

Л. В. МОРОЗОВ

г. Запорожье*

Повреждаемость материала лопаток турбин при виброн нагружении

Для обеспечения надежности работы лопаток турбомашин в эксплуатационных условиях, разработки методов форсированных и эквивалентных испытаний, прогнозирования и поиска путей повышения их ресурса важно знать закономерности повреждаемости материала лопаток при этих условиях и, в частности, при переменных режимах нагружения.

Определить эти закономерности в настоящее время, опираясь лишь на физические представления о процессах, приводящих к появлению трещин в материалах и нарушению несущей способности лопаток, не представляется возможным, так как недостаточно изучена физика всего многообразия происходящих в материалах процессов.

В настоящей работе определение повреждаемости материала лопаток турбомашин при переменных режимах нагружения производится разрушающим методом.

В качестве меры накопленного повреждения в материале лопаток или образцов предлагается использовать долговечность, которая получается при знакопеременном механическом нагружении объекта исследования с амплитудой напряжений выше предела усталости.

При этом получаем схему испытаний $E_i \rightarrow G_k$ где E_i — режим предварительного нагружения, для которого исследуются закономерности накопления повреждений, G_k — режим последующего нагружения. Долговечность, получаемая при режиме G_k , определяет состояние материала по накопленному при режиме E_i повреждению.

В качестве режима E_i могут быть приняты эксплуатационный режим, термоциклирование, виброн нагружение и т.п.

В качестве режима G_k важно выбирать наиболее просто реализуемый вид разрушающих испытаний.

Необходимо, чтобы при испытаниях на режиме E_i и $E_i \rightarrow G_k$ места наиболее вероятного появления макротрещин на поверхности объекта испытаний совпадали.

Ниже приведены результаты теоретико-экспериментальных исследований закономерностей накопления повреждений в жаропрочных материалах ЭИ-437Б (лопатки турбины) и ЭИ-437БВД (круглые образцы).

* Запорожский машиностроительный институт.

В рассматриваемом случае режиму E_i соответствовали максимальные переменные напряжения с амплитудой σ_i , возникающие в лопатках и образцах при их колебаниях с собственной частотой по первой изгибной форме. Режиму G_k соответствовали переменные напряжения $\sigma_k > \sigma_i$.

Испытания производились на электродинамических вибростендах типа ВЭДС-800. На подвижный стол электродинамического вибростенда устанавливалась гидравлическая головка, в которой лопатки зажимались по замку, а образцы по месту для зажима с усилием 5000 кг.

Напряженное состояние лопаток и образцов контролировалось по амплитуде колебаний конца пера лопатки и образца с помощью микроскопа с точностью 0,1 мм.

Предварительно было проведено динамическое тензометрирование, в результате которого получена зависимость напряжений в наиболее напряженном месте пера лопатки от амплитуды колебаний конца её пера.

На основании этого было установлено, что режиму E_i для лопаток соответствовали переменные напряжения $\sigma_i = 36,5$ кг/мм², а режиму G_k — переменные напряжения $\sigma_k = 39,5$ кг/мм².

Частоты колебаний образцов ($\bar{f} = 383$ гц) и лопаток ($\bar{f} = 930$ гц) контролировались по частотомеру 43 - 30 с точностью 0,1 гц.

Испытания заканчивались, как только на поверхности галтели образца или на пере лопатки появлялась первая видимая макротрещина.

При проведении испытаний $E_i \rightarrow G_k$ совокупность образцов из материала одной плавки была разбита на j партий. Первая партия образцов ($n_1 = 7$ шт.) была испытана при режиме G_k (размах конца образца при изгибных колебаниях $2A = 2,0$ мм). Каждый образец из второй партии ($n_2 = 10$ шт.) нагружался механическими циклическими

Таблица 1

$$E_i(2A = 1,4 \text{ мм}) \rightarrow G_k(2A = 2,0 \text{ мм})$$

№	n_j [штук]	$\bar{N}_j(E_i)$ [циклов]	$Me\{N(G_k/\bar{N}_j(E_i))\}$ [циклов]
1	7	0	384400
2	10	45708	76230
3	11	91752	365900
4	11	137592	381100
5	9	213920	155500
6	8	309582	342800
7	8	412668	321800
8	8	698511	129300
9	8	2330000	0

нагрузками (режим E_i , $2A = 1,4$ мм) в течение одинакового времени $\tau_{ijr} = \tau_{2r}(E_i)$ и имел число циклов нагружения

$$N_{2r}(E_i) = \tau_{2r}(E_i) f_{i2r},$$

где f_{i2r} — частота собственных изгибных колебаний r -го образца из второй партии

при режиме E_i , а затем испытывался при режиме G_k ($2A = 2,0$ мм) до появления первой макротрещины в течение времени $\tau_{2r}(G_k/\tau_{2r}(E_i))$ или числа циклов

$$N_{2r}(G_k/\tau_{2r}(E_i)) = \tau_{2r}(G_k/\tau_{2r}(E_i)) f_{k2r}.$$

Аналогично проводились испытания для остальных партий данной совокупности образцов.

