

!! "# \$ % !
! ! % % & ! % % ' () !!
! ! % " ! * # \$ + * ! ! % # ! *

! "
\$ #!
%

!"#\$% "&' () ! " *+ , - . : ; < = > ? @
! 2 / ! 45 " 6 * & 7 - ! . 7 " 8) * ' -) - "% /) , 9) # . :)) ! %) ;
* - / * ! % . \$. 7 . * ! < 45
= - !) - * " 7) ! -) 2 , %) / , 9) # . : < , - 8 : *) , ! " * : 6 / ;
0 * . 7 ! , ") ! % ! . \$ & ! , " / ') \$: - * . - 8 , 9) # . : < !) - *) ;
! / * + : - * . - 8 * - ! " \$) 1 7 0) * ' 7) # " " , " * > ? @

. \$ A) " " ! , ") ! 1 ! . \$ & B 6 A , 9) # . : < " " \$) ! " 8 \$: 0 -) 3 &) 2)
0 \$ / 45 7 " * . 7 " * & 7 ,) ! " : 7 CD6E F 6 , - GD6E F H ' B I A ! , ") ! "
* - ! " \$ * + \$: JDI F I ' KDIE F HL B M A & " , - / 2 " !) 7) ! -) 2) - / 8 ! / " :
< & ' () * + , - . ' KDME F H B 5 A * . 7 , - " * / - " " & .) 1) CD5E F 5 ' KDNE F HO B
" 2 A 0 . * -) ! " " ! , ") ! ! . \$ & " " () % - " * . - / -) ! " :) ! 2) ! &) * 7 " * - " \$ /
< CD " * E F ' G D " 2 E F P " *
, ") ! " & . : " , - / 2 * * . 7 , - " * / - 5 -) - "%) ! / * + : , " - " 7 . * - " 7 -) 3 &) 2) A
, -) 0 . / = Q = ' () ! 7 - * + : ! . , \$ / " " 0 1

" F B > = ? ' 5 F R * > = ? ' "

. R " S ' R * A "\$. #) * ' () ! * ") ! \$ * + ! T :) 7 # = Q = ! 2 / " ! ! ,) !) " , - / 2)
* . 7 , - " * / -) < B 4UB ' F ' , A ! . *) - = Q = ' () ! 7 - * + : CD = VEF = V ' GD = ' EF PO B V
, A \$ + * + = Q = ' () !) - *) ! / * + : , - -) - "% / / , 9) # . : <
= - -) - "% / / ! . \$ & " 5 7) # " , - 8 : *

" FO > = ? ' 5 F R * > = ? "

\$: -) - "% / / ! . \$ & 6 , - ,) / * + : !) - *) ! / " * "\$. # * +

$$\bar{\psi} = K_{\psi} \left[\bar{t} / \tau (\bar{\sigma}, \bar{T}) \right],$$

. 2 S A 7) . \$ + * - ! " \$) 1 7 0) * 7 " * - " \$ / < ! () ! T : / 8) 2) ! 2) ! & * + &) " , - / 2)
* . 7 , - " * / -) B & A) . 6 0 * ' () ! - "%) ! / *) % " * & 8 % - " * . - " 2 / 7 . * ! "\$. #) *
. \$ 8 / "\$. # * +) ! 2) ! &) * 7 " * - " \$ / < ! " & . + " - 2 / 7 . * ! 6 / 0 1 2 S
& . !) ' () ! . \$ & 1 " 2 ' () ! %) : * +) - ! : : ' . "\$. # C # , " - " 7 . * ;
- " 7 * 5 7) # . / ! " *) - . \$: 0 8 8 ! T :) Y () ! , \$! 0 +) 2) ! T : / 7) # " . ! - "%) ;
! / ! " * ' *)

ту – 11 000 м, число Маха – 0,8 при температурі T_H , що відповідає параметрам міжнародної стандартної атмосфери).

