

УДК 621.452.3-226:620.16:519.222

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАССЕЯНИЯ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ГРАНИЦ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДИСКОВ КНД АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2009 В. В. Кутырёв, С. В. Теплова

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И.Баранова, г. Москва

На основе статистической обработки результатов испытаний и эксплуатации дисков из титановых сплавов получены зависимости коэффициентов вариации усталостной долговечности от её базы. Определены нижние границы распределения долговечности дисков 1-й ступени компрессора низкого давления (КНД) двигателей Д-30 и Д-30КУ в зоне галтелей пазов типа «ласточкин хвост». Работа выполнена по инициативе авторов и отражает их точку зрения по излагаемому вопросу.

Малоцикловая усталость, долговечность, авиационный двигатель, компрессор, диск

Малоцикловая усталость, рассеяние усталостной долговечности, коэффициенты вариации, толерантные коэффициенты, уровень доверительной вероятности.

В эксплуатации при наработках, составивших 6020 и 8842 циклов, произошло локализованное разрушение дисков 1-й ступени КНД двигателей Д-30КУ и Д-30, соответственно. Диски изготовлены из титанового сплава ВТ3-1.

Аналогичные случаи разрушения дисков КНД на стендах и в эксплуатации после наработки 500...5000 циклов с началом развития трещин от конструктивных концентраторов напряжений уже были отмечены в работах [1, 2].

При исследовании разрушившихся дисков двигателей Д-30КУ в пазах типа «ласточкин хвост» обнаружены очаги трещин, расположенные на поверхности и под поверхностью сопряжения основания и боковой грани паза (далее галтели) со стороны выхода потока воздуха. При проведении на разгонном стенде эквивалентно-циклических испытаний двух дисков этой же ступени в пазах типа «ласточкин хвост» были выявлены усталостные трещины. В первом случае трещины протяжённостью вдоль пазов 110 и 9 мм были обнаружены после наработки 9658 циклов, включая наработку в составе двигателя 3784 и на стенде 5874 циклов (далее 3784+5874). Во втором случае трещины протяжённостью вдоль пазов 40 мм и в радиальном направлении 20 мм были выявлены после наработки 10898 циклов (3263+7635). Очаги трещин были расположены на по-

верхности галтели на расстоянии около 5 мм от торцевой поверхности диска.

При исследовании дисков двигателей Д-30 в пазах типа «ласточкин хвост» обнаружены очаги трещин, расположенные вблизи срединной поверхности паза.

Для определения нижних границ распределения долговечности дисков необходимы статистические оценки (средние значения и коэффициенты вариации долговечности). В работе [3] исследованы закономерности изменения усреднённых коэффициентов вариации усталостной долговечности стандартных образцов и дисков из титановых сплавов до образования трещин \bar{v}_{lgN_s} и разрушения \bar{v}_{lgN_r} . Сравнительный анализ данных, приведённых в этой работе, показал следующее:

- нижние границы распределения долговечностей до образования трещин практически совпадают с нижними границами распределения долговечностей до разрушения дисков;
- средняя величина минимальных долговечностей (до образования трещин в дисках), взятых из каждой выборки, совпадает с нижними границами долговечности;
- минимальные значения долговечности дисков до разрушения находятся правее нижних границ распределения долговечностей.
- в эксплуатации при наработке дисков, не превышающей границ распределения долговечности, не наблюдалось разрушения дисков по причине малоцикловой усталости;

- ресурсы дисков в эксплуатации в одних случаях практически совпадают с границами распределения долговечностей, а в некоторых случаях находятся существенно правее границ;

- границы распределения долговечностей, определенные по усредненным коэффициентам их вариации, являются практически всегда заниженной оценкой циклического ресурса дисков.

Анализ распределения коэффициентов вариации малоциклового усталостной долговечности образцов и дисков показал, что они находятся в широком диапазоне 2...7 % и зависят от температуры, технологии изготовления, базы долговечности [3]. Проблематичным является существенное отличие нижних границ распределения долговечности дисков КНД, определенных с использованием усредненного коэффициента вариации, от долговечности, соответствующей достигнутому в эксплуатации безопасному ресурсу этих дисков: Д-30 – 5000, Д-30КУ – 4300 циклов. Поэтому уточнение закономерностей рассеяния долговечности и определение нижних границ распределения долговечности на основе данных эксплуатации и испытаний дисков является актуальным.

Целью работы является уточнение коэффициентов вариации долговечности дисков типовых конструкций; определение нижних границ распределения долговечности дисков 1-й ступени КНД двигателей Д-30 и Д-30КУ на основе данных их испытаний, эксплуатации и коэффициентов вариации; а также сравнение значений нижних границ с величиной ресурса дисков и минимальными долговечностями до образования трещин и разрушения.