В связи с имеющимся разбросом долговечности образцов при режимах испытаний $E_i \rightarrow G_k$, $E_i \rightarrow G_k$ для каждой партии были определены средние значения числа циклов $\bar{N}_j(E_i)$ нагружения при режиме E_i и медианные значения долговечности образцов $Me\{N(G_k/\bar{N}_j(E_i))\}$.

Таблица 2

$$E_i (\sigma_i = 36,5 \text{ кг/мм}^2) \rightarrow G_k (\sigma_k = 39,5 \text{ кг/мм}^2)$$

№	n_j [штук]	$\bar{N}_j(E_i)$ [циклов]	$Me\{N(G_k/\bar{N}_j(E_i))\}$ [циклов]
1	37	0	584300
2	5	57000	522400
3	15	111600	799300
4	10	283500	631000
5	17	546000	451500
6	27	1123000	0

Эти характеристики долговечности и количество образцов в каждой партии приведены в таблице 1.

Для лопаток турбины испытания по схеме $E_i \rightarrow G_k$ и обработка результатов эксперимента проводились аналогично тому, как это делалось для образцов.

В таблице 2 приведены данные по количеству лопаток в каждой партии, средним значениям числа циклов предварительного нагружения и медианные значения долговечности.

Изменение медианных значений долговечности образцов и лопаток $Me\{N(G_k/\bar{N}_j(E_i))\}$ в зависимости от средних значений числа циклов, нарабатываемых той или иной партией при режиме E_i показаны на рис. 1 и 2.

Для описания закономерностей накопления повреждений при рассматриваемой схеме нагружения предлагается следующая математическая модель.

Принимая за отказ событие, заключающееся в появлении первой макротрещины на поверхности исследуемого объекта, для испытания, проводимого по схеме $E_i \rightarrow G_k$, можем записать вероятность того, что данное событие не наступит в виде

$$P(A_1 A_2) = P(A_1) P(A_2/A_1) = \exp\left\{-\int_0^{t_j} \lambda_1(x) dx\right\} \exp\left\{-\int_{t_j}^{t_j+t_e} \lambda_2(x, t_j) dx\right\}, \quad (1)$$

где A_1 — событие отсутствия отказа при режиме E_i за время t_j , A_2 — событие отсутствия отказа при режиме G_k , $\lambda(z)$ — условная плотность вероятности наступления отказа в момент времени z при условии, что до момента z отказ не произойдет.

Представим $\lambda_1(x)$ и $\lambda_2(x, t_j)$ в виде суммы членов, отражающих общую тенденцию в изменении накопленного повреждения при независимой схеме накопления

повреждений и членов, учитывающих зависимость, взаимодействие элементарных актов накопления повреждений, а также учитывающих возможные структурные изменения

