

УДК 620.178

А. С. ГИШВАРОВ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА НАДЕЖНОСТЬ И РЕСУРС

Рассматриваются методы моделирования ускоренных ресурсных испытаний технических систем на надежность ресурс, позволяющие получать дополнительный эффект как в плане сокращения длительности испытаний, так и повышения уровня их адекватности эксплуатационным испытаниям. В качестве объекта исследования рассматриваются технические системы типа авиационных ГТД, их узлы, агрегаты и элементы. *Надежность; ресурс; испытания; ускоренное моделирование; техническая система*

### ВВЕДЕНИЕ

Одна из самых тяжелых потерь в жизни – это потеря времени.

Ж. Бюрон, XVIII в.

Современный период развития техники характеризуется высокими требованиями к надежности, сжатыми сроками создания и внедрения в эксплуатацию.

В общем «жизненном цикле» технических систем (изделий авиационной техники, энерго- и общего машиностроения и др.), включающем в себя проектирование, доводку, серийное производство, эксплуатацию и ремонт, испытаниям отводится особая роль. Во многих случаях оказывается, что подавляющая часть затрат на обеспечение «жизненного цикла» приходится именно на испытания.

С целью сокращения объема и длительности ресурсных испытаний систем на практике используются методы ускоренных испытаний, обеспечивающие получение необходимой информации о надежности и ресурсе в более короткие сроки.

На практике существующие методы сокращения длительности испытаний технических систем на надежность и ресурс, включая ускоренные, в силу различных причин – сложности реализации метода, несоответствия метода испытаний целям исследования, большой длительности испытаний, отсутствия исходных данных для реализации метода и других, не всегда оказываются эффективными [1–4]. Очевидно, что чем шире перечень методов ускоренной оценки, тем эффективнее можно

решать задачи по повышению надежности и ресурса изделий.

В данной статье рассматриваются методы сокращения длительности испытаний технических систем, основанные на физическом моделировании внешней среды  $\Phi_{c1}, \Phi_{c2}, \dots, \Phi_{cm}$ , моделировании нагружения  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m$ , моделировании исходного состояния  $\Phi_{p1}, \Phi_{p2}, \dots, \Phi_{px}$ , косвенной оценке ресурса (рис. 1) [1].

### 1. МЕТОДЫ СОКРАЩЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИСПЫТАНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ И РЕСУРС

Мудрый ценит всех, ибо в каждом замечает хорошее.

Ф. Бальтасар, XVIII–XIX вв.

Различные способы реализации условия эквивалентности в областях исходного состояния  $G_P$  и режима нагружения  $G_R$  изделия обуславливают и различные методы сокращения длительности испытаний (рис. 1, 2).

Классифицированные по группам методы сокращения длительности испытаний приведены на рис. 2.

### 2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА ИСПЫТАНИЯМИ ПО G- И Q-ОПТИМАЛЬНЫМ ПЛАНМ ЭКСПЕРИМЕНТА

Видеть легко, трудно предвидеть.

Франклин, XVIII в.



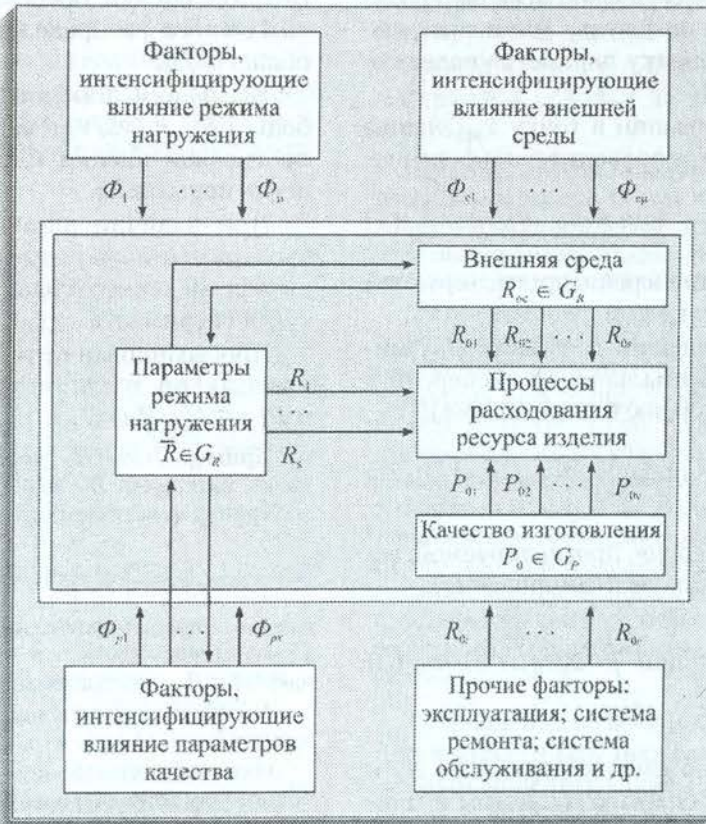


Рис. 1. Факторы, влияющие на процессы расходования ресурса изделия

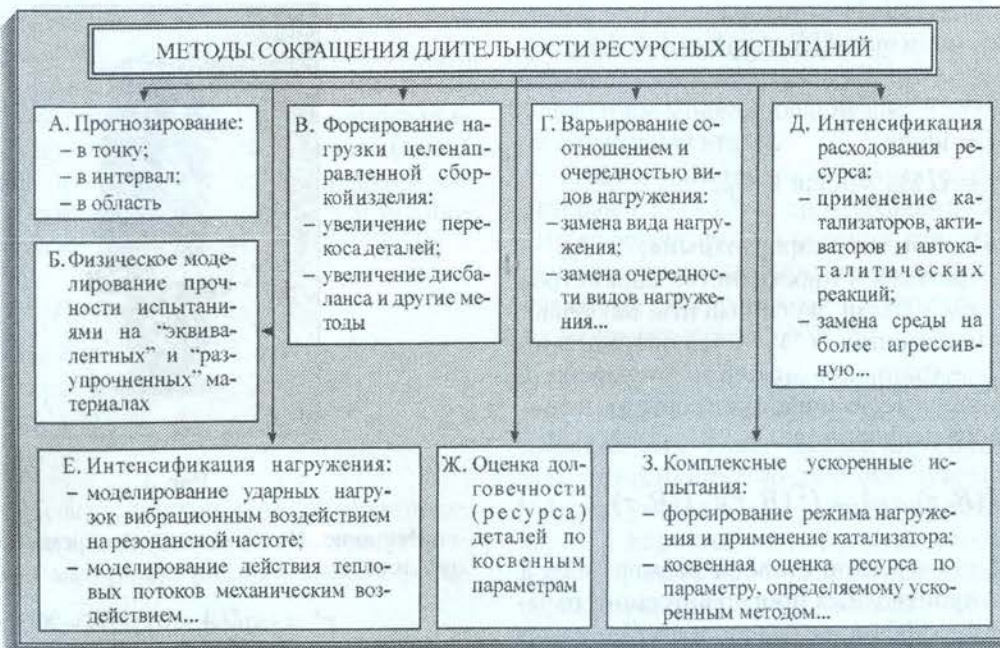


Рис. 2. Классификация методов сокращения длительности испытаний технических систем на надежность и ресурс



В данном случае прогнозирование проводится по результатам  $G$ - и  $Q$ -оптимально спланированных экспериментов, минимизирующих прогнозную оценку параметра надежности и ресурса [4, 6].

При прогнозировании в точку  $x_{\text{пр}}$  оценка дисперсии параметра проводится по формуле:

$$d(x_{\text{пр}}, \varepsilon_N^*) = \min d(x_{\text{пр}}, \varepsilon_N), \quad (1)$$

где  $d(x_{\text{пр}}, \varepsilon_N)$  — дисперсия прогнозируемой величины по плану  $\varepsilon_N$ .