В соответствии с поставленной целью были решены следующие задачи:

- исследованы закономерности рассеяния усталостной долговечности дисков из титановых сплавов;

- статистически оценены средние значения и нижние границы долговечности дисков 1-й ступени КНД двигателей Д-30 и Д-30КУ.

В качестве параметра долговечности, характеризующего повреждение дисков, принят логарифм числа циклов до образования в них трещин допустимых размеров $\lg N_{\Delta}$, а в качестве разрушающего парамет-

ра – логарифм числа циклов до их разрушения $\lg N_P$. Рассеяние долговечности оценивается коэффициентами вариации параметров $v_{\lg N} = S_{\lg N} / \bar{\lg N}$; чертой сверху обозначены средние величины. Волной сверху будут обозначены нижние границы долговечности, определённые с использованием средних величин. Нижние границы долговечности, определённые с использованием единственного значения, будут обозначены без волны. Параметры долговечности, толерантные коэффициенты, среднеквадратические отклонения и коэффициенты вариации без индексов относятся как к долговечности до образования трещин, так и к долговечности до разрушения.

Исходными данными для оценки нижних границ распределения долговечности дисков являются: значения долговечностей дисков до образования трещин и разрушения; толерантные множители $z_{\lg N_S} = 2$ или $z_{\lg N_R} = 3$, являющиеся функцией вероятной вероятности, вероятности образования трещин или разрушения диска и числа испытанных экземпляров до образования трещин или разрушения дисков-прототипов, индексы S и R относятся к величинам прогнозируемых параметров. Прогнозируемыми величинами являются статистически оценённые соотношения долговечностей и коэффициентов вариации долговечностей дисков до образования трещин и разрушения – $\beta_{\lg N_R} = 0,99$, где $\beta_{\lg N_R} = \bar{\beta}_{\lg N_P}$, при этом $\beta_{\lg N_P} = \lg N_{\Delta} / \lg N_P$. Анализ данных [3] показал, что у дисков из титановых сплавов, коэффициенты вариации долговечности дисков до образования трещин несколько больше, чем до разрушения $\beta_{v_R} = 1,11$, где

$$\beta_{v_R} = v_{\lg N_S} / v_{\lg N_R}, \quad \text{при этом} \quad v_{\lg N_S} = \bar{v}_{\lg N_{\Delta}}, \\ v_{\lg N_R} = \bar{v}_{\lg N_P}.$$

Числа циклов до образования трещин в пазах типа «ласточкин хвост» двигателей Д-30 составили: 6995, 7129, 7157, 7920, 8632, 12912. Значения долговечностей до образования трещин дисков двигателя Д-30КУ приняты с учётом следующих допущений: в случае разрушения диска его долговечность до образования трещин принимается такой

же величины как и долговечность до разрушения, т.е. $N_{\text{э}} = N_{\text{р}}$, а также допущения $\lg N_{\text{э}} = \beta_{\lg N_{\text{р}}} \lg N_{\text{р}}$. Тогда $N_{\text{э}1} = 10898$, $N_{\text{э}2} = 9658$, $N_{\text{э}3} = 6020$, $N_{\text{э}4} = 9930$, $N_{\text{э}5} = 8054$, $\lg N_{\text{э}6} = 5508$.

Статистические оценки долговечности дисков до образования трещин определены на основе данных эксплуатации и испытаний с учётом принятых допущений (табл. 1).