$$\lambda_1(x) = C_1 + \Psi_1(x), \quad (2)$$

$$\lambda_2(x, t_j) = C_2 + \Psi_2(x, t_j). \quad (3)$$

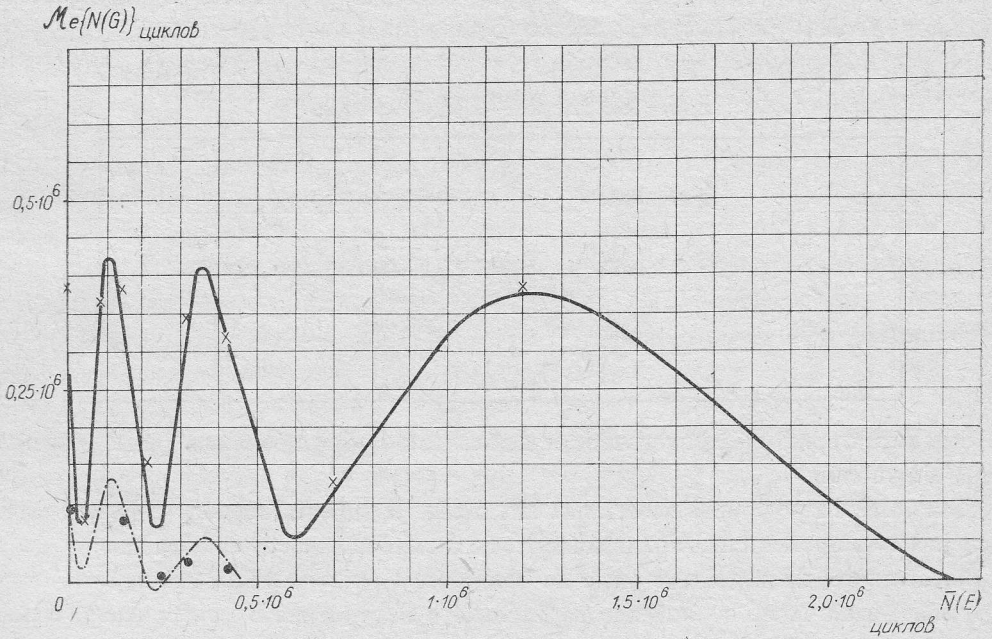


Рис. 1. Кривая изменения $Me\{N(G_k|\bar{N}_j(E_i))\}$ в зависимости от $\bar{N}_j(E)$ для круглых образцов

Можем (1) для средней долговечности \bar{T}_0 с учетом (2) и (3) записать в виде

$$\exp\{-\bar{\lambda}_0 \bar{T}_0\} = \exp\left\{-\int_0^{\bar{t}_j(E_i)} (C_1 + \Psi_1(x)) dx\right\} \times \\ \times \exp\left\{-\int_{\bar{t}_j(E_i)}^{\bar{t}_j(E_i) + Me\{t(G_k|\bar{t}_j(E_i))\}} (C_2 + \Psi_2(x, \bar{t}_j(E_i))) dx\right\}. \quad (4)$$

Если нелинейные члены приравнять нулю, то из (4) получаем линейное уравнение линии равных условных вероятностей в виде

$$Me\{t(G_k|\bar{t}_j(E_i))\} = Me\{T(G_k)\} - \frac{Me\{T(G_k)\}}{Me\{T(E_i)\}} \bar{t}_j(E_i),$$

так что

$$C_1 = \frac{1}{Me\{T(E_i)\}}, \quad C_2 = \frac{1}{Me\{T(G_k)\}},$$

где $Me\{T(G_k)\}$ — медианное значение долговечности изделий при режиме испытаний G_k , $Me\{T(E_i)\}$ — медианное значение долговечности изделий при режиме испытаний E_i , $Me\{t(G_k|\bar{t}_j(E_i))\}$ — медианное значение долговечности изделий при G_k после работы их при E_i в течение \bar{t}_j .

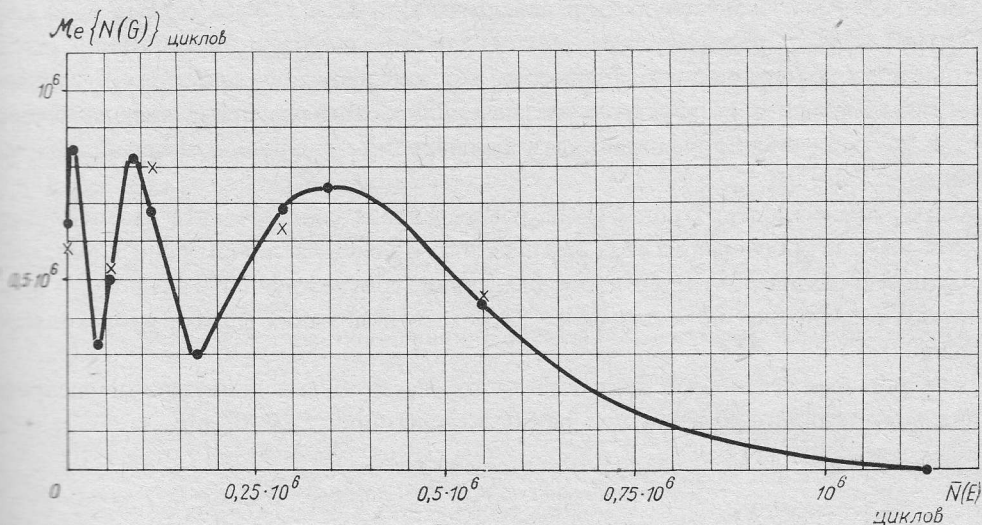


Рис. 2. Кривая изменения $Me\{N(G_k|\bar{N}_j(E_i))\}$ в зависимости от $\bar{N}(E_i)$ для лопаток турбины

Найти аналитически выражение для нелинейных членов уравнения (1) в настоящее время не представляется возможным.