Вектор $[\hat{C}]$ має такі параметри: частоти обертання роторів низького \hat{n}_{HT} та високого \hat{n}_{VT} тиску, повна температура за турбіною \hat{T}_T^* , повний тиск за компресором P_K^* , тривалість ділянки \hat{t} ; величини помилок визначення напруги $\Delta\hat{\sigma}$ і температури $\Delta\hat{T}$. Як характеристику дисперсії довговічності використано величину відхилення десяткового логарифму довговічності $\Delta\lg(\tau)$ [4]. Значення математичних сподівань і СКВ зазначених параметрів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Математичні сподівання і СКВ параметрів, що входять до вектора $[\hat{C}]$

Параметр	Математичне сподівання параметра			СКВ виміру параметра
	злітний режим		крейсерський режим	
	$T_H=15^\circ\text{C}$	$T_H=30^\circ\text{C}$		
Частота обертання ротора, %:				
низького тиску	92,4	97,1	89,1	0,053
високого тиску	95,8	99,2	90,3	0,053
Повна температура за турбіною, К	851	909	759	1,53
Повний тиск за компресором, кПа	2865	2953	1040	26,8
Тривалість ділянки, год	$5,55 \cdot 10^{-4}$	$5,55 \cdot 10^{-4}$	$5,55 \cdot 10^{-4}$	$9,25 \cdot 10^{-7}$
Помилка визначення:				
напруги, МПа	0	0	0	$0,0031 \bar{\sigma}$
температури, К	0	0	0	$0,0051 \bar{T}$
Тривалість ділянки, хв	2	2	2	0,0033
СКВ десяткового логарифму довговічності $\lg(\tau)$	0	0	0	0,2

Прийнято, що всі компоненти вектора $[\hat{C}]$ мають нормальний закон розподілу.

При розрахунку напруги і температури в аналізованому КЕ використовувалися залежності, наведені в роботі [5], які мають вигляд:

$$\sigma = f_\sigma(n_{VT}, P_K^*), \quad T = f_T(T_T^*, n_{VT}, n_{HT}). \quad (10)$$

Значення $\bar{\sigma}$ і \bar{T} розраховувалися за залежностями

$$\bar{\sigma} = \hat{\sigma}_\Pi + \Delta\hat{\sigma}, \quad \bar{T} = \hat{T}_\Pi + \Delta\hat{T}, \quad (11)$$

де $\hat{\sigma}_\Pi = f_\sigma(\hat{n}_{VT}, P_K^*)$, $\hat{T}_\Pi = f_T(\hat{T}_T^*, \hat{n}_{VT}, \hat{n}_{HT})$.

Як залежність $\tau(\cdot)$ використана залежність Ларсона–Міллера [6].

З урахуванням викладеного залежність (1) буде мати вигляд:

$$\hat{\psi}_c = \hat{t} / 10^{\frac{P}{N} + \Delta\lg(\tau) - c}, \quad (12)$$

де $P = f(\sigma)$, c – відповідно параметр і константа залежності Ларсона–Міллера.

За допомогою генератора псевдовипадкових чисел для кожного режиму роботи були сгенеровані десять різних рядів векторів $[\hat{C}]$. Кількість векторів $[\hat{C}]$ у кожному ряду дорівнювала 1000. При обробці одержаних рядів за залежностями (10) – (12) були розраховані відповідні вектори $[\hat{\psi}_c]$, для яких визначався закон розподілу, значення $\bar{\psi}_c$ і S_{ψ_c} .

На наступному етапі обробки одержаних результатів з'ясувався закон розподілу вектора $[\hat{\psi}_c]$. Розглядалися два можливі закони розподілу величини $\hat{\psi}_c$ – нормальний і логарифмічно-нормальний. Як критерій згоди використовувався χ^2 – критерій.

Для визначення величин K_ψ і K_S за залежністю (9) розраховуються величини $\bar{\sigma}$, \bar{T} і S'_ψ (залежності (3), (10) і (5)). При цьому необхідно конкретизувати алгоритм розрахунку величин, що входять до залежностей (5) і (8) з урахуванням залежності (10).

Для розрахунку величин, що входять до виразу (5), використані наступні залежності.