Таблица 1 - Статистические оценки долговечности дисков

| Изделие | Диск | Сплав | Элемент | $T^{\circ}\text{C}$ | Объём данных* | $\lg N_{\text{э}}$ | $v_{\lg N_{\text{э}}}$ | $v_{\lg N_{\text{э}}}^{100}$ |
|---------|-------|-------|-----------|---------------------|---------------|--------------------|------------------------|------------------------------|
| «99» | 4 КВД | BT18У | галтель | 400 | 5 / 0 | 2,82 | 6,03 | 3,77 |
| | 5 КВД | | ступица | 300 | 14 / 0 | 2,94 | 5,10 | 3,64 |
| | | | пазы | 160 | 21 / 0 | 3,06 | 3,27 | 2,92 |
| | | | пазы | 160 | 7 / 0 | 2,97 | 4,04 | 3,61 |
| | | | отверстия | 160 | 10 / 2 | 2,71 | 4,06 | 3,63 |
| «55Б» | 2 КНД | | пазы | 200 | 6 / 0 | 3,04 | 3,95 | 3,29 |
| | | | отверстия | 200 | 9 / 0 | 3,34 | 3,29 | 2,74 |
| «99» | 1 КНД | BT9 | пазы | 200 | 7 / 2 | 3,07 | 3,90 | 3,25 |
| Д-30 | 2 КНД | BT3-1 | отверстия | 100 | 13 / 2 | 3,72 | 2,69 | 2,69 |
| | 1 КНД | | пазы | 80 | 6 / 1 | 3,92 | 2,59 | 2,70 |
| Д-30КУ | 1 КНД | | пазы | 80 | 3 / 2 | 3,91 | 3,13 | 3,26 |
| Модели | | BT9 | отверстия | 100 | 11 / 6 | 4,03 | 2,76 | 2,76 |
| | | BT25У | пазы | 100 | 4 / 2 | 4,20 | 2,90 | 2,90 |
| НК8-2У | 4 КНД | BT8 | отверстия | 200 | 5 / 1 | 4,46 | 3,10 | 2,58 |

* В числителе приведено количество дисков до образования трещин, в знаменателе количество разрушившихся дисков

Анализ распределения коэффициентов вариации усталостной долговечности дисков из титановых сплавов показал, что при температуре 80...400°C коэффициенты вариации находятся в диапазоне 2,59...6,03 %.

Результаты обработки данных испытаний и эксплуатации дисков приведены к температуре 100°C по формуле

$$v_{\lg N_{\text{э}}}^{100} = v_{\lg N_{\text{э}}} / \kappa_v^T,$$

где κ_v^T – коэффициент, позволяющий учесть изменение среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации долговечности дисков в зависимости от температуры. Линия регрессии коэффициента κ_v^T определяется как

$$\kappa_v^T = 0,002 T + 0,8.$$

Закономерности рассеяния долговечности дисков из титановых сплавов представлены на рис. 1 и 2. По оси абсцисс – средние значения логарифма долговечности, а по оси ординат – статистическая оценка (далее оценка) среднего квадратического

отклонения $S_{\lg N_{\text{э}}}^{100}$ (рис. 1) и коэффициента вариации $v_{\lg N_{\text{э}}}^{100}$ (рис. 2).

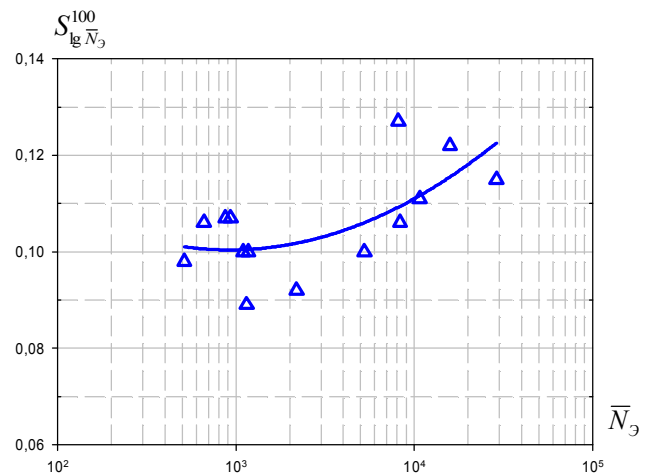


Рис. 1. Зависимости среднего квадратического отклонения логарифма долговечности от её среднего значения

Экспериментальные данные, приведённые на рис. 1 и 2, позволили сформулировать феноменологическую модель рассеяния усталостной долговечности дисков до образования трещин:

$$S_{\lg N_{\mathcal{D}}}^{100}(N) = 0,19 - 0,06 \lg N + 0,01 (\lg N)^2,$$

$$v_{\lg N_{\mathcal{D}}}^{100}(N) = 11 - 4 \lg N + 0,5 (\lg N)^2. \quad (1)$$

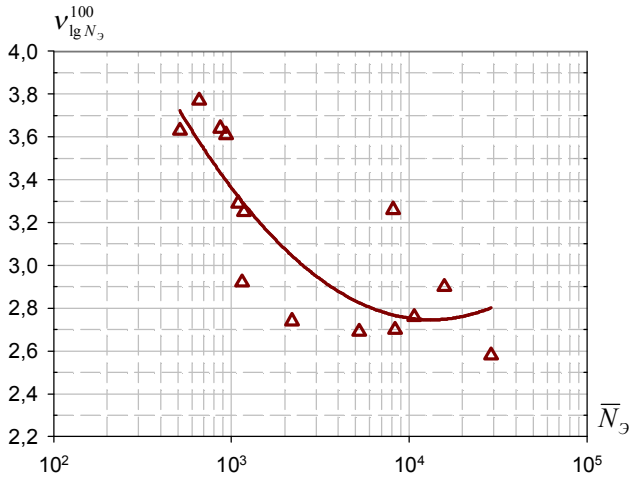


Рис. 2. Зависимости коэффициента вариации логарифма долговечности от её среднего значения

При этом коэффициенты кривой регрессии составили $r_s = 0,44$ и $r_v = 0,69$, соответственно.