При прогнозировании в область  $G_{\text{пр}}$  минимизируется максимальная из дисперсий в области ( $G$ -оптимальное планирование):

$$d(x_{\text{пр}}, \varepsilon_N^*) = \min_{\varepsilon_N} \max_{G_{\text{пр}}} d(x_{\text{пр}}, \varepsilon_N) \quad (2)$$

или средняя дисперсия прогнозируемой величины ( $Q$ -оптимальное планирование):

$$\int_{G_{\text{пр}}} d(x_{\text{пр}}, \varepsilon_N^*) dx = \min \int_{G_{\text{пр}}} d(x_{\text{пр}}, \varepsilon_N) dx. \quad (3)$$

При заданном объеме эксперимента  $N_{\text{и}}$  и ограничении на дисперсию  $d_{\text{п}}$  режим и длительность испытаний определяют по целевой функции:

$$\begin{aligned} \tau_y &= \min; \\ d[(R_y, \tau_{\text{пр}}), \varepsilon_N^*] &= \\ &= \min_{\varepsilon_N} \max_{G_{\text{пр}}} d[(R_y, \tau_{\text{пр}}), \varepsilon_N] \leq d_{\text{п}}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$R_y(\tau) = \text{var} \in G_R;$$

$$N_{\text{и}} = \text{idem};$$

$$(P_0)_y = (P_0)_{\text{и}} = \text{idem} \in G_p,$$

где «пр» — индекс «прогнозный»;  $G_{\text{пр}}$  — область прогноза в пространстве параметров  $(R, \tau)$ ;  $\varepsilon_N$  — план эксперимента, включающий  $N_{\text{и}}$  испытаний; (\*) — знак оптимальности;  $d_{\text{п}}$  — граничное значение дисперсии  $d$ , определяемое через информационную матрицу Фишера по формуле:

$$d[(R, \tau), \varepsilon_N] = f^T(R, \tau) C f(R, \tau), \quad (5)$$

где  $f(R, \tau)$  — вектор-столбец размерности  $k$  частных производных прогнозируемого параметра по коэффициентам модели ( $k$  — число коэффициентов прогнозной модели);  $T$  — знак транспонирования;  $C = M^{-1}$  — дисперсионная матрица размерности  $(k \times k)$  ( $M$  — информационная матрица Фишера размерности  $k \times k$ ).

Согласно (4) минимум дисперсии прогнозной оценки обеспечивается за счет оптимального распределения  $N_{\text{и}}$  испытаний в области  $G_R$ .

Введением дополнительной степени свободы ( $N_{\text{и}} = \text{var}$ ) можно повысить точность прогнозной оценки или сократить длительность испытаний.

При наличии априорных данных объем эксперимента сокращается, поскольку требуется проведение только «недостающих» опытов эксперимента.

Прогнозирование возможно как для дискретных, так и для интервальных значений  $\tau$  и  $R(\tau \in G_{\tau}, R \in G_R)$ .

**Пример.** Лопатка турбины (рис. 3) изготовлена из материала ЖС6-К. Длительная прочность материала лопатки описывается уравнением:

$$\sigma = A - BT(20 + \lg \tau^*), \quad (6)$$

где  $\sigma$  — предел длительной прочности, кг/мм<sup>2</sup>;  $T$  — температура, К;  $\tau$  — длительность работы, час;  $A$  и  $B$  — постоянные коэффициенты.

Требуется оценить долговечность лопатки при напряжении 3,5 кг/мм<sup>2</sup> и температуре 2000 К.

Известно, что модель прочности в данной области остается неизменной, а используемое оборудование позволяет проводить испытания образцов лопаток в интервале нагрузок от 2,0 до 3,0 кг/мм<sup>2</sup> и от 970 до 1120 К. На испытания выделено 4 образца.



Рис. 3

**Решение.** Из (6) определим время до разрушения лопатки

$$\tau^* = \exp[(A - \sigma_p)/BT - 20], \quad (7)$$

где  $\sigma_p$  — напряжение лопатки в опасном сечении, кг/мм<sup>2</sup>.

Для выбора плана эксперимента задаемся начальными значениями коэффициентов в уравнении (7) —  $A = 231,5$  и  $B = 7,709 \cdot 10^{-3}$ . Тогда в



соответствии с критерием  $G$ -оптимальности необходимо провести (рис. 4, а):

- один опыт при  $\sigma_p = 20 \text{ кг/мм}^2$  и  $T = 973 \text{ К}$ ;
- три опыта при  $\sigma_p = 30 \text{ кг/мм}^2$  и  $T = 1120 \text{ К}$ .

При этом прогнозная оценка долговечности лопатки проводится с дисперсией в 17 раз меньшей, чем при равномерном планировании эксперимента (рис. 4, б).

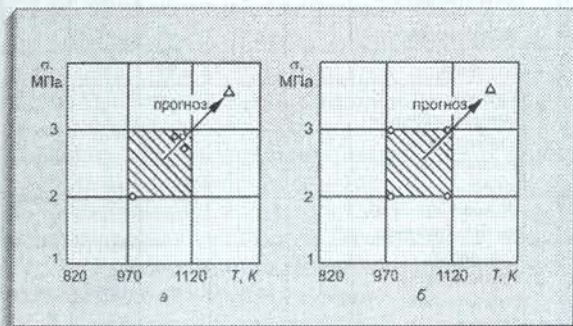


Рис. 4. Планы испытаний образцов лопаток: а —  $G$ -оптимальный план; б — равномерный план; заштриховано — область испытаний; о — точка плана эксперимента;  $\Delta$  — точка прогноза

### 3. ИСПЫТАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ И «РАЗУПРОЧНЕННЫХ» МАТЕРИАЛОВ

Сокращение длительности испытаний в данном случае достигается проведением испытаний на эквивалентных материалах (когда исходный материал заменяется на материал-аналог, имеющий худшие прочностные характеристики, что позволяет быстрее вырабатывать ресурс) или испытаниями «разупрочненных» материалов (когда ухудшение прочностных характеристик материала достигается изменением или исключением упрочняющей технологии) [1, 7, 10]:

$$\begin{aligned} \tau_y[P_0, R(\tau)] &\rightarrow \min; \\ \Pi[P_0, R(\tau), \tau]_y &= \Pi[P_0, R(\tau), \tau]_{\text{И}}; \\ R_y(\tau) &= R_{\text{И}}(\tau) = \text{idem}; \\ (P_0)_y &= \text{var} \in G_p, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $G_p$  — область, внутри которой прочностные характеристики исходного, «разупрочненного» и материала-аналога коррелированы.

#### 3.1. Испытания на эквивалентных материалах

Эквивалентные материалы — это материалы, физико-механические свойства которых

удовлетворяют требованиям масштабных коэффициентов перехода, (по твердости, модулю упругости, плотности, коэффициенту теплопроводности и т. д.). Выбор эквивалентных материалов основан на теории моделирования [8].

**Пример.** Эрозионно-ударный процесс трения частицы «абразива-песка» по поверхности лотка, покрытой полиэтиленом низкого давления, удаётся моделировать ударом стального шарика диаметром 2 мм (сталь ШХ15) [9].

Эксперименты, проведенные при свободном падении шариков и песчинок на поверхность образцов при различных скоростях и углах атаки, позволили определить коэффициенты трения на модели и натуре. Сопоставление, проведенное с учетом масштабных коэффициентов перехода, показало, что расхождение коэффициентов трения в модели и в натуре не превышает 20%. Удовлетворительное совпадение результатов объясняется тем, что при моделировании трения при ударе также, как и в натуральных условиях, имеет место пластический контакт, хотя они хуже результатов, полученных при испытаниях на одинаковых материалах.

Сокращение объема и длительности испытаний может быть также достигнуто приближенным моделированием на тех же материалах, которые предполагается использовать в натурной конструкции. При этом масштабные коэффициенты перехода для объемных механических и тепло-физических свойств материалов не всегда выдерживаются, зато очень точно выдерживают масштабные коэффициенты для параметров режима нагружения и характеристик конструкции. Такое приближенное моделирование дает удовлетворительные результаты.

Анализ данных, полученных различными авторами [11–13 и др.], позволил в работе [10] сформулировать условия, при которых (с целью сокращения длительности испытаний) возможна замена исходного материала (ИМ) на материал-аналог (МА).

1. ИМ и МА должны принадлежать одному классу материалов: жаропрочных или жаростойких. Такое разделение обусловлено тем, что жаропрочность более чувствительна к структурным изменениям и чистоте границ зерен, а жаростойкость (окалиностойкость) в большей степени определяется химическим составом сплава, природой окисных пленок и в меньшей степени зависит от структурного состояния сплава. К тому же, по данным высокие жаропрочность и жаростойкость трудно совместимы в одном сплаве: жаростойкие сплавы обладают более низкими показателями жаропрочности, а жаропрочные высоко-



легированные сплавы в значительной мере уступают им по сопротивлению газовой коррозии.

2. ИМ и МА относятся к одной группе материалов: литых или деформируемых, поскольку в литых материалах разница в концентрации примесей, а также в свойствах пограничного слоя и самих зерен более значительна, чем в деформируемых.

3. ИМ и МА имеют одинаковую основу: Ni, Co, Cr-Ni, Fe, Ti.