Значення величин S'_ψ , S^σ_ψ , S^I_ψ , S^r_ψ розраховувалися за залежностями

$$\begin{aligned}
 S^I_\psi &= S_t / \tau(\bar{\sigma}, \bar{T}), \\
 S^\sigma_\psi &= \bar{t} \left(\frac{1}{\tau(\bar{\sigma} + S_\sigma, \bar{T})} - \frac{1}{\tau(\bar{\sigma}, \bar{T})} \right), \\
 S^T_\psi &= \bar{t} \left(\frac{1}{\tau(\bar{\sigma}, \bar{T} + S_T)} - \frac{1}{\tau(\bar{\sigma}, \bar{T})} \right), \\
 S^r_\psi &= \bar{t} \left(\frac{1}{\tau(\bar{\sigma}, \bar{T}) + S_{\text{от}}} - \frac{1}{\tau(\bar{\sigma}, \bar{T})} \right).
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Значення $S_{\text{от}}$ розраховувалося за залежністю $S_{\text{от}} = 10^{\frac{\bar{P}}{T} - C} - 10^{\frac{\bar{P}}{T} - S_{\text{Alg}(T)} - C}$.

Для розрахунку СКВ напруги і температури, що входять до виразів (8), використано такі залежності

$$\begin{aligned}
 S_{\sigma_{\text{н.в.т}}} &= f_\sigma(\bar{n}_{\text{в.т.}} + S_{n_{\text{в.т.}}}, \bar{P}_k^*) - f_\sigma(\bar{n}_{\text{в.т.}}, \bar{P}_k^*), \\
 S_{\sigma_{P_k^*}} &= f_\sigma(\bar{n}_{\text{в.т.}}, \bar{P}_k^* + S_{P_k^*}) - f_\sigma(\bar{n}_{\text{в.т.}}, \bar{P}_k^*), \\
 S_{T_{T^*}} &= f_T(\bar{T}_T^* + S_{T_T^*}, \bar{n}_{\text{в.т.}}, \bar{n}_{\text{н.т.}}) - f_T(\bar{T}_T^*, \bar{n}_{\text{в.т.}}, \bar{n}_{\text{н.т.}}), \\
 S_{T_{n_{\text{в.т.}}}} &= f_T(\bar{T}_T^*, \bar{n}_{\text{в.т.}} + S_{n_{\text{в.т.}}}, \bar{n}_{\text{н.т.}}) - f_T(\bar{T}_T^*, \bar{n}_{\text{в.т.}}, \bar{n}_{\text{н.т.}}),
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

$$S_{T_{n_{\text{н.т.}}}} = f_T(\bar{T}_T^*, \bar{n}_{\text{в.т.}}, \bar{n}_{\text{н.т.}} + S_{n_{\text{н.т.}}}) - f_T(\bar{T}_T^*, \bar{n}_{\text{в.т.}}, \bar{n}_{\text{н.т.}}).
 \tag{15}$$

У табл.2 наведено значення математичного сподівання і СКВ пошкодження КЕ при $K_\psi = 1$, $K_S = 1$ за залежностями (4) і (7), а також значення аргументів цих залежностей.

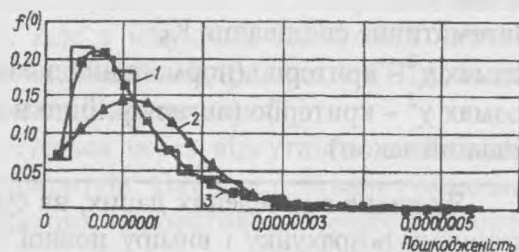
У табл.3 наведено значення K_ψ , K_S і χ^2 – критерію, які були отримані при обробці векторів $[\hat{\psi}_C]$, сформованих при проведенні числового експерименту.

На рисунку наведено гістограму, одержану при обробці одного з векторів $[\hat{\psi}_C]$, сформованого для злітного режиму ($T_H = 15^\circ\text{C}$) і криві для нормального і логарифмічно нормального законів розподілу ($\bar{\psi} = 1,223 \cdot 10^{-7}$, $S_\psi = 7.40 \cdot 10^{-8}$; $\chi^2 = 3555$ – для нормального і $\chi^2 = 22$ для логарифмічно нормального законів). Як видно з наведених даних, вектор $[\hat{\psi}_C]$ має розподіл, близький до логарифмічно нормального, а значення параметрів K_ψ і K_S практично не змінюються в широкому діапазоні експлуатаційних навантажень і пошкодження КЕ.