Таким образом, коэффициенты вариации долговечности дисков при температуре 100°C и $N = 10^2 \dots 10^4$ циклов могут быть представлены в виде параболической зависимости, а минимальное значение коэффициента вариации логарифма долговечности находится вблизи $\lg N_{\mathcal{D}} = 10^4$, что согласуется с закономерностями, полученными ранее на основе отечественных и зарубежных данных [5]. Рассчитанные по (1) значения коэффициентов вариации долговечности рассматриваемых дисков до образования трещин близки к значениям оценочных коэффициентов вариации.

Коэффициенты вариации логарифмов долговечности при рабочих температурах и базах, соответствующих её среднему значению, могут быть определены следующим образом

$$v_{\lg N_s} = v_{\lg N_s}^{100} K_v^T \quad (2)$$

Если известны результаты испытаний или эксплуатации нескольких дисков, нижние границы распределения их долговечности до образования трещин и до разрушения $\lg \tilde{N}_{\mathcal{D}}^H$ и $\lg \tilde{N}_P^H$, соответственно определяются как:

$$\lg \tilde{N}_{\mathcal{D}(P)}^H = \lg N_{\mathcal{D}(P)} \xi_{v_{s(R)}}^*$$

где $\xi_{v_{s(R)}}^* = 1 - z_{\lg N} v_{\lg N_{s(R)}}$ – коэффициент, позволяющий учитывать рассеяние долговечности при испытании нескольких дисков;

$z_{\lg N_s} = 2$ и $z_{\lg N_R} = 3$ – толерантные множители, соответствующие доверительным вероятностям $\gamma_s = 0,75 \dots 0,90$ и $\gamma_R = 0,90 \dots 0,95$, вероятности образования трещины $P_s = 0,05$ и вероятности разрушения $P_R = 0,005$, числу испытанных экземпляров $z_N = 10 \dots 50$, соответственно.

Если предположить, что $\lg N_{\mathcal{D}}^{\max}$ и $\lg N_P^{\max}$ попадают в диапазоны

$$\lg N_{\mathcal{D}} \leq \lg N_{\mathcal{D}} (1 + 2v_{\lg N_s})$$

$$\lg N_P \leq \lg N_P (1 + v_{\lg N_R}),$$

соответственно, то нижние границы определяются с использованием максимального значения по формулам

$$\lg N_{\mathcal{D}}^H = \lg N_{\mathcal{D}}^{\max} \xi_{v_s}^*,$$

$$\lg N_P^H = \lg N_P^{\max} \xi_{v_R}^*,$$

где $\xi_{v_s}^* = \frac{1 - 2v_{\lg N_s}}{1 + 2v_{\lg N_s}}$, $\xi_{v_R}^* = \frac{1 - 3v_{\lg N_R}}{1 + v_{\lg N_R}}$ – коэф-

фициенты, позволяющие учитывать рассеяние долговечности, когда используется её максимальное значение до образования трещин и разрушения, соответственно.

При наличии испытаний одного диска можно предположить, что единственное значение оказалось максимальным и тогда нижние границы распределения долговечностей $N_{\mathcal{D}(P)}^H$ можно будет определить по единственному значению $N_{\mathcal{D}(P)}$:

$$\lg N_{\mathcal{D}}^H = \lg N_{\mathcal{D}} \xi_{v_s}^*,$$

$$\lg N_P^H = \lg N_P \xi_{v_R}^*.$$

В табл. 2 приведены: нижние границы распределения долговечности дисков, которые определены с использованием средних и максимальных значений долговечности и коэффициентов вариации, найденным по формулам (1) и (2); а также соотношение нижних границ с величиной ресурса и минимальным значением долговечности до образования трещин и разрушения дисков.