4. ИМ и МА принадлежат одной из групп, различающихся в определенном интервале температур по виду структурного состояния: «неупрочняемые» (армко-железо) и упрочняемые твердым раствором; с карбидным упрочнением; с интерметаллидным упрочнением; со смешанным упрочнением.

5. Режимы нагружения элемента с ИМ и МА находятся в области температур, где сохраняется стабильность механических свойств материала ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0.2}$ ,  $\sigma_D$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ) (рис. 5), поскольку при температуре  $t > t_{МА}$  происходит процесс разупрочнения, т. е. изменяется характер накопления повреждений.

6. ИМ и МА имеют общую область нагрузок по определяющим характеристикам ресурса (длительной прочности, малоциклового прочностного ресурса и т. д.).

7. Обеспечивается сохранение ведущего вида расходования ресурса.

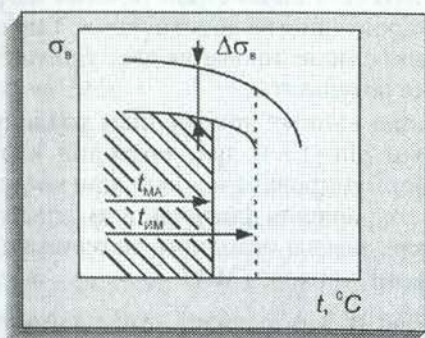


Рис. 5. Иллюстрация интервала температур, в котором возможна замена ИМ на МА

**Пример.** Ресурс газотурбинного двигателя определяется длительной статической прочностью рабочих лопаток 1 и 3 ступеней турбины, имеющих одинаковый запас по долговечности ( $n_1$  и  $n_3$ ):

$$n_1 \approx n_3 = 2,25; \quad n = \tau / \tau^*, \quad (9)$$

где  $\tau$  — ресурс;  $\tau^*$  — долговечность.

Материал лопатки 1-й ступени — сплав ЖС6-К, 3-й ступени — сплав ЭИ929.

Требуется подобрать МА для лопатки 3-й ступени, обеспечивающий сокращение длительности испытаний не менее, чем в 10 раз.

Таблица 1

№	Характеристика сплава	МА				
		ИМ	ЭИ929	ЭИ437А	ЭИ437Б	ЭИ617
1	Жаропрочность	+	+	+	+	+
2	Деформируемость	+	+	+	+	+
3	Ni основа	+	+	+	+	+
4	Упрочнение интерметаллидное	+	+	+	+	+
5	Стабильность механических свойств	+	+	+	+	+
6	Наличие общей области нагружения	-	-	+	+	+
7	Сохранение ведущего вида расходования ресурса	+	+	+	+	+
Коэффициент ускорения испытаний $K_u$		-	-	10	1,3	2
Сплав, рекомендуемый в качестве МА		-	-	+	-	-

Согласно условию задачи в качестве МА для ускоренных испытаний может быть использован сплав ЭИ617.

### 3.2. Испытания на «разупрочненных» материалах

В данном случае сокращение длительности испытаний достигается за счет применения «разупрочненных» материалов [7].

Характерной особенностью производства современных сложных технических изделий является применение методов упрочняющей технологии: химико-термической обработки (закалка, цементация, азотирование, цианирование и др.); пластического деформирования поверхности; антифрикционных и антикоррозионных покрытий; хромирования; никелирования; борирования и др.

Влияние перечисленных методов учитывается в моделях расходования ресурса через параметры вектора  $P_0$ , характеризующие качество изготовления изделия. Поэтому, варьируя параметрами вектора  $P_0$  путем исключения упрочняющей технологии из процесса производства или замены одной на другую, с меньшим эффектом упрочнения, можно сократить длительность испытаний. Очевидно, что для реализации такого подхода область, в которой проводится замена материала ( $G \rightarrow G_R \wedge G_P$ ), должна совпадать с областью, отражающей эквивалентное состояние исходного и «разупрочненного» материалов.



**Пример.** Экспериментальное исследование метода ускоренных испытаний с «разупрочнением» проводилось на сопловых лопатках 1-й ступени турбины вспомогательной силовой установки ТА-6А. Лопатки соплового аппарата — литые, изготавливаемые из жаропрочного сплава ЖС6-К, перо лопатки алитируется на глубину 0,03 ... 0,06 мм.

Основными факторами, определяющими ресурс сопловых лопаток, являются:

- газовая коррозия (жаростойкость);
- малоцикловая прочность (термостойкость).

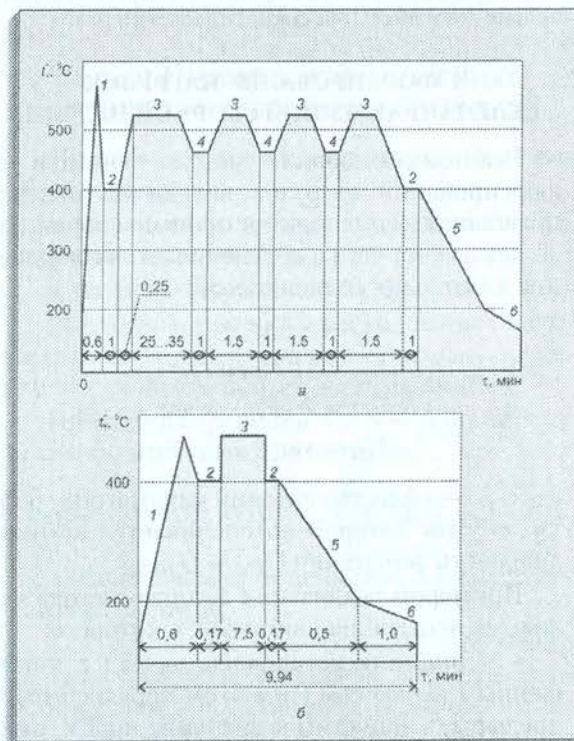
С целью ускорения процесса окисления поверхности лопаток в качестве физической модели была выбрана лопатка без алитированного слоя. Известно, что для сплавов с никелевой основой, содержащих более 5% Al и менее 5% Cr, характерно формирование поверхностного слоя  $Al_2O_3$ , а содержащих менее 5% Al и более 15% Cr — слой  $Cr_2O_3$ . Критическое значение отношения Cr/Al, разделяющее два процесса, равно 4.

Для лопаток из сплава ЖС6-К с алитированием и без алитирования отношение Cr/Al составляет соответственно 0,5 и 1,7, т. е. как в натурной, так и в модельной лопатках происходит окисление с образованием слоя  $Al_2O_3$ , тем самым обеспечивается подобие процессов расходования ресурса.

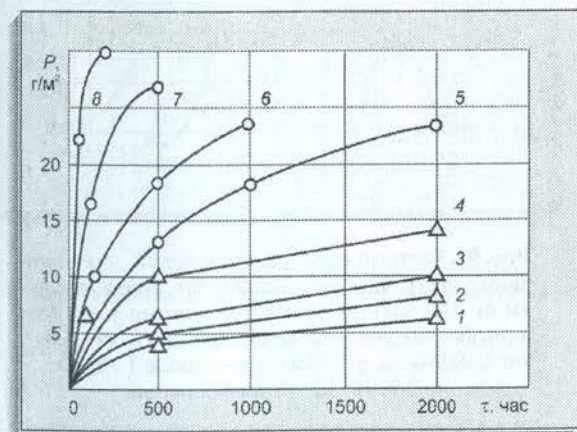
или, учитывая зависимость  $\Pi^* = f(t_{min}, t_{max})$ , в виде:

$$\frac{N_{II}}{N_{II}^*} = \frac{N_y}{N_y^*}, \quad (12)$$

где  $N^*$  — долговечность лопатки (в циклах) до появления трещины длиной 1 мм;  $N$  — число циклов нагружения в испытаниях;  $t_{min}, t_{max}$  — соответственно минимальная и максимальная температуры лопатки в цикле нагружения.



**Рис. 7.** Циклы нагружения двигателя: а — на самолете; б — в стендовых ускоренных испытаниях; 1 — запуск двигателя; 2 — режим «холостой ход»; 3 — режим комбинированной нагрузки «имитация запуска маршевых двигателей» ( $G_{отб} = 1,26$  кг/с + 45 кВт); 4 — генераторный режим (отбор электроэнергии 32 кВт); 5 — останов; 6 — охлаждение



**Рис. 6.** Зависимость привеса сплава ЖС6К от температуры и длительности испытаний:  $\circ$  — без алитирования;  $\Delta$  — с алитированием; 1 — 900°C; 2 — 950°C; 3 — 1000°C; 4 — 1100°C; 5 — 900°C; 6 — 950°C; 7 — 1000°C; 8 — 1100°C

Эквивалентность испытаний по газовой коррозии обеспечивается равенством привесов за время испытаний (рис. 6):

$$P(t_n, \tau_n) = P(t_y, \tau_y), \quad (10)$$

где  $P$  — привес, г/м<sup>2</sup>;  $t$  — температура лопатки, °C;  $\tau$  — длительность испытаний, час.