В то же время, экспериментальные исследования показали, что кривые плотности распределения времени отказов, функции интенсивности отказов $\lambda_1(x)$ и $\lambda_2(x, t_j)$, полученные по результатам испытаний при E_i , G_k , $E_i \rightarrow G_k$ имеют квазипериодический характер, что позволило автору нелинейное уравнение линии равных основных вероятностей представить в виде

$$Me\{t(G_k|\bar{t}_j(E_i))\} = Me\{T(G_k)\} - \frac{Me\{T(G_k)\}}{Me\{T(E_i)\}} \bar{t}_j(E_i) - \varepsilon Me\{T(G_k)\} \cos\{\pi\varphi(\bar{t}_j(E_i))\}, \quad (5)$$

где $\varphi(\bar{t}_j(E_i))$ — функция, определяющая замедление процесса накопления повреждений с течением времени, ε — масштабный коэффициент.

На рисунках 1 и 2 показаны кривые, найденные при аппроксимации результатов испытаний уравнением типа (5). Для примера, уравнение кривой (рис. 1) имеет

вид:

$$Me\{N(G_k/\bar{N}_j(E_i))\} = 534242 - 0,495\bar{N}_j(E_i) + 217750 \left\{ 1 + \cos \pi \left(6,433 - \frac{\bar{N}_j(E_i)}{21662 + 0,163\bar{N}_j(E_i)} \right) \right\}. \quad (6)$$

В таблице 3 приведены результаты экспериментов для лопаток турбины и результаты аппроксимации уравнением (6).

Линейная аппроксимация, аппроксимация полиномами Чебышева дают худшие результаты в смысле минимума среднеквадратичной ошибки.

Наблюдаемые закономерности в поведении кривых $Me\{N(G_k/\bar{N}_j(E_i))\} = f(\bar{N}_j(E_i))$ вероятней всего определяются стохастическим характером с определенной направленностью протекания таких процессов, как тренировка, приводящая к упрочнению, локальный износ структуры, вызывающий общее разупрочнение, выделение, рост и растворение упрочняющих фаз, активируемые микропластической деформацией.

Определение вероятностного закона распределения долговечности изделий важно не только для обоснования вида нелинейного уравнения линии равных условных вероятностей и для получения подобных линий, соответствующих различным вероятностям разрушения, но и для более глубокого понимания физики происходящих явлений.

Автором был установлен факт о немонотонности функции плотности распределения долговечности изделий при режимах испытаний E_i и $G_k \rightarrow E_i$.

Таблица 3

$\bar{N}_j(E_i)$ [циклов]	$Me\{N(G_k/\bar{N}_j(E_i))\}$ [циклов] эксперимент. значения	$Me\{N(G_k/\bar{N}_j(E_i))\}$ [циклов] по уравнению (6)
0	573300	653000
57000	522400	511000
110000	799300	685000
283000	631000	688000
546000	451500	432000
1123000	0	0

Для получения функции распределения долговечности изделий рассмотрим математическую модель накопления повреждений, которая бы не противоречила современным физическим представлениям о накоплении повреждений в металлических материалах.

Процесс изменения состояния объекта по накопленному повреждению будем рассматривать как случайный процесс с зависимыми приращениями и с непостоянством накопления повреждений во времени.

Запишем условие отказа в виде

$$M_n(t) = \sum_{i=0}^n \xi_i(t) \geq M,$$

где $\xi_i(t)$ — мера элементарного повреждения привносимого субмикротрещиной в локальном объеме, ответственном за отказ, M — предельный уровень для меры накопленного повреждения, при котором происходит отказ в локальном объеме.

В нашем случае отказу соответствует появление первой макротрещины на поверхности испытываемой детали.

Опираясь на выводы центральной предельной теоремы и, считая, что $\xi_i(t)$ повреждение состоит из большого случайного числа нульмерных и линейных дефектов, можно принять, что $\xi_i(t)$ имеет нормальный закон распределения. С последовательностью $\{\xi_i(t)\}$ связана последовательность $\{t_i(\xi)\}$ таким образом, что повреждению ξ_i соответствует случайная величина $t_i(\xi)$ с неслучайным аргументом ξ и плотностью распределения $h_i(t)$.