Крім того, аналіз наведених у табл. 2 даних дозволяє суттєво знизити обсяг розрахунків за сформованим алгоритмом шляхом виключення з нього розрахунків величин, що мало впливають на кінцевий результат.

Гістограма, одержана при обробці одного з векторів $[\hat{\psi}_C]$, і криві для нормального і логарифмічно нормального законів:

1 – результати експерименту; 2 – нормальний закон; 3 – логарифмічно нормальний закон



Таблиця 2

Значення параметрів $\bar{\sigma}$, \bar{T} , $\bar{\psi}$ і S_{ψ} на розрахункових режимах

Параметр	Математичне сподівання параметра		
	злітний режим		крейсерський режим
	$T_H=30^{\circ}\text{C}$	$T_H=15^{\circ}\text{C}$	
Математичне сподівання напруги $\bar{\sigma}$, МПа	42,3	45,6	41,3
СКВ напруги S_{σ} , обумовлена помилкою, МПа:			
виміру частоти обертання ротора високого тиску,	0,0054	0,0056	0,0051
виміру повного тиску за компресором	0,0065	0,0056	0,0065
алгоритму розрахунку	0,131	0,141	0,128
Сумарна СКВ напруги S_{σ}	0,156	0,165	0,152
Математичне сподівання температури \bar{T} , К	1064	1132	988
СКВ температури S_T , обумовлене помилкою, К:			
виміру повної температури за турбіною	1,58	1,58	1,94
виміру частоти обертання ротора високого тиску	0,10	0,09	0,33
виміру частоти обертання ротора низького тиску	0,16	0,15	0,23
алгоритму розрахунку	5,42	5,77	5,04
Сумарна СКВ температури S_T	5,75	6,09	5,50
Математичне сподівання пошкодження			
КЕ $\bar{\psi}$ ($K_{\psi} = 1$)	$1,04 \cdot 10^{-7}$	$5,01 \cdot 10^{-6}$	$1,32 \cdot 10^{-9}$
СКВ пошкодження, обумовлене похибкою:			
відліку часу S_{ψ}^t	$1,71 \cdot 10^{-10}$	$8,26 \cdot 10^{-9}$	$2,18 \cdot 10^{-12}$
розрахунку значення напруги S_{ψ}^{σ}	$3,20 \cdot 10^{-9}$	$1,44 \cdot 10^{-7}$	$4,37 \cdot 10^{-11}$
розрахунку значення температури S_{ψ}^T	$3,55 \cdot 10^{-8}$	$1,56 \cdot 10^{-7}$	$5,12 \cdot 10^{-10}$
стохастичним розсіюванням довговічності матеріалу S_{ψ}^r	$6,47 \cdot 10^{-8}$	$3,17 \cdot 10^{-6}$	$8,24 \cdot 10^{-10}$
Сумарне СКВ пошкодження ($K_{\psi} = 1$)	$7,39 \cdot 10^{-8}$	$3,48 \cdot 10^{-6}$	$9,72 \cdot 10^{-10}$

Таблиця 3

Результати, одержані при проведенні числового експерименту

Параметр	Злітний режим		Крейсерський режим
	$T_H=15^{\circ}\text{C}$	$T_H=30^{\circ}\text{C}$	
Розмах K_{ψ}	1,146 – 1,181	1,136 – 1,173	1,14 – 1,191
Математичне сподівання K_{ψ}	1,16	1,15	1,167
Розмах K_S	0,926 – 1,02	0,92 – 1,01	0,936 – 1,03
Математичне сподівання K_S	0,964	0,957	0,978
Розмах χ^2 – критерію (нормальний закон)	559 – 6954	725 – 2743	714 – 3791
Розмах χ^2 – критерію (логарифмічно нормальний закон)	0,55 – 26	8,9 – 24,9	6,5 – 25,8

Як видно з наведених даних, на сумарне СКВ температури S_T суттєво впливають похибки алгоритму розрахунку і виміру повної температури за турбіною. Отже з кінцевого алгоритму розрахунку може бути виключено обчислення величин $S_{T_{n,m}}$ і $S_{T_{n,m}}$ (залежності (14) і (15)).