С учетом циклического нагружения условие эквивалентности запишется в виде:

$$\Pi(t_{min, II}, t_{max, II}, N_{II}) = \Pi(t_{min, y}, t_{max, y}, N_y) \quad (11)$$

Измерения проводились на режиме комбинированной загрузки — «включение отбора воздуха за компрессором 1,25 кг/с и отбор электроэнергии 45 кВт» (на данном режиме двигатель отрабатывает 90% своего ресурса в эксплуатации). Типовой цикл нагружения двигателя приведен на рис. 7, а.

В качестве базового в ускоренных испытаниях был выбран режим комбинированной загрузки с максимальной температурой лопатки, равной 910°C (регулирование обеспечивалось отбором воздуха за компрессором). Из условия обеспечения эквивалентности испытаний по газовой коррозии лопаток общая длительность составляет  $\tau_y = 72$  час (что эквивалентно эксплуатационным испытаниям длительностью 1370 часов). Эквивалентность испытаний по термической усталости



лопаток обеспечивается воспроизведением 488 запусков (в эксплуатационных испытаниях 1544 запуски).

Цикл нагружения двигателя в ускоренных испытаниях приведен на рис. 7, б.

В целом результаты ускоренных и длительных испытаний по внешнему виду, количеству и расположению дефектов, данным люм-контроля, изменению площади соплового аппарата и профиля лопаток, изменению газодинамических параметров двигателя, изменению микротвердости, остаточной механической усталости и массы лопаток, подтвердили их эквивалентность. При этом длительность испытаний сократилась в 19 раз.

#### 4. ФОРСИРОВАНИЕ НАГРУЗОК ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОЙ СБОРКОЙ ИЗДЕЛИЯ

Реализация данного метода основана на форсировании нагрузок внесением целенаправленных изменений в процесс сборки изделия, за счет чего и обеспечивается сокращение длительности испытаний:

$$\begin{aligned} \tau_y &\rightarrow \min; \\ \Pi[P_0, R(\tau), \tau]_y &= \Pi[P_0, R(\tau), \tau]_n; \\ R_y(\tau) &= F(P_{сб}) = \text{var} \in G_{R_s}; \\ P_{сб} &= \text{var} \in G_{P_s}, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $G_{P_s}$  — область значений параметров сборки, внутри которой обеспечивается автономность испытаний  $G_{P_s} \sim G_R$ .

Примером реализации данного метода являются испытания двигателя, у которого:

- подшипник установлен на вал с повышенным перекосом (при этом перекос может превышать допустимое значение по ТУ, важно, что это превышение не нарушает ограничений по автономности испытаний);
- подшипник установлен с максимальным в пределах ТУ радиальным зазором;
- уровень вибрации превышает эксплуатационный за счет увеличения дисбаланса в плоскостях коррекции, изменения углового положения дисбаланса друг относительно друга и несоосности опор роторов;
- шлицевое соединение привода вентилятора установлено с повышенным углом перекоса, а шероховатость поверхности шлиц имеет худшее в пределах ТУ значение.

**Пример.** Исследование турбовинтового двигателя по влиянию посадок подшипников вала винта на уровень вибрации, проведенное М. А. Алабиным и А. Б. Ройтманом методом корреляционно-регрессионного анализа статистических данных испытаний двигателей, показало, что форсирование нагрузки турбовинтового двигателя (увеличение вибрации корпуса двигателя) возможно за счет изменения посадок подшипников (рис. 8).

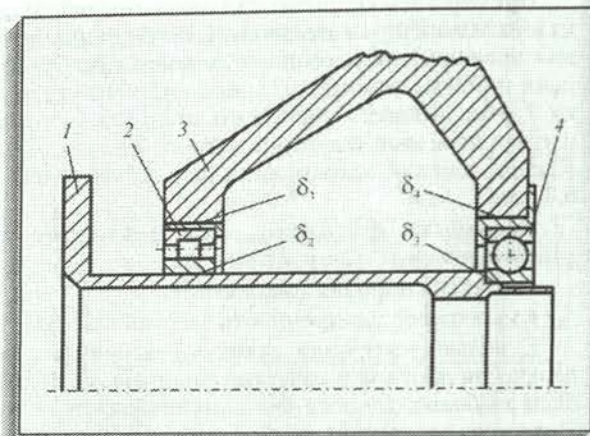


Рис. 8. Схема установки вала винта в картере авиационного турбовинтового двигателя: 1 — вал винта; 2 — роликовый подшипник; 3 — картер двигателя; 4 — шариковый подшипник;  $\delta_1$  — посадка роликового подшипника на вал;  $\delta_2$  — посадка роликового подшипника в картер редуктора;  $\delta_3$  — посадка шарикового подшипника на вал;  $\delta_4$  — посадка шарикового подшипника в картер редуктора

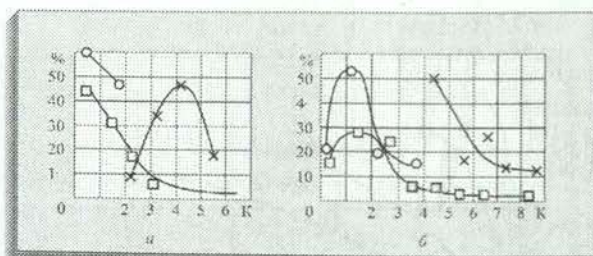


Рис. 9. Гистограммы распределений значений виброперегрузки для различных видов посадки  $\delta_3$  при частоте вращения «малого газа» (а) и «рабочей» частоте вращения (б): о — натяг ( $-0,005 \dots -0,019$ ); х — зазор ( $+0,005 \dots +0,010$ ); к — нулевая посадка

Вибрация оценивалась коэффициентом виброперегрузки по 1-й роторной гармонике, измеряемым на корпусе двигателя на основном режиме и режиме «малого газа».

По статистическим данным 140 двигателей были получены следующие уравнения регрессии:

- для режима «малый газ»:

$$K_1 = 1,42 + 109,29\delta_3, \quad (14)$$

- для основного режима:

$$K_2 = 2,35 + 135,86\delta_3. \quad (15)$$

Для обоих режимов увеличение виброперегрузки возможно изменением зазора по посадке  $\delta_3$  (рис. 9).



### 5. СОКРАЩЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИСПЫТАНИЙ ИЗМЕНЕНИЕМ СООТНОШЕНИЯ И ОЧЕРЕДНОСТИ ВИДОВ НАГРУЖЕНИЯ

Сокращение длительности испытаний варьированием соотношения видов нагружения можно рассмотреть на примере испытаний двигателя с увеличением (в пределах автомобильной области) доли циклических нагрузок по отношению к статическим нагрузкам.

**Пример 1.** Для лопаток турбины двигателя ТА-6А, изготовленных из сплава ЖС6-К и эксплуатирующихся на объекте в течение 2327 часов с выполнением 785 запусков, суммарная повреждаемость составляет:

$$P = P_{\tau} + P_N = (\tau/\tau^*)^{\alpha} + (N/N^*)^{\alpha} = 0,012, \quad (16)$$

где  $P_{\tau}$ ,  $P_N$  — соответственно повреждаемость при статическом и циклическом нагружениях;  $\tau^*$ ,  $N^*$  — соответственно статическая и циклическая долговечности;  $\alpha$  — коэффициент «жесткости» режима.

