

результат был получен за 12 минут. Таким образом, показано, что в низкочастотной области расчет виброн нагруженности по СЭМу может давать значительную погрешность, в то время как в высокочастотной области СЭМ оказывается гораздо более предпочтительным методом. Раздельное использование МКЭ и СЭМа в соответствующих частотных диапазонах, как показывает практика, позволяет получать результаты, удовлетворительно совпадающие с данными летных испытаний.

Л и т е р а т у р а

1. Гладкий В.Ф. Прочность, вибрация и надежность конструкции летательного аппарата. - М.: Наука, 1975. - 456 с.

2. Lyon R.N. *Statistical energy analysis of dynamical systems*. - Cambridge, MIT. Press, 1975. - 388 p.

3. Макаров К.Н. Исследование случайных колебаний конечно-элементной модели цилиндрической оболочки // Колебания упругих конструкций с жидкостью: Сб. научн. докладов У симпозиума / Под ред. В.Г.Сувернева и Р.Е.Лампера. - М.: ЦНТИ "Волна" - 1984.-С.175-178.

4. Гулгазарян Г.Р., Лидский В.Б. Плотность частот свободных колебаний тонкой анизотропной оболочки, составленной из анизотропных слоев // Известия АН СССР. Механика твердого тела. - 1982, № 3. с. 131-144.

5. Авиационная акустика / Под ред. А.Г.Мунина и В.Е.Квитки. - М.: Машиностроение, 1973.

УДК 629.7.017.1

С.Н.Перов, Ю.Л.Тарасов

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ

Как показывает опыт, при современном уровне технологии изготовления изделий авиационной техники практически невозможно избежать образования в некоторых конструктивных элементах трещиноподобных дефектов. Усталостные макротрещины могут образовываться в материале элементов конструкции и в процессе эксплуатации. Поэтому в настоящее время в основу проектирования летательных аппаратов положен принцип повышенной живучести, согласно которому некоторые элементы конструкции остаются работоспособными с распространяющейся усталостной трещиной.

Процесс распространения усталостной трещины сопровождается монотонным уменьшением несущей способности. По достижении трещиной критической величины происходит разрушение конструкции в результате катастрофического распространения трещин. Знание изменения вероятности безотказной работы конструкции с трещиной позволит принять меры по предотвращению такого разрушения.

В работах /1/, /2/ предложены методы прогнозирования прочностной надежности, основанные на моделировании процесса усталостного разрушения силовых элементов конструкции при стохастическом нагружении. Под надежностью элементов понимается вероятность их безотказной работы. Оценка работоспособности элементов конструкций с развивающейся усталостной трещиной проводится с использованием представлений и методов механики разрушения, согласно которым поцикловая скорость роста усталостной трещины определяется выражением:

$$\frac{d\ell}{dn} = \varphi(\Delta K, \nu_1, \nu_2, \dots, \nu_5), \quad (I)$$

где ΔK - размах коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины; ν_1, ν_2, ν_3 - параметры, характеризующие условия эксплуатации, геометрические параметры конструктивного элемента, физические свойства материала.

За параметры состояния силовых элементов принята текущая длина усталостной трещины $\ell(t)$. С учетом кумулятивности принятой модели отказа оценка надежности производится по формуле:

$$H(t) = P[\ell(t) < \ell_c], \quad (2)$$

где ℓ_c - критическое значение длины трещины при циклическом нагружении в условиях эксплуатации.

Моделирование стохастического процесса распространения усталостной трещины реализуется численным интегрированием уравнения для поциклового скорости роста усталостных трещин (I) с использованием метода интерполяционных полиномов /3/.

Использование моделирования обуславливает необходимость разделения временной и вероятностной структуры случайных процессов. Для представления реализаций случайных процессов применяется неканоническое разложение /3/:

$$R(t) = \langle R(t) \rangle + \sum_i (\gamma_{1i} \sin \omega_i t + \gamma_{2i} \cos \omega_i t). \quad (3)$$

Здесь $\gamma_{1i}, \gamma_{2i}, \omega_i$ - случайные величины, параметры распределения которых определяются по характеристикам i -й спектральной

плотности; $\langle \dots \rangle$ - знак математического ожидания. Исследования показали /4/ применимость разложения (3) для моделирования реализаций случайных процессов сложной структуры.

