

Аналіз експериментальних даних показав, що при наявності забоїн та збільшенні шорсткості лопаток компресора виникає значне звуження поля характеристик за рахунок зміщення напірних кривих у бік менших значень зведеної витрати повітря, а також зміни границі помпажу, що підтверджує дані, отримані під час моделювання за допомогою розробленої методики визначення границі помпажу.

#### Список літератури

1. *К теории возникновения помпажа и срыва характеристик компрессора*// Изв. вузов. –М.: Энергетика. –1969. – № 4. – С. 44–49.
2. *Казакевич В.В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах.* – М.: Машиностроение, 1974. – 264 с.
3. *Баммерт Б., Воелк А. Влияние шероховатости поверхности лопаток на аэродинамические и рабочие характеристики осевого компрессора* //Тр. амер. об-ва инж.-мех. Сер. Энергетические машины и установки. –М.: Мир, 1990. – № 2.– С. 59–65.
4. *Холщевников К.В., Емин О.Н., Митрохин В.Т. Теория и расчет авиационных лопаточных машин.* –М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
5. *Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М. Теория авиационных двигателей. Ч.1.* –М.: Машиностроение, 1977. –311 с.
6. *Дмитриев С.А., Лукьяненко О.Е., Моисеев Б.М., Ратынский В.В. Автоматизированный испытательный стенд для отработки методов диагностирования ГТД*// Тез.доп.звітів наук.-техн. конф. наук. кол. ун-ту за 1994 р., 12–14 квіт. 1995 р. –К.: КМУГА, 1995. –С. 15.
7. *Дмитриев С.А., Березлев В.Ф., Моисеев Б.М. Газодинамический стенд для исследования переходных процессов газотурбинных двигателей* // Проблемы управления технической эксплуатацией авиационной техники: Сб. науч. тр.– К.: КМУГА, 1995. – С. 32–36.

Стаття надійшла до редакції 12.03.01.

УДК 629.735.01.03(043.3)

С.І. Йовенко, С.Р. Ігнатович, В.Є. Мільцов

### ОЦІНКА КОМПЛЕКСНОГО ВПЛИВУ ЦИКЛІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ І ТЕМПЕРАТУР НА ПОШКОДЖУВАНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ МАТЕРІАЛІВ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

*Розглянуто результати експериментальної перевірки адекватності теоретичних досліджень в області розробки математичних моделей довговічності і пошкоджуваності матеріалів. Визначено числові параметри імовірнісної моделі накопичення поверхневих пошкоджень при багатофакторному навантаженні для оцінки напрацювання деталей газотурбінних двигунів до їхнього граничного стану.*

Успішне рішення проблеми підвищення ефективності використання авіаційних двигунів із заданими техніко-економічними характеристиками багато в чому зв'язано зі збільшенням їхніх термінів експлуатації при забезпеченні високої надійності.

У свою чергу, задача дослідження надійності і довговічності деталей газотурбінних двигунів зв'язана з вивченням пошкоджуваності і довговічності конструкційних матеріалів в умовах комплексної дії найбільш характерних для цих деталей навантажень.

Для створення достовірних методів розрахунку на міцність теплонапружених деталей газотурбінних двигунів необхідно мати адекватні моделі пошкоджуваності і довговічності, що дозволяють проводити оцінку спільного впливу взаємодіючих навантажень [1].

За об'єкт моделювання були обрані робочі і соплові лопатки авіаційних газотурбінних двигунів, як найбільш навантажені конструктивні елементи двигуна.

Характер накопичення пошкоджень у лопатках двигуна від спільної дії змінних і статичних напружень в умовах підвищених температур визначається відносною величиною кожного з видів навантаження. Аналіз умов навантаження об'єкта моделювання дозволив виділити як основні пошкоджуючі фактори статичні і змінні механічні навантаження при сталих і нестационарних температурах. Для уніфікації експериментальних досліджень довговічності і пошкоджуваності доцільно підтримувати постійними швидкості нагрівання й охолодження, а також частоту змінних навантажень.