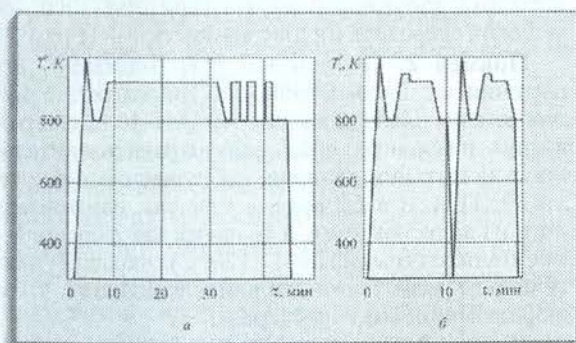


Рис. 10. Циклы нагружения лопатки турбины: а — в эксплуатации; б — в испытаниях

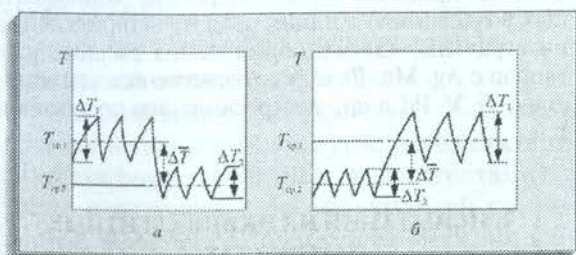


Рис. 11. Циклы нагружения образцов при испытаниях на термоусталость: а — схема нагружения «высокая-низкая»; б — схема нагружения «низкая-высокая»;  $T_{ср.1} = 984 \text{ K}$ ;  $T_{ср.2} = 848 \text{ K}$ ;  $\Delta T_1 = 650 \text{ K}$ ;  $\Delta T_2 = 650 \text{ K}$ ;  $\Delta T = 100 \text{ K}$

Эксплуатационный цикл нагружения лопатки приведен на рис. 10,а. В пределах автомобильной области разрушения  $1 \leq P_{\tau}/P_N \leq 10$  (разрушение лопаток имеет статико-усталостный

характер) переходом на испытания по циклу (рис. 10,б), можно сократить длительность испытаний примерно в 2 раза. При этом длительность цикла составит 13,2 мин, а их общее число — 5860.

**Пример 2.** Примером сокращения длительности испытаний варьированием очередности видов нагружения являются испытания образцов из сплава ЖС6-К.

Схема нагружения «высокая — низкая» (рис. 11,а) оказывает более сильное влияние на термоусталость по сравнению со схемой нагружения «низкая-высокая» (рис. 11,б), что позволяет сократить длительность испытаний в 2 раза.

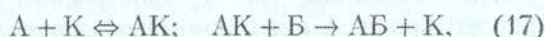
### 6. ИСПЫТАНИЯ В ЭКВИВАЛЕНТНЫХ РАБОЧИХ И ОКРУЖАЮЩИХ СРЕДАХ

Практическая реализация данного метода обеспечивается:

- введением в процессы расходования ресурса катализаторов;
- заменой одной среды на другую.

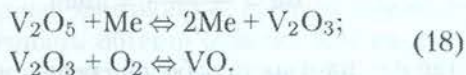
Введение в процессы расходования ресурса катализаторов позволяет существенно увеличить скорость протекания реакций.

Простейшая реакция  $A + B \rightarrow AB$  в присутствии катализатора К имеет вид:



т. е. в начале исходное вещество А реагирует с катализатором К.

Так, например, известно [11], что лопатки газотурбинных установок, эксплуатируемых на дизельном топливе, подвержены ванадиевой коррозии. По данным различных авторов скорость окисления сплавов и сталей по причине каталитического воздействия  $V_2O_5$  увеличивается от нескольких десятков до нескольких сотен раз:



Для авиационных двигателей, работающих на керосине, интенсификация процесса газовой коррозии возможна введением ванадия в топливо или предварительным «разупрочнением» лопаток турбины в ванадиевой золе.

Газовая коррозия под влиянием окислов ванадия, в свою очередь, значительно усиливается в присутствии соединений натрия. Считают, что натрий образует с окислами ванадия низкоплавкие ванадаты  $NaVO_3$ ,  $Na_3V_2O_7$ ,  $Na_3VO_4$ , а также комплексы ванадия — ванадаты  $Na_2OV_2O_5 \cdot 5H_2O$ , плавящиеся при 898 К. Эти соединения могут играть роль



активизирующих присадок, ускоряющих процесс коррозии за счет применения:

- активаторов, т. е. веществ, которые не являясь катализаторами, усиливают действие катализатора;

- автокаталитических (или самоускоряющихся) реакций, т. е. реакций, на ускорение которых оказывают каталитическое воздействие получаемые в реакциях продукты.

При определенных условиях сокращение длительности испытаний достигается заменой одной среды на другую.

Обычно используемый при испытаниях на герметичность гидравлических систем метод подачи в систему рабочей жидкости вызывает много трудностей как технического, так и организационного характера, особенно в случаях, когда рабочей средой являются токсичные, либо взрывоопасные жидкости. Поэтому в практике производства таких систем испытания на герметичность с помощью жидких рабочих сред заменяют на испытания воздухом. При этом, естественно, возникает задача определения параметров модельной среды, которые были бы по своему воздействию на процесс разгерметизации эквивалентны реальным условиям. Так, в судостроении накоплен большой опыт применения воздушных испытаний вместо гидравлических. При таких испытаниях рекомендуют, чтобы давление воздуха  $P_B$  было равно 0,25 от давления жидкости  $P_{ж}$ , т. е.

$$P_B \cong 0,25P_{ж} \text{ для } P_{ж} < 16 \cdot 10^5 \text{ Па.} \quad (19)$$

Эффективным способом решения таких задач является применение методов подобия: исследуемые процессы подобны, если критерий Рейнольдса постоянен:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} = idem, \quad (20)$$

где  $\rho$  — плотность рабочей среды;  $u$  — средняя скорость течения;  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости;  $d$  — средний размер неплотности.

Применяемые в промышленности рабочие давления обычно таковы, что процесс истечения воздуха закритический. Поэтому массовую скорость движения воздуха можно определить по формуле

$$\rho_B u_B = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2k-1}} \sqrt{k P_B \rho_B}, \quad (21)$$

где  $\rho_B$  и  $u_B$  — плотность и скорость истечения воздуха;  $k$  — показатель адиабаты;  $P_B$  — давление воздуха.

Преобразуя (21) можно получить:

$$Re_B = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2k-1}} P_B \sqrt{\frac{k \rho_a}{P_a}} \cdot \frac{d_B}{\mu_B}. \quad (22)$$

Полагая, что процессы разгерметизации должны быть подобны при испытаниях с общими рабочими средами, давление воздуха, обеспечивающее подобие процессов разгерметизации (а следовательно, и эквивалентность воздушных испытаний гидравлическим) составит  $Re_{ж} = Re_B$  или

$$\frac{\rho_{ж} \cdot d_{ж}^3 (P_{ж} - P_a)}{32 \mu_{ж}^2 l} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2k-1}} P_B \sqrt{\frac{k \rho_a}{P_a}} \frac{d_B}{\mu_B}. \quad (23)$$

**Пример 1.** По данным П. Р. Лившица, испытания на износостойкость в среде с повышенным содержанием кислорода щеток генератора постоянного тока, изготовленных из графита АГ-1500, позволяют сократить их длительность в  $\sim 11$  раз.

**Пример 2.** По данным Р. Ш. Поршлица, испытания на износостойкость гидроагрегата путем замены рабочей жидкости АМГ-10 на сжатый воздух позволяют в 1,7 раз сократить длительность испытаний клапана, изготовленного из стали 30ХГСА, и в 2,2 раза — клапана, изготовленного из дюралюминия, в то время как форсирование температуры (на 90... 120°C) сокращает длительность испытаний стальных клапанов в 1,1 и дюралюминиевых — в 1,2 раза.

**Пример 3.** По данным А. Г. Запорожца и других авторов, воздействие газовой среды с повышенной концентрацией водорода (до 20% при нормальном атмосферном давлении и температуре +125°C) приводит к ряду эффектов, эквивалентных воздействию жидких сред на негерметичные интегральные схемы: образованию твердых растворов с Ag, Mo, Pt и др., созданию псевдогидридов с Ti, V, Pd и др., растрескиванию подложек и т. п.

## 7. ИСПЫТАНИЯ НА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ НАГРУЗКАХ

Моделирование нагружения может проводиться как непосредственным воспроизведением эксплуатационного вида нагружения, так и другими видами нагружения, удовлетворяющих принципу эквивалентности внешних воздействий.

В процессе эксплуатации во время взлета и посадки самолетов, стрельбе из орудий, резком торможении и др. наблюдаются ударные



нагрузки. Воздействие ударных нагрузок моделируется:

- передачей испытываемому изделию равной (или более высокой) энергии за счет соответствующего выбора длительности, ускорения или числа ударов;

- вибрационным воздействием на резонансной частоте с энергией, равной энергии эксплуатационного воздействия;

- воздействием линейного ускорения, значение и длительность которого равны ускорению при ударе.

Моделирование ударных нагрузок проводят с помощью одиночных и многократных ударов.

В некоторых случаях ударные нагрузки моделируются с помощью:

- термоударов, например, путем излучения импульсного лазера большой мощности;

- термоциклов.

**Пример.** При оценке работоспособности масла моделирование влияния на него механических нагрузок возможно за счет воздействия облучением (известно, например [14], что облучение масла в  $10^6$  и  $10^7$  рад эквивалентно воздействию удельной механической энергии потока жидкости соответственно в 100 и 1000 кДж/см<sup>2</sup>).