Общее время накопления n дефектов для достижения уровня повреждения M_n равно

$$\tau(M_n) = \sum_{i=0}^n t_i(\xi),$$

$\{\tau(M_n); 0 < M_n \leq M\}$ — это обрывающийся случайный процесс. Обрыв происходит, когда $\sum_0^n \xi_i(t) \geq M$.

Рассмотрим поле события A_1 , состоящего в том, что $\tau(M_N) = \sum_0^N t_i(\xi)$ и сопутствующие гипотезы B_i , определяемые как $N = n; \sum_0^n \xi_i(t) \geq M$.

В силу того, что накопление повреждений $\xi_i(t)$ происходит с замедлением в пересекающиеся промежутки времени при взаимодействии дефектов между собой, процесс $\{t_i(\xi)\}$ таков, что

$$t_\nu \cap t_\mu \neq 0 \quad \text{при} \quad \nu \neq \mu.$$

По теореме полной вероятности можно записать

$$P\{\tau(M_N) \leq \tau\} = \sum_0^\infty P\{N = n\} P\left\{\sum_0^n t_i \leq \tau / \sum_0^n \xi_i(t) \geq M\right\}. \tag{7}$$

Представим $\{t_i(\xi)\}$ в виде последовательности $\{z_i\}$ такой, что

$$\begin{aligned} z_1 &= t_1, \\ z_2 &= t_1^* t_2, \\ &\dots \\ z_n &= t_1^* t_2^* \dots t_{n-1}^* t_n, \end{aligned}$$

где t_j^* — есть дополнение к t_j и $(t_j^*)^* = t_j$, тогда (7) можно представить в виде

$$P\{t(M_N) \leq \tau\} = \sum_0^\infty P\{N = n\} P\left\{\sum_0^n z_i \leq \tau / \sum_0^n \xi_i(t) \geq M\right\} = \sum_0^\infty q(n) H(z)^{*n(n)}. \tag{8}$$

Здесь введение функции $\eta(n)$ связано с тем, что распределение времени достижения определенного уровня повреждения зависит не только от разности накопленных повреждений в моменты начала и конца наблюдений, но и от суммарной величины повреждений.

Вид этой функции определяется характером замедления процесса накопления повреждений.

При переходе от $H(z)$ к $H(t)$ необходимо записать:

$$H(z)^{*_{\eta(n)}} = H(t)^{*_{\eta(\psi(n))}}.$$

Здесь $H(z)$ и $H(t)$ безгранично делимые распределения.

Функцию $\psi(n)$ назовем функцией выбора непересекающихся частей пересекающихся интервалов времени накопления определенного уровня повреждения.

Таким образом:

$$P \left\{ \sum_0^n z_i \leq \tau / \sum_0^n \xi_i(t) \geq M \right\} = P \left\{ \sum_0^n t_i \leq \tau / \sum_0^n \xi_i(t) \geq M \right\} = H(t)^{*_{\eta(\psi(n))}}.$$

Определим процесс $\{n\}$ в применении к процессу накопления повреждений в материале в локальном объеме, ответственном за разрушение, воспользовавшись представлениями кинетической теории разрушения.

Атомы в узлах кристаллической решетки совершают колебательные движения. Энергия колебаний распределяется между осцилляторами неравномерно и случайно. При этом с вероятностью Θ может произойти разрыв межатомной связи, что приведет к образованию нульмерного дефекта. При определенных условиях дефекты будут накапливаться.

Если принять, что вероятность разрыва межатомной связи равна Θ , то вероятность разрыва x связей при m осцилляторах будет описываться биномиальным законом распределения

$$q(x) = \binom{m}{x} \Theta^x (1 - \Theta)^{m-x},$$

а так как число осцилляторов огромно и Θ мало, то в предельном переходе получим, что

$$q(x) \rightarrow \frac{(hz_0)^x}{x!} e^{-hz_0} \quad \text{при}$$

$$m \rightarrow \infty, \quad \Theta \rightarrow 0,$$

где

$$m = \frac{h}{\Theta}.$$

Пусть каждый разрыв межатомной связи приносит повреждение $\varepsilon_v(t)$, тогда условие разрушения будет $\sum_0^\infty \varepsilon_v(t) \geq M$.

На самом деле процесс накопления повреждений является весьма сложным и мы можем говорить лишь о некоторых комплексах повреждаемости $\xi_i(t)$, для накопления которых применима выше приведенная модель.