Для проведення експериментальних досліджень довговічності зразків жароміцних матеріалів при неізотермічному асиметричному вібраційному навантаженні був розроблений спеціальний автоматизований дослідний стенд, до складу якого входять механічна частина, змонтована на рухливому столі вібратора, і блоки вібронавантаження і термоцикування [2].

Для скорочення обсягів і термінів експериментальних досліджень довговічності використаний метод, заснований на математичній теорії планування дворівневого дрібнофакторного експеримента ДФЕ  $2^{5-1}$  [3; 4]. Вхідними факторами моделі довговічності були характеристики термоцикування і циклів вібронавантаження зразків: максимальна  $T_{\max}$  і мінімальна  $T_{\min}$  температури термоциклу; час витримування при максимальній температурі  $\tau_{\text{вид}}$ ; середнє напруження розтягнення  $\sigma_m$  і амплітуда згинального напруження  $\sigma_a$ . За вихідну величину моделі (відгуку) взята довговічність стандартизованих циліндричних зразків у вигляді логарифма числа циклів вібраційного навантаження до руйнування [5].

Перевірка однорідності статистичного матеріалу здійснювалася за допомогою  $g$ -критерію. Для підтвердження рівноточності вимірів відгуку у всіх  $N = 16$  точках плану експерименту проводилася перевірка однорідності оцінок дисперсій по рядкам  $S_u^2$  за допомогою критерію Кохрена:

$$S_{u \max}^2 / \sum_{u=1}^N S_u^2 \leq G_{\text{кр}},$$

де  $G_{\text{кр}}$  – граничне значення критерію Кохрена.

Коефіцієнти регресійної моделі довговічності обчислені методом найменших квадратів на ЕОМ:

$$\mathbf{B} = (\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{Y},$$

де  $\mathbf{B}$  – матриця-стовпчик коефіцієнтів рівняння регресії;  $\mathbf{X}$  – структурна матриця розміром  $N \times N$ , що задається планом експерименту;  $\mathbf{W}$  – матриця вагових коефіцієнтів;  $\mathbf{Y}$  – матриця-стовпчик значень відгуку.

Для оцінки статистичної значущості обчислених коефіцієнтів регресійної моделі використовувався нормальний розподіл  $\chi$  – статистика. Отримане рівняння регресії має вигляд:

$$\lg N_v = 6,3048 - 0,2898 \sigma_m^K - 0,4686 \sigma_a^K - 0,6272(1 - 0,2377 \sigma_m^K - 0,3484 \sigma_a^K) T_{\max}^K - 0,2792 \tau_{\text{вид}}^K - 0,2104 \sigma_m^K \sigma_a^K T_{\max}^K. \quad (1)$$

Передбачене значення  $\lg N_v$  є точковою оцінкою математичного сподівання відгуку. Для одержання інтервальної оцінки  $\lg N_v$  визначалася дисперсія відгуку:

$$S_{\lg N_v} = x_0 S_{b_0}^2 + x_1^2 S_{b_1}^2 + \dots + x_{l-1} S_{b_{l-1}}^2 + 2\rho_{01} x_0 x_1 S_{b_0} S_{b_1} + 2\rho_{02} x_0 x_2 S_{b_0} S_{b_2} + \dots + 2\rho_{1-2,1-1} x_{1-2} x_{1-1} S_{b_{1-2}} S_{b_{1-1}} = S_{b_i}^2 + 2 \sum_{i < j} (\rho_{ij} x_i x_j S_{b_i} S_{b_j}), \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, l-1,$$

де  $S_{b_i}$  – оцінка дисперсії коефіцієнта  $b_i$ ;  $x_i, x_j$  – кодовані змінні моделі;  $l$  – кількість коефіцієнтів моделі;  $\rho_{ij}$  – коефіцієнти кореляції для  $b_i$  і  $b_j$ .

Перевірку адекватності моделі виконували побудовою довірчої області для  $\lg N_v$  у всіх точках плану і його центрі, де був проведений додатковий експеримент. Величина напівінтервалу довірчої області визначалася за допомогою критерію Ст'юдента:  $I = S_{\lg N_v} t_{\text{кр}}$ .