Моделирование воздействий, вызывающих повышение температуры, может осуществляться нагревом, в том числе — излучением лазера или созданием эквивалентных деформаций механическими воздействиями. Критерием эквивалентности моделирующего воздействия является соответствующее изменение свойств материалов и характеристик изделия.

Тепловое старение ускоряется:

- облучением материала ультрафиолетовыми лучами;

- воздействием электрического поля;

- механическим нагружением.

Моделирование воздействий, вызывающих понижение температуры, осуществляется охлаждением (обдувом, хладоагентами), а также испарением или сублимацией компонентов. Критерием эквивалентности воздействия является появление ломкости, отслаивания, выпадения росы и другие эффекты.

## 8. УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН ГТД НА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНУЮ ГАЗОВУЮ КОРРОЗИЮ

В настоящее время методы испытаний лопаток на механическое воздействие достаточно полно изучены и широко при-

меняются на практике. Малоисследованными и требующими своего экспериментально-теоретического обоснования являются испытания лопаток на коррозионную долговечность.

Вызывая поверхностное повреждение материала лопаток газовых турбин, сульфидно-оксидная коррозия оказывает существенное влияние на скорость развития в нем трещин и скорость протекания пластической деформации при высокой температуре. Ускоряющее влияние коррозионной среды на эти процессы приводит к преждевременным разрушениям как при статическом, так и при циклическом нагружении.

По данным [15] коррозионное влияние среды на материал, находящийся под длительным действием статических напряжений, приводит к снижению длительной прочности и тем больше, чем больше временной интервал нагрузки.

Исследование длительной прочности сплава ЖС6-К показывает, что если в воздушной среде энергия активации равна 553 кДж/моль, то в золе газотурбинного топлива она равна 262 кДж/моль. Это объясняется тем, что разрыв связей между атомами сплава ЖС6-К под действием коррозионно-активной среды происходит гораздо легче, чем в воздушной среде.

Сульфидно-оксидная коррозия материалов вызывает, наряду с уменьшением их долговечности под постоянной нагрузкой, увеличение скорости пластической деформации. Ползучесть в коррозионной среде происходит с большей скоростью на установившейся ее стадии (во втором периоде). Это влияние увеличивается при понижении напряжения и повышении температуры.

Влияние коррозионных сред на усталостную прочность обычно больше, чем на длительную прочность.

Коррозионная среда влияет как на многоцикловую, так и на малоцикловую прочность.

**Пример.** Исследования, проведенные в работах [5, 16], позволили предложить ускоренный метод оценки коррозионной стойкости образцов лопаток турбин, обеспечивающий получение слоя, эквивалентного эксплуатационному по толщине, содержанию легирующих элементов и фазовому составу.

Последовательность обработки образцов лопаток в данном методе сводится к следующему (рис. 12):

- на первом этапе вытравливанием в электролите имитируется выгорание легирующих элементов, характерное для эксплуатационных условий;



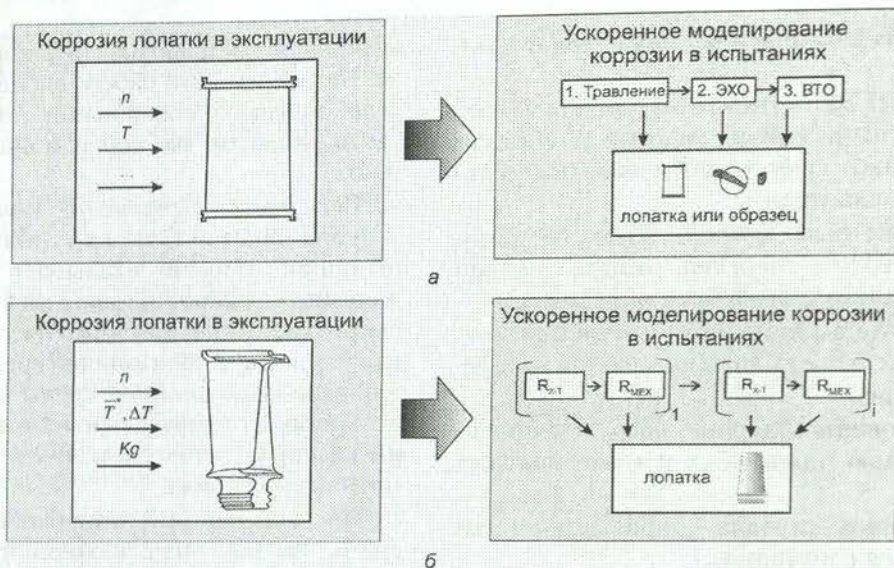


Рис. 12. Последовательность испытаний лопатки: а — сопловой; б — рабочей.  $R_{тр}$  — травление лопатки в электролите;  $R_{эхо}$  — электрохимическая обработка (ЭХО);  $R_{вго}$  — высокотемпературная обработка в среде агрессивных газов;  $R_{х-т}$  — химико-термическая обработка;  $R_{мех}$  — механическая обработка на стенде

- на втором этапе электрохимической анодной обработкой (ЭХО) в электролите насыщается поверхностный слой серой и образуется пленка, содержащая оксиды Ni, Cr, Al (в дальнейшем это позволяет при нагреве образца обеспечить образование легкоплавких сульфидов на нижнем коррозионном слое);

- на третьем этапе проводится нагрев образца в печи при высокой температуре в атмосфере агрессивных газов  $CO_2$ , CO,  $SO_2$ , полученных разложением солей  $MgCO_3$ ,  $Na_2SO_4$  (этим ускоренно воспроизводится газовая коррозия поверхности образца);

- на четвертом этапе проводится имитация нагарообразования путем нагрева образца, на поверхность которого нанесены тяжелые углеводородные нагарообразующие фракции;

- на пятом этапе (при испытании рабочих лопаток) проводится имитация механического нагружения.

Процесс выгорания легирующих компонентов имитируется химическим путем, позволяющим целенаправленно перераспределять или выводить легирующие компоненты из поверхностного слоя лопатки.

Формирование окисленного поверхностного слоя проводится электрохимическим методом в гальваностатическом режиме.

Формирование коррозионного слоя, эквивалентного эксплуатационному по фазовому составу, обеспечивается высокотемпературным воздействием на образец никелевого сплава.

Моделирование нагарообразования проводится в случае проявления его в условиях эксплуатации, путем нанесения тяжелых нагарообразующих фракций нефтяных углеводородов на поверхность образца и дальнейшим нагревом в тигле

Имитация действия механических нагрузок проводится при комплексном моделировании процессов расходования ресурса рабочих лопаток турбин.

## 9. КОМПЛЕКСНЫЕ УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН НА НАДЕЖНОСТЬ И РЕСУРС

Полная проверка надежности лопаток турбин достигается воспроизведением в испытаниях повреждаемости от действия статических, циклических, повторно-статических, усталостных нагрузок, а также газовой коррозии.

**Пример.** Испытаниям подвергаются лопатки, установленные непосредственно на двигателе.

Каждый цикл нагружения лопаток проводят при форсированной температуре газа перед турбиной.

Катализатор в испытаниях подают путем искусственного повышения концентрации серы в топливе до 1,5 ... 2,0%, а подачу на поверхность лопаток 10% раствора хлористого натрия осуществляют при холодной прокрутке двигателя через специальные форсунки, питаемые от отдельной емкости.

Повышение процентного содержания серы в топливе до 1,5 ... 2,0% наиболее эффективно [17] и не изменяет физической природы процесса, а добавление в тракт двигателя хлористого натрия ускоряет «холодную» коррозию лопаток.

Испытания проводят при повышенной, по сравнению с эксплуатационной, температуре газа перед турбиной, что значительно ускоряет процесс разрушения лопаток.



Принципиальная схема подачи хлористого натрия на рабочие лопатки турбины в процессе его холодной прокрутки двигателя приведена на рис. 13.