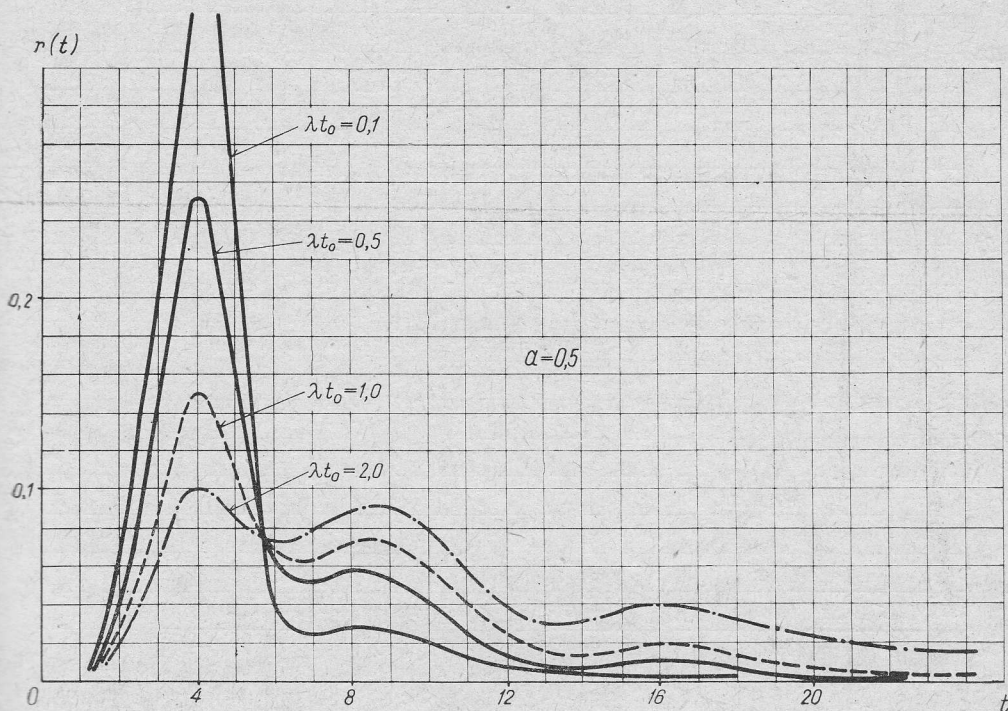


Рис. 3. Кривые плотности распределения $r(t)$ при различных значениях параметра λt_0

Для перехода от модели накопления повреждений в материалах к распределению долговечности объектов допустим укрупнение комплексов повреждаемости до таковых, которые характеризуют собой состояние отказа образца или лопатки.

Если $z \in \Gamma$ и Γ — класс барелевских множеств, то мы можем образовать последовательность $\{Y_i\}$ как новое разбиение множества z , причем

$$y_\nu \cap y_\mu = 0 \quad \text{при} \quad \nu \neq \mu \quad \text{и} \quad j = \psi(n).$$

Увеличивая комплексы поврежденности до таких Ω , что

$$hz_0 = \lambda y_0,$$

где

$$y_0 > z_0, \quad \lambda < h$$

будем иметь

$$\sum_0^j \Omega_s \geq M,$$

$$q(j) = \exp\{-\lambda y_0\} \frac{(\lambda y_0)^j}{j!},$$

где y_0 — соизмеримо с долговечностью лопаток или других испытуемых изделий.