Результати розрахунку показали, що всі експериментальні значення відгуку  $(\overline{\lg N_v})_0$  лежать у межах довірчих областей. Це свідчить про адекватність регресійної моделі довговічності. При цьому відхилення розрахункових значень довговічності  $\lg N_v$  від середніх емпіричних  $\overline{\lg N_v}$  у всіх точках факторного простору знаходяться в межах  $-1,82226 < \Delta < 2,79055$  %, а розсіювання експериментальних даних щодо розрахункової поверхні регресії не виходить за межі експериментальних середньоквадратичних відхилень.

Модель довговічності (1) може бути використана для попередніх розрахунків пошкодження деталей з використанням правила лінійного підсумовування пошкоджень для досліджуваного варіанта багатфакторного навантаження, що призводить до співвідношення

$$\int_0^{N_p} [N_v(\sigma_a, \sigma_m, T_{\max}, T_{\min}, \tau_{\text{вид}})]^{-1} dN = 1,$$

де  $N_p$  – кількість циклів до руйнування деталі.

Вірогідність такого підходу можна істотно підвищити коректуванням фізичних проявів процесу пошкоджуваності.

Під час дослідження поверхневого пошкодження поверхні зразків оглядали за допомогою створеної на базі серійних складових оптико-телевізійної системи [6]. З метою кращого виявлення мікрodefektів поверхню зразка попередньо обробляли препаратами за методом кольорової капілярної дефектоскопії. Для вивчення закономірностей розподілу дефектів на поверхні робочої частини зразків здійснювалася реєстрація їхніх координат на спеціально розробленому пристрої.

Рівні основних пошкоджуючих факторів обрані на підставі моделі довговічності сплаву ЖС6УВИ (табл. 1).

Таблиця 1

Значення параметрів навантаження під час дослідження  
поверхневої пошкоджуваності сплаву ЖС6УВИ

Номер режиму навантаження	Температура, °С		Напруження, МПа		Час $\tau_{\text{вид}}$ , хВ	Рівень $\lg N_v$
	$T_{\min}$	$T_{\max}$	$\sigma_m$	$\sigma_a$		
1	350	900	150	200	5	7,5971
2	350	900	150	250	5	5,49
3	350	1000	150	200	5	5,8254
4	350	1000	150	250	5	4,8338
5	350	1000	150	250	0	5,4249
6	350	1000	150	250	2,5	5,0993

Пошкоджуваність матеріалу характеризується двома паралельними у часі випадковими процесами: утворенням і поширенням розсіяних малих тріщин [7]. Тривалість стадії накопичення розсіяних тріщин визначається часом від утворення мікрodefektів до початку їхнього об'єднання.

За умови статистично однорідного розподілу тріщин на поверхні об'єкта, що циклічно навантажується, отримано вираз для визначення імовірності об'єднання тріщини максимальної з усієї вибірки довжини  $l_m$  з будь-якою іншою тріщиною [8; 9]:

$$P_{\text{ум}} = \int_0^{\infty} F_R(l_m) f_l(l_m) dl_m, \quad (2)$$

де  $F_R(\bullet)$  – функція розподілу зведеної відстані між тріщинами;  $f_l(\bullet)$  – густина розподілу довжин тріщин.

Для кількісної оцінки імовірності об'єднання тріщин потрібно мати дані про параметри розподілу довжин тріщин  $m_l$  і  $D_l$  і про їхню кількість  $n$  на площі  $S$ .

Для перевірки прийнятого теоретичного припущення про закон розподілу тріщин на поверхні випробуваних зразків [10], оцінки однорідності поля тріщин була побудована матриця пошкодження поверхні. Наприклад, під час розбивки робочої частини зразка довжиною 11 мм на 10 ділянок довжина кожної з них дорівнює 1,1 мм. Якщо діаметр зразка  $d_0=5$  мм має розбивку довжини окружності на 10 частин, ширина ділянки приблизно дорівнює 1,57 мм. Таким чином, матриця поверхні містить 100 ділянок  $1,1 \text{ мм} \times 1,57 \text{ мм}$  площею  $S=1,727 \text{ мм}^2$  кожна. Кількість ділянок матриці задавалася оператором вручну під час обробки експериментальних даних за спеціально розробленою програмою. Вихідними параметрами для програми були розміри тріщин і координати їхніх центрів.