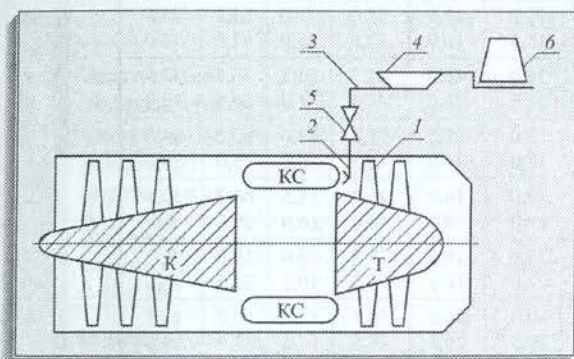


Рис. 13. Схема подачи катализатора коррозии на рабочие лопатки турбины в процессе испытаний двигателя: 1 — исследуемая лопатка; 2 — распылительные форсунки; 3 — соединительные трубопроводы; 4 — насос; 5 — кран; 6 — емкость; К — компрессор; КС — камера сгорания; Т — турбина

### 10. КОСВЕННАЯ ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Сокращение длительности испытаний в данном случае достигается за счет косвенной оценки долговечности (ресурса) на основании корреляционной связи между долговечностью и параметрами, определение которых требует, по сравнению с долговечностью, меньше времени:

$$P[P_0, R(\tau), \tau] = F(C_1, \dots, C_K), \quad (24)$$

где  $C_i$  — параметр, косвенно определяющий долговечность.

**Пример 1.** При оценке малоциклового прочностного ресурса (в интервале до  $5 \cdot 10^4 \dots 10^5$  циклов) используется корреляционная связь между числом циклов до разрушения  $N^*$ , прочностью  $\sigma_b$ , пластичностью  $\psi$  и деформацией  $\varepsilon$  [19]:

$$\varepsilon = BN^{*-0,12} + D^{-0,16} N^{*-0,6}, \quad (25)$$

$$B = \frac{3,5\sigma_b}{E}; \quad D = \ln \frac{1}{1-\psi}.$$

**Пример 2.** В случае оценки абразивной износостойкости закаленных сталей используется ее связь с энергоемкостью  $E_{ст}$  и твердостью  $HV$  [20]:

$$I = F(E_{ст}, HV). \quad (26)$$

**Пример 3.** По данным А. А. Маталова косвенная оценка предела выносливости  $\sigma_r$  проводится по остаточному напряжению  $\sigma_0$ :

$$\sigma_r = A - B\sigma_0, \quad (27)$$

где  $A, B$  — коэффициенты, зависящие от материала.

**Пример 4.** Предел контактной выносливости зубьев (при вероятности безотказной работы 90%), изготовленных из легированной стали  $HV \leq 3500$  МПа), определяется по формуле

$$\sigma_{гк} = (0,6\sigma_b - 90)/R, \quad (28)$$

где  $R$  — коэффициент, учитывающий влияние на значение определяемых напряжений погрешностей механической и термической обработки (при отсутствии погрешностей  $R = 1,0$ ).

В некоторых случаях при расчете на прочность и долговечность требуется проведение оценки сопротивления конструкции хрупкому разрушению. Оценка проводится по критическому коэффициенту интенсивности напряжений при плоской деформации  $K_{1c}$ .

Определение параметра  $K_{1c}$  является трудоемким процессом (потребность в уникальном испытательном оборудовании, трудности нанесения на образец надреза, фиксирование момента достижения трещиной критической длины и др.), поэтому на практике стремятся заменить экспериментальное определение вязкости разрушения эквивалентными значениями, определенными на основании корреляционных зависимостей между  $K_{1c}$  и стандартными механическими характеристиками материалов.

Для сталей и сплавов обычного качества

$$K_{1c} = a_n f(\sigma_{0,2}; a_n; \sigma_{0,2}). \quad (29)$$

По формулам вида (29) можно приближенно оценить значение  $K_{1c}$  для широкого круга материалов с точностью, достаточной для инженерных расчетов, не прибегая к дорогостоящим испытаниям на вязкость разрушения.

Исследования на малоцикловую усталость титановых сплавов (ВТЗ-1, ВТ-8, ВТ-9, ВТ-18, ВТ-25), проведенные Р. К. Сизовой и Н. П. Вильтером, показали, что при циклическом нагружении в качестве показателя работоспособности дисков из титановых сплавов в зонах концентрации напряжений могут быть использованы результаты испытаний на кратковременный разрыв образцов с надрезом (с определением параметров  $\sigma_{в.над}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\psi_{над}$ ) и гладких образцов при циклическом нагружении в течение 5–10 циклов (с определением диаграммы деформирования).

Особый интерес в плане разработки ускоренных методов оценки длительной прочности представляет ее связь с пределом прочности  $\sigma_b$ .



Таблица 2

Материал	$T_{исп},$ °C	$T_{исп},$ °	$\sigma_{100},$ кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{1000},$ кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{10000},$ кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{100000},$ кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{в},$ кг/мм <sup>2</sup>	$\delta,$ %	$\psi,$ %	$a,$ кг/см <sup>2</sup>
ЭИ695	650	0,550	27,5	19,0	14,0	10,0	39,5	33,5	58,0	33,0
ЭИ695Р	650	0,550	27,5	22,5	16,0	12,0	39,5	28,5	55,5	27,5
ЭИ724	600	0,519	26,0	20,0	15,2	11,8	38,0	31,0	59,5	28,0
Х18Н9Т	600	0,512	28,0	20,0	15,5	10,0	37,5	33,0	62,5	28,0
1Х12ВНМФ	565	0,749	27,0	23,0	19,0	16,0	43,2	26,2	76,7	12,5
15Х12ВМФ	580	0,480	29,0	22,5	18,5	16,0	44,5	21,0	86,0	13,0
30ХМ	500	0,435	32,5	28,0	19,0	13,5	51,0	22,0	80,0	14,5
15Х2М2ФБС	500	0,435	—	—	18,0	16,0	49,5	25,0	75,0	19,5
ЭИ415	550	0,454	29,0	26,0	19,0	14,0	46,4	18,5	68,3	10,1
20ХМФЛ	540	0,459	30,0	26,0	19,0	14,0	44,0	16,0	66,0	8,0
ЭП192	650	0,557	41,5	31,0	23,0	18,0	73,5	16,0	19,0	8,7
ЭП871	650	0,552	37,0	29,0	22,0	16,5	73,0	19,0	22,5	10,5
20ХМ	470	0,419	40,0	35,0	30,0	26,0	45,5	17,0	66,0	13,5
2Х13	450	0,415	39,0	33,0	29,5	26,0	49,5	17,5	57,0	24,0
Сталь 20	475	0,413	—	12,3	8,5	6,0	29,0	27,5	85,0	7,5
ТВ10	1100	0,418	—	11,0	7,5	—	27,0	27,0	85,0	—

В работе [18] предложено оценку длительных механических характеристик проводить по кратковременным характеристикам через функциональную связь вида

$$f(\sigma_{в})f(\delta, \psi, a) = P \sim \sigma_{т}, \quad (30)$$

где  $\delta$  — относительное удлинение образца после разрушения;  $\psi$  — относительное сужение после удлинения;  $a$  — ударная вязкость;  $P$  — прочностной параметр;  $\sigma_{в}, \sigma_{т}$  — предел прочности и длительная прочность.

Другим примером метода косвенной оценки ресурса является аналоговый способ оценки характеристик прочности тугоплавких металлов, полученный на основе анализа результатов испытаний жаропрочных материалов [18]. Согласно данному способу, характеристики прочности двух металлов с идентичным типом кристаллической решетки, при равных относительных (гомологических) температурах, пределах прочности  $\sigma_{в}$ , характеристиках относительного удлинения  $\delta$  и сужения  $\psi$  после разрушения, ударной вязкости  $a$ , близки по абсолютной величине.

Прогнозирование свойств осуществляется следующим образом: для заданного материала определяются кратковременные механические характеристики, затем (например, по справочной литературе) определяется аналог, т.е. материал с идентичным типом кристаллической решетки, имеющий при сопоставимой температуре такие же значения кратковременных механических характеристик прочности  $\sigma_{в}$ , относительного удлинения  $\delta$  и сужения после разрушения  $\psi$ , удар-

ной вязкости  $a$  и экспериментально установленное значение  $\sigma_{т}$ , которое и будет искомым для исследуемого материала.

**Пример.** В табл.2 попарно приведены материалы, которые при идентичных гомологической температуре и типе кристаллической решетки имеют близкие кратковременные механические характеристики и длительную прочность.

#### 11. СОВМЕСТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НЕСКОЛЬКИХ МЕТОДОВ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

«Разделяй и властвуй» — мудрое правило, но «объединяй и направляй» — еще лучше.

Гете, XVIII–XIX вв.

В данном случае проведение испытаний основано на совмещении в одних испытаниях одновременно нескольких методов сокращения длительности, например:

- испытания с форсированием режима и применением катализатора процесса расходования ресурса;

- оценка ускоренными испытаниями параметров, косвенно характеризующих долговечность.

