 2 показано зростання концентрації заліза Fe до 0,7 г/т на ділянці напрацювання контактних поверхонь зубчастих коліс, зменшення концентрації заліза Fe до 0,4 г/т на ділянці стабілізації зносу під час основного навантаження і стрімке зростання концентрації заліза Fe з появою пітінгу.

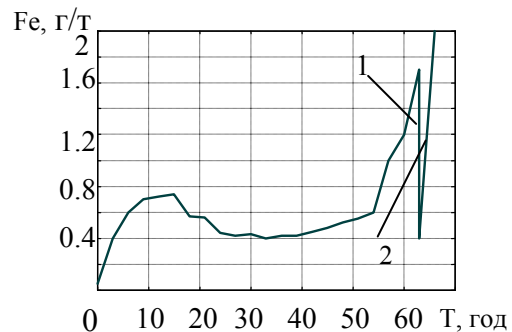


Рис. 2. Точка зміни концентрації заліза Fe в мастилі залежно від напрацювання зубчастих коліс під час випробувань:

1 – при заміні мастила; 2 – при появі пітінгу

Заміна мастила на цій ділянці не призводить до зменшення концентрації заліза Fe.

Під час огляду фільтра-сигналізатора до прогресуючого зносу продукти зносу мали пилоподібний характер.

З появою пітінгу на фільтрі-сигналізаторі затримувались частки металу, які аналізувались нами під мікроскопом.

У процесі попередніх досліджень було випробувано 9 пар зубчастих коліс. При цьому на кожному парі припадало у середньому по 20 проб мастила. Кожну пробу тричі аналізували на спектрометрі.

Як кінцевий результат брали середнє арифметичне значення з цих трьох аналізів.

При довірчому інтервалі, який дорівнює половині середньоквадратичної помилки, і при кількості зразків на одну точку кривої (рис. 2), що дорівнює 9 та коефіцієнті Стьюдента, довірна вірогідність становить 0,82 [7].

Висновки

1. Крива змінення концентрації заліза у мастилі (рис. 2) залежно від напрацювання зубчастих коліс має класичний вигляд з ділянками притирання, стабілізації та інтенсивного зносу.
2. Різке підвищення концентрації заліза Fe вказує на початок інтенсивного зносу робочих поверхонь зубчастих коліс.
3. Дослідженням під мікроскопом металевих часток, які накопичилися на стружкосигналізаторі доведено, що на деяких часточках одна сторона, а інколи і торець були відполіровані до блиску, інші сторони носили характер руйнування від утомленості з кристалічною поверхнею. Під час огляду зубчастих коліс після напрацювання $6 \cdot 10^6$ на ніжках зубів виявили сліди пітінгу у вигляді раковин та виразок.

4. Спектральний аналіз мастила і дослідження структури металевих часток, які осіли в стружкосигналізаторі, дозволяють стежити за станом робочих поверхонь зубчастих коліс, судити про характер їх зносу та початок руйнування від утомленості.

Література

1. Хаймзон М.Е., Кораблев А.И. Работоспособность авиационных зубчатых соединений. – М.: Транспорт, 1983. – 176 с.
2. Кораблев А.И., Решетов Д.Н. Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач. – М.: Машиностроение, 1978. – 287 с.
3. Грозин Б.Д., Драйгор Д.А., Семирог-Орлик В.Н. Повышение эксплуатационной надежности деталей машин. – М.: Транспорт, 1970. – 294 с.
4. Крылов К.А., Хаймзон М.Е. Долговечность узлов трения самолетов. – М.: Транспорт, 1976. – 184 с.
5. Трубин Г.К. Контактная усталость материалов для зубчатых колес. – М.: Машгиз, 1976. – 402 с.
6. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. – К.: Техніка, 1970. – 394 с.
7. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. – Л.: Наука, 1967. – 89 с.

Стаття надійшла до редакції 25.09.06.