Спосіб вібронавантаження визначив дві характерні ділянки на верхній і нижній частинах поверхні зразка, у яких виникають максимальні напруження вигину і найбільші ушкодження матеріалу. Статистична оцінка розподілу тріщин по довжині й окружності робочої частини зразка показала, що розподіл тріщин можна прийняти рівномірним лише на площадках у верхній і нижній частинах поверхні зразка, обмежених кутами  $45^\circ$ . Ці сектори обмежують ділянки розміром  $1,96 \text{ мм} \times 11 \text{ мм}$  і площею  $S=21,56 \text{ мм}^2$  ( $d_0=5 \text{ мм}$ ), на яких розподіл тріщин можна вважати однорідним. Статистична перевірка гіпотези про рівномірний розподіл тріщин по довжині й окружності зразка проводилася з використанням  $\chi^2$  – критерію Пірсона.

Під час теоретичного обґрунтування моделі накопичення розсіяних пошкоджень було прийнято, що розподіл тріщин на поверхні матеріалу підкоряється закону Пуассона [10]. Експериментальна перевірка цього припущення проводилася підрахунком кількості тріщин на ділянках матриці поверхні. Перевірка гіпотези здійснювалася за допомогою критерію Пірсона  $\chi^2$ :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$$

де  $k$  – кількість значень, що приймає випадкова величина – максимальна кількість тріщин на ділянці матриці;  $n_i$  – кількість ділянок матриці з  $i$ -м числом тріщин;  $n$  – загальна кількість ділянок матриці на поверхні;  $p_i$  – імовірність того, що на одній ділянці матриці буде знаходитися рівно  $i$  тріщин:

$$p_i = \frac{m_n^i}{i!} e^{-m_n}$$

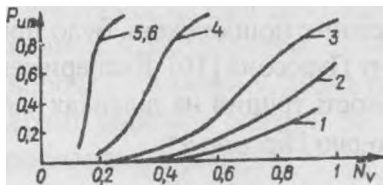
$m_n$  – середнє число тріщин на одній ділянці.

Число степенів вільності  $r$  визначалося за допомогою співвідношення  $r = k - 2$ . З таблиць розподілу критерію  $\chi^2$  за числом  $r$  і розрахунковим значенням критерію  $\chi^2$  знаходили величину імовірності [8]. Гіпотеза про пуассонівський закон розподілу приймалася за умови  $p > \alpha$ , де  $\alpha$  – заданий рівень значущості. Результати розрахунків підтвердили гіпотезу про розподіл тріщин на поверхні дослідних зразків за законом Пуассона з рівнем значущості  $\alpha = 0,1$ .

Експериментально встановлено, що на всіх режимах навантаження утворення тріщин відбувається на ранніх етапах напрацювання. На всіх режимах навантаження спостерігається підвищення концентрації поверхневих тріщин і зростання математичного сподівання їхніх довжин зі збільшенням напрацювання. Розмір тріщин змінювався від декількох мікрометрів до 1,5 мм. Кількість і розміри поверхневих тріщин змінювалися випадково у процесі напрацювання. Кінетика цих процесів залежить від величини і співвідношень основних пошкоджуючих факторів. Апроксимуючі функції концентрації і математичних сподівань довжин поверхневих тріщин наведені в табл. 2.

Експериментально було підтверджено, що утворення макродефектів обумовлене об'єднанням розсіяних тріщин і не пов'язане з підростанням якої-небудь з них до граничних розмірів. При цьому процес укрупнення тріщин за рахунок злиття може відбуватися на відносно ранніх етапах напрацювання. Початок цього процесу зміщується в сторону великих відносних напрацювань при зниженні рівня навантажуваності матеріалу.