**Пример.** Ресурс рабочих лопаток турбины стационарного газотурбинной установки характеризуется статической и циклической прочностью и равен 30 тыс. час. Материал лопаток — сплав ЖС6-К

Известно, что испытания с форсированием относительно номинальной температуры газа перед турбиной  $T_{г}^*$  до 1316 К ( $T_{л} = 1213$  К, где  $T_{л}$  — температура лопатки) позволяют сократить их длительность в 5,4 раза (строка 5 табл. 3).



Таблица 3

Вид испытаний	Параметры нагружения												Повреждаемость		$K_y$
	$T_{min}$ K	$T_{max}$ K	$T^r_{max}$ K	$T^{r^2}_{max}$ K	$\sigma_{min}$ МПа	$\sigma_{max}$ МПа	$\sigma^r_{max}$ МПа	$\sigma^{r^2}_{max}$ МПа	$\sigma^{r^3}_{max}$ МПа	$\tau$ с	$N$ —	$K_S$ %	$P_r$	$P_d$	
Эксплуатационные испытания	473	1213	1068	—	-466	299	178	—	—	300	2500	0,03	0,13	0,03	1,0
увеличение доли циклических нагрузок (метод А)	473	1213	1068	—	-466	299	178	—	—	1765	8131	0,03	0,08	0,08	1,7
Введение в топливо серы (метод Б)	473	1213	1068	—	-466	299	178	—	—	1071	910	2,0	0,13	0,03	2,8
Реализация методов А и Б	473	1213	1068	—	-466	299	178	—	—	667	2959	2,0	0,08	0,08	4,5
Форсирование температуры (метод В)	473	1213	—	1118	-466	299	—	216	337	556	2500	0,03	0,13	0,03	5,4
Реализация методов А, Б, В	473	1213	—	1118	-466	299	—	216	337	159	2959	2,0	0,08	0,08	19

Требуется оценить возможность ускоренной проверки надежности лопаток на ресурс 50 тыс. часов при условии, что длительность испытаний не должна превышать 4-х месяцев.

Совместная реализация испытаний с форсированием температуры газа перед турбиной, увеличением доли циклических нагрузок и введением в топливо серы обеспечивает сокращение длительности испытаний в 19 раз, т.е. проверка 50-тысячного ресурса лопаток проводится за 2632 часа или 3,7 месяца.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Очевидно, что научно обоснованные и хорошо организованные ускоренные испытания являются залогом успеха и удовлетворения требованиям по надежности и ресурсу выпускаемых изделий, затрачивая при этом минимум временных и материальных затрат.

2. Роль ускоренных испытаний возрастает при переходе изделий на эксплуатацию «по состоянию», поскольку для перехода на такой метод эксплуатации одним из основных требований является обеспечение высокого технического ресурса изделия, подтвержденного специальными, периодическими и ускоренными испытаниями.

3. Рассмотренные методы сокращения длительности испытаний применимы к методам ускоренных испытаний, рассмотренным ранее в работах [21, 22, 23]. Применение конкретного из перечисленных в статье методов

ускоренных испытаний зависит от многих факторов: сложности и степени ответственности конструкции, ее стоимости, степени изученности процессов расходования ресурса, возможностей испытательного оборудования, вида задач, решаемых при испытании и других факторов.

4. Следует отметить, что несмотря на успехи, достигнутые в ряде направлений, большой объем и глубину многих исследований, проблема ускоренных испытаний по-прежнему остается весьма сложной и требует решения целого ряда комплексных задач, исследование которых проводится в математическом, физическом и инженерно-техническом аспектах. Решение этих вопросов значительно осложнено тем, что эксплуатация современных сложных технических систем характеризуется большим разнообразием условий применения, широким диапазоном рабочих режимов, динамическими нагрузками на элементы, разнообразием условий окружающей среды и многими другими факторами, определяющими их надежность и ресурс.

5. Очевидно, что эта статья есть не более чем краткий путеводитель по идеям ускоренной оценки надежности и ресурса технических систем, и, возможно, не каждый найдет в ней прямой ответ на свой «профессиональный» вопрос. Однако *sapienti sat* (мудрому достаточно! — лат.).



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гишваров, А. С.** Теория ускоренных ресурсных испытаний технических систем / А. С. Гишваров. Уфа: Гилем, 2000. 338 с.
2. **Гишваров, А. С.** Совмещенные ресурсные испытания технических систем / А. С. Гишваров. Уфа: Гилем, 2002. 268 с.
3. **Гишваров, А. С.** Оптимизация ресурсных испытаний технических систем имитационным моделированием жизненного цикла / А. С. Гишваров. Уфа: Гилем, 2005. 328 с.
4. **Гишваров, А. С.** Многокритериальное планирование эксперимента при исследовании технических систем / А. С. Гишваров. Уфа: Гилем, 2006. 305 с.
5. **Гишваров, А. С.** Ускоренное моделирование высокотемпературной газовой коррозии лопаток турбин ГТД / А. С. Гишваров, М. Н. Давыдов // Вестник УГАТУ. Уфа: УГАТУ, 2006. Т. 3. С. 51–60.
6. **Гишваров, А. С.** Оптимальное планирование экспериментов в задачах прогнозирования надежности ГТД / А. С. Гишваров // Проблемы машиноведения, конструкционных материалов и технологий: сб. тр. АН РБ. Уфа: Гилем, 1997.
7. **Гишваров, А. С.** Ускоренные испытания авиационных ГТД с применением метода «разупрочнения» / А. С. Гишваров, И. Х. Бадамшин // Изв. вузов. Авиационная техника. Казань, 1985. № 1.
8. **Веников, В. А.** Теория подобия и моделирования / В. А. Веников. М.: Высшая школа, 1976. 480 с.
9. **Чичинадзе, А. В.** Расчет, испытание и подбор фрикционных пар / А. В. Чичинадзе, Э. Ф. Браун, А. Г. Гинзбург, З. В. Игнатьева. М.: Наука, 1979. 267 с.
10. **Гишваров, А. С.** Ускоренные испытания ГТД методом замены материала / А. С. Гишваров, И. Х. Бадамшин, А. М. Смыслов // Испытания авиационных двигателей. Уфа, 1984. № 12.
11. **Гецов, Л. Б.** Детали газовых турбин: материалы и прочность / Л. Б. Гецов. Л.: Машиностроение, 1982. 296 с.
12. **Шалин, Р. Е.** Жаропрочные сплавы для газовых турбин / под ред. Р. Е. Шалина. М.: Металлургия, 1981. 320 с.
13. **Трунин, И. И.** Оценка длительной прочности материалов с большими сроками службы / И. И. Трунин // Надежность и контроль качества. 1970. № 12. С. 50–57.
14. **Кондаков, Л. А.** Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем / Л. А. Кондаков. М.: Машиностроение, 1982. 216 с.
15. **Никитин, В. И.** Коррозия и защита лопаток газовых турбин / В. И. Никитин. Л.: Машиностроение, 1987. 272 с.
16. **Гишваров, А. С.** Повышение эффективности ускоренных коррозионных испытаний лопаток турбин ГТД / А. С. Гишваров, М. П. Давыдов // Вестник СГАУ: сб. науч. тр. Самара: СГАУ, 2006. Т. 2, № 10. С. 189–192.
17. **Третьяченко, Г. Н.** Термическая усталость материалов в условиях неоднородного термонапряженного состояния / Г. Н. Третьяченко, А. В. Кравчук, Р. Н. Курият. Киев: Наук. думка, 1985. 280 с.
18. **Кривенюк, В. В.** Аналоговый способ оценки характеристик длительной прочности турболавок металлов / В. В. Кривенюк // Проблемы прочности. 1980. № 4. С. 64–66.
19. **Серенсен, С. В.** Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность: справ. пособие / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.
20. **Сорокин, Г. М.** Влияние механических характеристик закаленных сталей на их абразивную износостойкость / Г. М. Сорокин, Б. П. Сафонов // Вестник машиностроения. 1983. № 2. С. 38–41.
21. **Гишваров, А. С.** Оптимизация ускоренных испытаний на надежность и ресурс авиационных двигателей и агрегатов / А. С. Гишваров // Вестник УГАТУ. 2001. № 3.
22. **Гишваров, А. С.** Параметрическая оптимизация ресурсных испытаний энергетических установок летательных аппаратов многовариантного применения / А. С. Гишваров // Вестник УГАТУ. 2002. С. 46–66.
23. **Гишваров, А. С.** Оптимизация жизненного цикла авиационных ГТД / А. С. Гишваров // Вестник УГАТУ. 2005. № 1 (12). С. 21–32.

## ОБ АВТОРЕ



**Гишваров Анас Саидович**, проф., зав. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1993). Творст. и эксперим. иссл. в обл. надежности, ресурса и испытания техн. систем.