Составлен алгоритм и написана программа расчета на ЭВМ функции надежности элементов конструкции в указанной постановке. Проведены расчеты двух элементов конструкции: рычага и упора.

Рычаг выполнен из алюминиевого сплава В95АТ1. Его расчетная схема представлена на рис. I, а. Опасное сечение рычага представляет собой прямоугольник с размерами 7,5 мм (толщина) на 22,5 мм (ширина). Предполагается наличие начального сквозного дефекта в опасном сечении рычага. Расчетная схема упора, изготовленного из алюминиевого сплава АМг-6М, показана на рис. I, б. Опасное сечение упора имеет размеры 3,6 мм (толщина) на 10 мм (ширина). В его опасном сечении также предполагалось наличие сквозного начального дефекта.

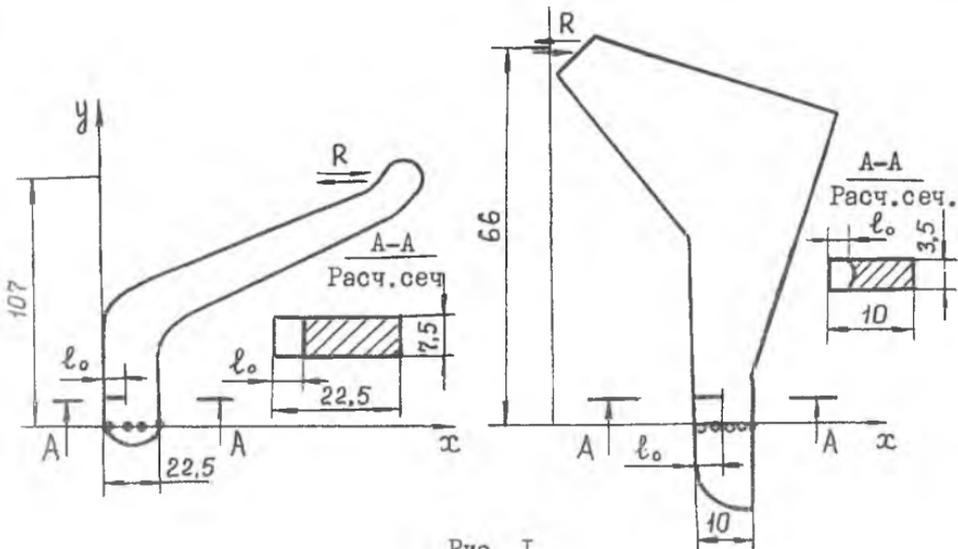


Рис. I

Предполагается, что спектральная плотность случайного процесса нагружения упора и рычага имеет вид:

$$S_R(\omega) = \frac{\alpha \cdot D_R}{\pi} \frac{\omega^2 + \alpha^2 + \omega_0^2}{(\omega^2 - \alpha^2 - \omega_0^2)^2 + 4\alpha^4 \omega^4}$$

Параметры процесса нагружения, а также заданные параметры распределения начальной и предельно допустимой длины усталостной трещины сведены в таблицу I.

В работе /5/ предложено скорость роста усталостной трещины

в различных условиях эксплуатации (давление, температура и т.д.) определять по уравнению, записанному в форме Париса.

Таблица 1

Параметры нагружения и дефекта

Элемент конструкции	Режим нагружения	$\langle R \rangle$, н	D_R , н ²	α , с ⁻¹	ω_0 , с ⁻¹	$\langle \ell_0 \rangle$, мм	$D(\ell_0)$, мм ²	$\langle \ell_c \rangle$, мм	$D(\ell_c)$, мм ²
Упор	1	75	126,56	0,3353	12,57	1	0,0025	8,0	0,4096
	2	50	56,25		12,57		0,0025		
Рычаг	1	750	12656	0,3353	37,70	4	0,0400	16,0	1,6384
	2	500	5625						

В таблице 2 приведены использованные нами в расчетах характеристики материалов АМг-6М и В95АТ1 и параметры уравнения Париса в нормальных условиях (давление 10^5 Па, $T = 293$ К) - среда 1 и в условиях вакуума (давление 10^{-3} МПа, $T = 293$ К) - среда 2. Значения критического циклического K_{II} и порогового K_{II} коэффициентов интенсивности напряжений определены по кинетическим диаграммам материалов, экспериментально полученным В.И.Куренковым.