	)	)
1	=0,3568+ 1,31736^	/ =-19,3404+ 94,7984/7,
2	=-0,43056+ 3,4707/7,,	/« =0,7904+ 86,8086
3	=-0,06388+ 1,5312/7,,	=35,3693+ 98,8117
4	=8,2153 (N ,, -0,16)08174	« =34,473 5+ 81,5484
5	=( -0,15) / [0,10662( -0,15)+ 0,008]	/« =63,4155+ 70,3095
6	=( -0,125) / [0,0814( ^ - 0,125)+ 0,0195]	« =74,167+ 77,85 ^



6

6

6

1. 1.01.03.114; 01.86.0119408; 1669. - .; 1986. - 97 .
2. . . . . //
3. . . . . , 1988,- . 33-37.
3. . . . . , 1987. - 320 .
4. . . . . ,1986. - 240 .
5. . . . . ) //
6. . . . . , 1991. - . 26-30.
6. . . . . //
7. . . . . , 1989. - . 55-58.
- » , 1989 . - . , 1989. - . 48. // . VI . «

8. *Игнатович С.Р.* Структурная модель накопления микроповреждений в конструкционных материалах // Проблемы прочности. – 1988. – № 5. – С. 8–12.

9. *Применение* структурных моделей для описания процессов пластического разрыхления, образования и распространения микротрещин /Л.П. Лозицкий, С.Р. Игнатович, Г.А. Трокоз, С.И. Йовенко //Тез. докл. Всесоюз. симпозиума «Механика разрушения материалов», окт. 1987 г. – Львов, 1987. – С. 37.

10. *Теоретические* и эмпирические распределения размеров коротких поверхностных трещин при деформировании материалов / С.Р.Игнатович, Г.А.Трокоз, С.И.Йовенко, Н.В.Грищенко // Тез. докл. III Всесоюз. симпозиума по механике разрушения, окт. 1990 г. – Житомир, 1990. – С. 43.

Стаття надійшла до редакції 19.03.01.

УДК 629.7.036

УДК 629.7.036

058-034.421.062.23

М.І. Андрющенко, В.М. Охмакевич, О.І. Чумак

### ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОЦЕСУ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА ДАНИМИ ПРИЙМАЛЬНО-ЗДАВАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ ПАРКУ ОДНОТИПНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

*Розглянуто деякі особливості методики прогнозування процесу накопичення пошкоджень робочої лопатки першого ступеня турбіни авіаційного газотурбінного двигуна.*

У процесі бурхливого розвитку обчислювальної техніки в 90-і роки минулого сторіччя з'явилася можливість розробки складних обчислювальних систем, спрямованих на вирішення різних задач технічної експлуатації газотурбінного двигуна (ГТД). Однією з таких задач є оцінка процесу накопичення пошкоджень конструктивних елементів конкретного екземпляра ГТД, що визначає вихідні дані для експлуатаційних розрахунків, пов'язаних з визначенням довговічності конструктивних елементів.

Під час прогнозування процесу накопичення пошкоджень за конструктивний елемент, що лімітує ресурс авіаційного двигуна, була обрана робоча лопатка першого ступеня турбіни високого тиску як деталь, що працює в найбільш жорстких умовах експлуатації – при високих відцентрових і температурних навантаженнях. Для розрахунків використовувалася така типова схема:

- ідентифікація математичної моделі робочого процесу (ММРП) ГТД з даними приймально-здавальних випробувань (ПЗВ) ремонтного заводу-виробника;
- розрахунок напруг і температур у робочій лопатці конкретного двигуна за моделлю навантаження, що пропонується;
- оцінка пошкодження робочої лопатки конкретного двигуна за моделлю руйнування, що пропонується.

Під час підготовки до ідентифікації були опрацьовані протоколи ПЗВ ремонтного заводу авіаційних двигунів. Для парку двигунів зведені до МСА контрольовані параметри (ознаки стану) були також зведені по режимному параметру – тязі. Ідентифікація ММРП ГТД з даними ПЗВ проводилася таким чином:

- розраховувався вектор відхилю  $\delta$  від контрольованих параметрів конкретного двигуна і відповідними параметрами не ідентифікованої ММРП на заданому режимі роботи двигуна;
- розраховувалася матриця коефіцієнтів впливу вектора параметрів стану  $\bar{a}$  (набір коефіцієнтів, які описують відхилення стану проточної частини конкретного двигуна від серед-