Крім того, помилка відліку часу практично не впливає на сумарну СКВ пошкодження, Тому з кінцевого алгоритму розрахунку може бути виключено обчислення величини S_{μ}^t (залежність (13)).

Список літератури

1. *Ветров А.Н., Кучер А.Г.* Вероятностные методы оценки остаточного ресурса конструктивных элементов авиационных ГТД в эксплуатации // Проблемы прочности. – 1989. – № 8. – С. 70–76.
2. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Наука, 1964. – 576 с.
3. *Двигатель ПС–90А.* Руковод. по техн. эксплуатации: В 3 кн. – Пермь: ПНПО Авиадвигатель, 1990.
4. *Ветров А.Н., Кучер А.Г., Ковешников Н.А.* Вероятностно-параметрические модели длительной прочности металлических материалов АГТД // Проблемы прочности. – 1989. – № 4. – С.14–17.
5. *Якушенко О.С.* Автоматизированный мониторинг залишкового ресурсу авіаційних ГТД в експлуатації за критерієм пошкодження робочих лопаток турбіни: Автореф. дис. канд. техн. наук. – К.: КМУЦА, 1999. –17 с.
6. *Сопротивление* материалов деформированию и разрушению: Справочник / Под ред. В.Т. Трошенко. –К.: Наук. думка. – 1994. – Т. 2. – 701 с.

Стаття надійшла до редакції 06.07.01.

УДК 621.981+621.762

ББК 058 - 058.051.21

Є.Ю. Більчук, І.М. Новіков

ЗНОСОСТІЙКІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ПОШКОДЖЕННЯМИ

Запропоновано результати досліджень з розроблення і випробування композиційних порошків та матеріалів без використання дефіцитних компонентів. Наведено алгоритм вирішення цих питань, залежних від окремих аргументів. Обґрунтовано теоретичні положення щодо збільшення опору зносу покриттів з позиції структурно-енергетичної теорії тертя.

Сучасний літальний апарат – це складний інженерний комплекс, обладнаний потужним силовим устаткуванням, злітно-посадковою механізацією, працездатність якого залежить від безвідмовного функціонування рухомих спряжень з різними за призначенням парами тертя. У процесі експлуатації внаслідок дії високих навантажень, швидкостей пересування, температур, впливу агресивних середовищ, вібрації, рухомі спряження зазнають природного зносу, це призводить до руйнування або схоплення, невідворотних відмов деталей та агрегатів, що потребує їх передчасного зняття з експлуатації. За багатостадійністю конструктивних форм і функціональних особливостей вузлів тертя вимоги зносостійкості є загальним параметром, який визначає їх безвідмовність та довговічність.

Явище зносу, що обмежує термін експлуатації, виникає і розвивається в поверхневих прошарках. Найважливішими факторами, які визначають експлуатаційну надійність і термін служби деталей, в умовах тертя, є властивості матеріалів та їх робочих поверхонь, здатність до відновлення зношених поверхонь та повернення їм потрібних експлуатаційних властивостей. Це є важливим завданням сучасного авіаремонтного виробництва. На теперішній час реалізуються різні технології поверхневого зміцнення. Але з існуючих технологій значний практичний інтерес викликає метод детонаційного напилювання. Наприклад, у США, за цим методом зміцнюють і відновлюють понад 63% вузлів авіаційної техніки [1].

В Україні впровадження такої технології стримується через відсутність необхідного асортименту порошкових матеріалів для нанесення покриттів. Використовувані композиції на основі нікелю містять велику кількість таких дефіцитних та дорогокоштуючих компонентів, як вольфрам, кобальт, ванадій, молібден та інші, що значно знижує економічну ефекти-