Таблица 2

Характеристики материалов

Материал	Среда эксплуатации	C	m	K_{II} , МПа·м ^{1/2}	$\langle K_c \rangle$, МПа·м ^{1/2}	$D(K_c)$, [МПа·м ^{1/2}] ²
АМг-6М	1	$1,0 \cdot 10^{-6}$	2	3,0	30	6
	2	$6,1 \cdot 10^{-12}$	6	4,0		
В95АТ1	1	$2,53 \cdot 10^{-6}$	2	4,0	30	6
	2	$7,5 \cdot 10^{-12}$	6	5,0		

В процессе вычислений исследовалось влияние числа узлов интерполяции случайной величины текущей длины трещины q_e , случайных величин неканонического разложения (3) q_{γ_1} и q_{γ_2} , а также шага интегрирования Δt на время T эксплуатации с заданной величиной надежности N_0 . В таблицах 3 и 4 показаны результаты расчетов времени эксплуатации упора и рычага в нормальных условиях на первом режиме нагружения. В расчетах полагалось число узлов интерполяции случайной величины ω равным $q_\omega = 8$.

Таблица 3

Время эксплуатации упора при заданном уровне надежности $H_o = 0,999$

№ п/п	$\Delta t, c$	Дисперсия начальной длины трещины	q_e	$q_{r_1} = q_{r_2}$	T, c	$lg(T, c)$
1	30	0,0100	2	2	3000	3,4771
2	30	0,0025	2	2	3000	3,4771
3	30	0,0025	3	2	3000	3,4771
4	30	0,0025	5	2	3000	3,4771
5	15	0,0025	5	2	2925	3,4661
6	60	0,0025	5	2	3300	3,5185
7	30	0,0025	5	4	3000	3,4771

Таблица 4

Время эксплуатации рычага при заданном уровне надежности $H_o = 0,999$

№ п/п	$\Delta t, c$	Дисперсия начальной длины трещины	q_e	$q_{r_1} = q_{r_2}$	T, c	$lg(T, c)$
1	30	0,1600	2	2	750	2,8751
2	30	0,1600	3	3	800	2,9031
3	30	0,0400	3	2	750	2,8751
4	30	0,0400	5	2	750	2,8751
5	15	0,0400	5	2	725	2,8603
6	60	0,0400	5	2	800	2,9031
7	30	0,0400	5	4	750	2,8751

Результаты расчетной оценки функции надежности при постепенном отказе в нормальных условиях и в вакууме упора представлены на рис.2,а, рычага - на рис.2,б. На рис.3 показаны расчетные зависимости длины трещины от времени наработки для упора и рычага. В расчетах полагалось $q_e = q_{r_1} = q_{r_2} = 2; q_w = 8, \Delta t = 30 c$.

На рис.2 и 3 расчетные кривые маркируются двумя цифрами. Первая цифра характеризует режим нагружения, вторая - среду эксплуатации.

Анализ результатов расчетов надежности позволяет делать следующие выводы. Вероятность безотказной работы конструктивных элементов в вакууме выше, чем в нормальных условиях при одинаковом