Возвращаясь к (8), запишем функцию плотности распределения долговечности

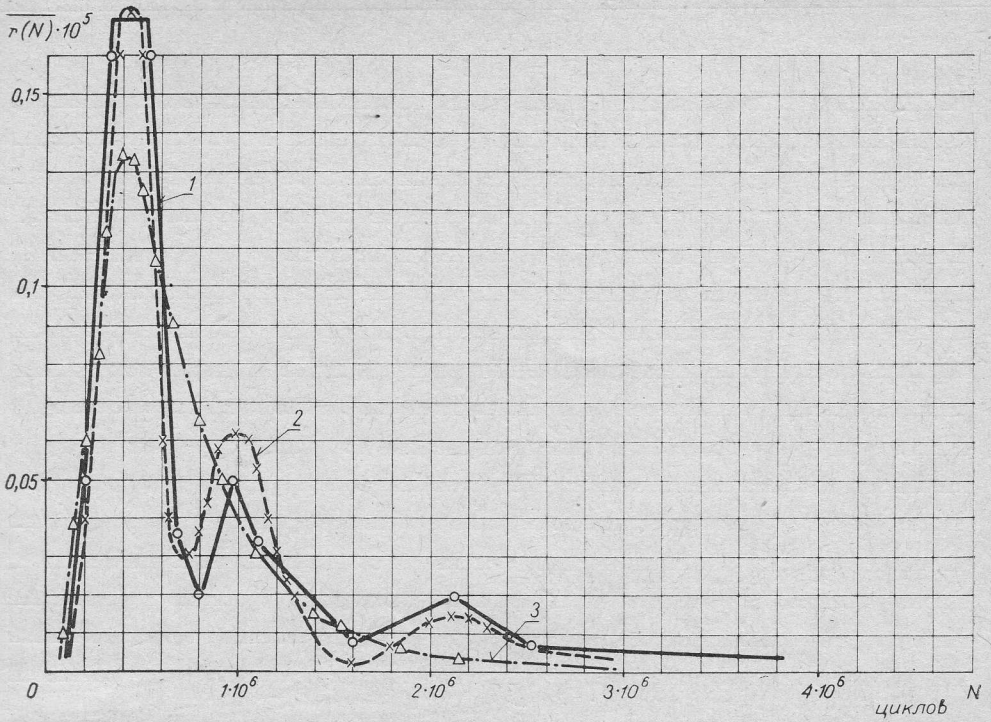


Рис. 4. Распределение долговечности лопаток турбины

1 — полигон частот, 2 — при гипотезе $r(N)$ распределения, 3 — при гипотезе логарифмически-нормального распределения

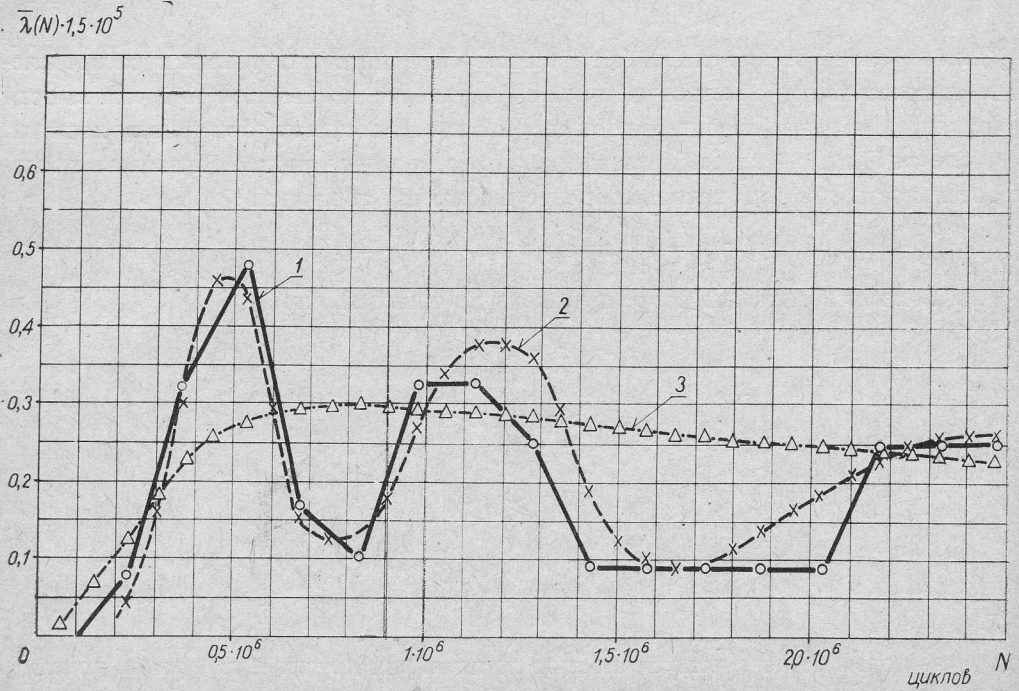


Рис. 5. Интенсивность отказов лопаток турбины

1 — экспериментальная кривая, 2 — при гипотезе $r(N)$ распределения, 3 — при гипотезе логарифмически-нормального распределения

изделий в виде:

$$r(T) = \exp(-\lambda y_0) \sum_j \frac{(\lambda y_0)^j}{j!} [2\pi(D_{11})_1 \eta(j)]^{-\frac{1}{2}} \exp \left\{ -\frac{[T - (v_1)_1 \eta(j)]^2}{2(D_{11})_1 \eta(j)} \right\}.$$

Кривые плотности распределения при $\eta(j) = a^{-j}$ для различных значений λy_0 и принятых произвольно $a=0,5$; $(v_1)_1=4$ и $(D_{11})_1=1$ показаны на рис. 1. Они имеют немонотонный характер с некоторой квазипериодичностью в распределении плотности вероятности по оси T .