Таблица 2 - Нижние границы распределения долговечности дисков и их соотношение с ресурсом и минимальным числом циклов до образования трещин и разрушения

| диск | $\{\lg N_{\text{э}}^n, \lg N_{\text{э}}^n, \lg N_P^n, \lg N_P^n\}$ | $\lg P_{\text{экс}} / \lg N^n$ | $\lg N_{\text{э}}^{\min} / \lg N^n$ | $\lg N_P^{\min} / \lg N^n$ |
|--------|--|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Д-30 | 3,68...3,76 | 0,98...1,01 | 1,02...1,04 | 1,05...1,07 |
| Д-30КУ | 3,62...3,69 | 0,98...1,01 | 1,01...1,03 | 1,02...1,04 |

Сравнительный анализ данных, приведённых в табл. 2, показал:

- ресурс диска практически совпадает с нижними границами распределения долговечностей $P_{\text{экс}} \approx N^n$;

- значение долговечностей до образования трещин и разрушения дисков находится правее нижних границ распределения долговечностей.

Выводы

1. Коэффициенты вариации долговечности дисков КНД, изготовленных из титановых сплавов, могут быть представлены на базе $10^3 \dots 10^4$ циклов в виде параболической зависимости.

2. Нижние границы распределения долговечности дисков соответствуют величине ресурса, при котором трещин в дисках не обнаружено. Долговечность дисков до образования трещин и разрушения превышает эти нижние границы.

Библиографический список

1. Шанявский, А.А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций. Синергетика в инженерных приложениях / А.А. Шанявский. – Уфа: Монография, 2003. – 803 с.

2. Кутырев, В.В. Исследование напряжённого состояния и критерии прочности дисков компрессоров из титановых сплавов / В. В. Кутырёв // Конверсия в машиностроении. 2006, №6, С. 9–13.

3. Кутырев, В.В. Закономерности рассеяния малоциклового долговечности никелевых и титановых сплавов / В.В. Кутырёв, С.В. Теплова // Конверсия в машиностроении. – 2008, №1, С. 42–45.

4. Кутырев, В.В. Закономерности малоциклового долговечности, критерии прочности и прогнозирование ресурса дисков авиационных двигателей / В.В. Кутырёв // Конверсия в машиностроении. 2008, №2, С. 29–34.

5. Райхер, В.Л. Рассеяние усталостной долговечности: Текст лекций / В.Л. Райхер. – М.: ЛАТМЭС, 2003. – 224 с.

References

1. A.A Shanyavsky. Safe fatigue failure of aviation structure elements. Sinergetics in engineering applications. Ufa, monograph, 2003. – 803pp.

2. V.V. Kutyrev. Study of stressed state and criteria of strength of compressor disks of titanium alloys//Conversion in engineering industry. 2006, №6, – pp.9-13.

3. V.V. Kutyrev, S.V. Teplova. Laws of low-cycle fatigue dispersion of nickel and titanium alloys// Conversion in engineering industry. 2008, №1, – pp.42-45.

4. V.V. Kutyrev. Laws of low-cycle fatigue, criteria of strength and prediction of aviation engine disk life// Conversion in engineering industry. 2008, №2, – pp.29-34.

5. V.L. Raikher. Fatigue life dispersion. Lectures. M.LATMES, 2003. – 224p.

LAWS OF LIFE DISPERSION AND STATISTICAL ESTIMATION OF LIFE DISTRIBUTION BOUNDARIES AS APPLIED TO AVIATION ENGINE LPC DISKS

© 2009 V. V. Kutyrev, S. V. Teplova

Central Institute of aviation Motors, Moscow

The fatigue life variation coefficients versus its base were obtained on the basis of statistic processing of titanium disks test and operation results. The lower boundaries of the D-30 and D-30KU engines' LPC stage 1 disk life distribution in the area of fillets of dovetailed grooves were determined.

Low-cycle fatigue, fatigue life dispersion, variation coefficients, level of confidence

Информация об авторах

Кутырев Василий Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГУП «Центральный институт Авиационного моторостроения им. П.И.Баранова». Тел. 8 (495) 362-49-71. E – mail: kem@ciam.ru (для Кутырева В.В.). Область научных интересов: прогнозирование ресурса.

Теплова Светлана Владимировна, ведущий инженер ФГУП «Центральный институт Авиационного моторостроения им. П.И.Баранова». Тел. 8 (495) 552-46-11. E – mail: teplova@lytkarino.net. Область научных интересов: прогнозирование ресурса.

Kutyrev Vasiliy Vladimirovich, Dr. of Sc., chief research scientist of Central Institute of Aviation Motors after P.I. Baranov. Phone 8 (495) 362-49-71. E – mail: kem@ciam.ru (for V.V. Kutyrev). Area of research: life prediction.

Teplova Svetlana Vladimirovna, leading engineer of Central Institute of Aviation Motors after P.I. Baranov. teplova@lytkarino.net. Tel. 8 (495) 552-46-11.