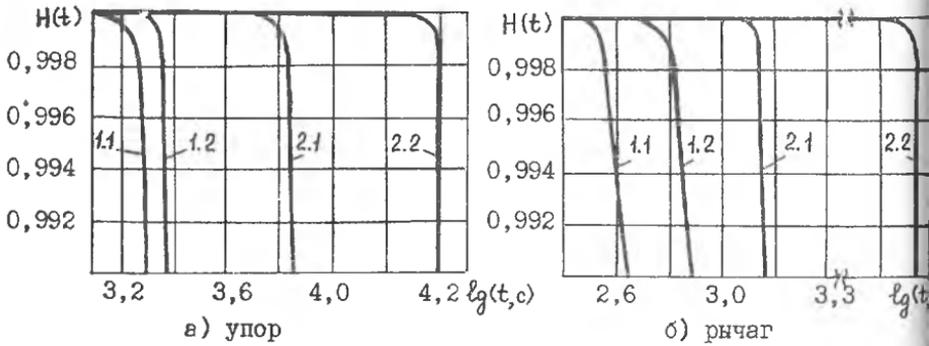


Рис. 2

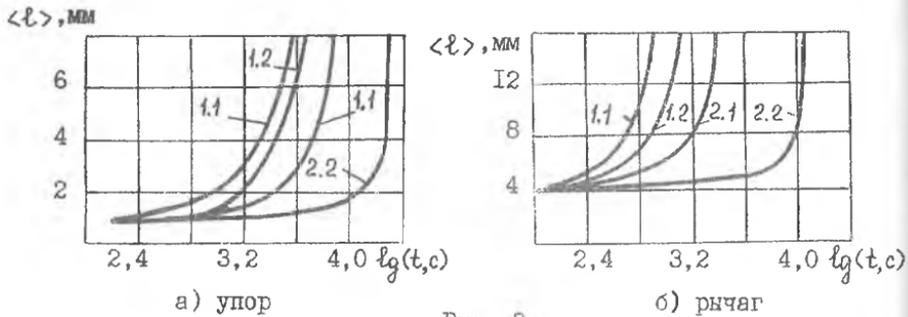


Рис. 3

времени эксплуатации. Существенное влияние на живучесть деталей оказывает уровень действующей нагрузки и длина начального дефекта. Учет стохастического характера геометрических параметров элементов конструкции не оказывает существенного влияния на получаемые результаты. Проведенные серии расчетов показывают, что для достаточно точной оценки надежности по методике, изложенной в работе [2/], можно задавать лишь по два узла интерполяции случайных величин ℓ , γ_1 , γ_2 . Число узлов интерполяции случайной величины ω зависит от вида спектральной плотности и колеблется в диапазоне $q_{\omega} = 8 + 16$. Интегрирование уравнения (4) можно проводить с шагом $\Delta t = 15 + 60$ с, если эффективная частота процесса нагружения лежит в диапазоне $10 + 100 \text{ с}^{-1}$.

Л и т е р а т у р а

1. Перов С.Н. Методика оценки вероятности безотказной работы элементов конструкции летательных аппаратов с учетом технологичес-

ких и эксплуатационных трещиноподобных дефектов. - Куйбышев, 1985. - 77 с. Деп. в ВИНТИ 03.06.85, № 3853-85.

2. Коваленко Т.Д., Миноранский Э.И., Перов С.Н., Тарасов Ю.Л. Оценка остаточного ресурса элементов конструкции, имеющих производственные или эксплуатационные дефекты // Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций: Сб. научн. трудов. - Куйбышев: КуАИ, 1986. - С. 95-102.

3. Чернецкий В.И. Анализ точности нелинейных систем управления. - М.: Машиностроение, 1968. - 248 с.

4. Гадалин Н.И., Миноранский Р.Э., Перов С.Н. Исследование вероятности неканонического разложения стационарных случайных процессов со сложным спектром // Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций: Сб. научн. трудов. - Куйбышев: КуАИ, 1986. - С. 108-115.

5. Куренков В.И., Тарасов Ю.Л. Определение скорости роста усталостных трещин на основе равновесной диаграммы растяжения // Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций: Сб. научн. трудов. - Куйбышев: КуАИ, 1980. - С. 98-105.

УДК 620.192.001.24

С.А.Михайлов, Р.Э.Миноранский,
Ю.Л.Тарасов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕДЕНИЯ УПРУГОЙ СИСТЕМЫ ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ МЕТОДОМ ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫХ ПОЛИНОМОВ

В работе рассматривается методика определения вероятностных характеристик параметров нагружения пространственной рамной конструкции при стохастическом воздействии. Внутри конструкции размещены грузы.

В качестве внешнего воздействия рассматриваются перемещения узлов крепления конструкции, которые представляют собой стационарные случайные процессы, вероятностные характеристики которых известны и заданы в виде спектральной плотности.

Решение задачи статистической динамики в такой постановке проводят обычно спектральным методом при стационарном и методом интегрирования уравнений системы при нестационарном воздействии. В обоих случаях задача решается путем разложения движения по формам собственных колебаний. Однако при расчете сложной рамной конструк-