Проведенные экспериментальные исследования не опровергли полученной модели распределения.

Анализ полигонов частот и выравнивающих кривых, построенных по экспериментальным данным при гипотезах распределения $r(N)$ логарифмически-нормального, а также критерии согласия χ^2 позволяют отдать предпочтение $r(N)$ распределению. Для одной из выборок лопаток ($n=37$ штук) полигон частот и выравнивающие кривые показаны на рис. 4.

На рис. 5 показаны кривые интенсивности отказов для тех же результатов, которые представлены на рис. 4. Функция интенсивности отказов определялась по известной формуле

$$\lambda(N) = \frac{r(N)}{1 - R(N)}.$$

Немонотонный характер изменения кривых плотности распределения и интенсивности отказов согласуется с квазипериодичностью изменения кривых условных вероятностей, получаемых при схеме испытаний $E_i \rightarrow G_k$.

Выводы

1. Повреждаемость материала лопаток турбины при виброн нагружении можно определять интегральной характеристикой в виде медианных значений долговечности $Me\{N(G_k/\bar{N}_j(E_i))\}$, получаемой при схеме испытаний $E_i \rightarrow G_k$.

2. Наблюдается квазипериодичность в поведении интегральных характеристик разрушающего контроля состояния материала по накопленному повреждению и предложено уравнение для их описания.

3. Закон распределения долговечности, полученный на основе разработанной математической модели накопления повреждений, имеет своеобразную периодичность изменения плотности вероятности и интенсивности отказов во времени, что находится в хорошем согласии с экспериментальными результатами.

4. Квазипериодичность изменения кривых равных условных вероятностей при испытаниях по схеме $E_i \rightarrow G_k$ и немонотонность изменения кривых плотности распределения долговечности связаны друг с другом и имеют единую физическую основу.

Uszkodzenie materiału łopatek turbin przy obciążeniach pulsujących

Streszczenie

Celem pracy jest określenie praw rządzących zmianami stanu materiału łopatek turbinowych podczas rozwoju uszkodzeń przy obciążeniach pulsujących oraz zasad prognozowania kresu pracy łopatek.

Dla określania praw rozwoju uszkodzeń w materiałach łopatek zaproponowano metodę postępowania opartą na dwuetapowych badaniach.

Korzystając z tej metody zbadano łopatki turbinowe z materiału EI-437B i wzorce z materiału EI-437BWD. Wyniki doświadczeń przedstawiono w postaci zależności medianowych wartości żywotności otrzymanych w drugim etapie badań od średnich wartości żywotności uzyskanych z pierwszego etapu badań.

Posługując się odpowiednim modelem matematycznym napisano równanie krzywych równych umownych prawdopodobieństw zniszczeń. Równanie to dobrze aproksymuje wyniki badań doświadczalnych.

Przebieg krzywych równych umownych prawdopodobieństw zniszczeń jest kwaziperiodyczny. Taki charakter spowodowany jest niemonotonicznością funkcji gęstości rozkładu żywotności badanych obiektów. W pracy podano równanie funkcji rozkładu żywotności.

Opracowany model matematyczny zakłada, że proces zmiany stanu obiektu (wskutek uszkodzeń) jest losowy i przebiega przyrostami, ze zmienną w czasie prędkością nawarstwiania zniszczeń.

Otrzymany model rozkładu, potwierdzony wynikami badań doświadczalnych, może być przydatny do prognozowania żywotności łopatek turbinowych.

Damage to Turbine Blade Material Due to Pulsating Loads

Summary

The determination of laws responsible for changes in the state of turbine blade material during the development of damages caused by pulsating loads and the determination of rules for forecasting the blade lifetime have been the purpose of this work.

A method based on two-step investigations has been proposed for the determination of laws of the blade material damage development.

The method has been used for testing turbine blades made of EI-437B material and test specimens of EI-437BWD material. Results of the experiments have been presented in the form of median lifetime values as obtained in the second stage of investigations versus average lifetime values as obtained in the first stage.

An equation describing the lines of equal damage probabilities has been derived with the use of an appropriate mathematical apparatus. This equation gives good approximation of the experimental results. The lines of equal damage probabilities are quasiperiodical in form, this being due to the fact that the lifetime distribution density function of the objects tested was non-monotonic. The equation of the lifetime distribution function has been presented.

The mathematical model developed has been based on the assumption that the process of changes in the state of an object (due to the damage) is random and occurs in increments, the damage accumulation varying with the time.

The obtained model of the distribution, confirmed experimentally, can be used when forecasting the turbine blade lifetime.