

УДК 629.7.017.1

С.Л.Знобишев, Э.И.Миноранский
В.М.Шахмистов

ПРОГНОЗ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ
С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ

Для количественной оценки вероятности безотказной работы элементов конструкции на этапе проектирования рекомендуют использовать методику, изложенную в работе /1/. Однако она ориентирована на наличие трещинообразного дефекта в начальный момент времени. В действительности начальная трещина длиной l_0 может быть получена с определенной вероятностью при эксплуатации в момент времени τ_0 . Тогда функцию надежности силовых элементов конструкции необходимо определять через условную функцию надежности $H(t/\tau_0)$ по формуле полной вероятности:

$$H(t) = \int\int_{D(\tau_0)} H(t/\tau_0) f(\tau_0) d\tau_0, \quad (1)$$

где условную функцию надежности

$$H(t/\tau_0) = P\{v(\tau/\tau_0) \in \Omega_0; \tau \in [0, t]\}$$

с учетом возможных внезапных и постепенных отказов можно определить, воспользовавшись работой /1/.

Для определения времени τ_0 до образования усталостной макротрещины длиной l_0 с заданной вероятностью P можно использовать степенную аппроксимацию $N = C_p \cdot \sigma^{-\alpha_p}$, которая описывает кривую усталости рассматриваемого элемента конструкции по моменту образования макротрещины с вероятностью P при гармоническом нагружении с частотой $f = \omega_e / 2\pi$. Откуда следует, что

$$\tau_0(P/\sigma) = \frac{2\pi}{\omega_e} C_p \cdot \sigma^{-\alpha_p}. \quad (2)$$

Наиболее подходящим подходом, который позволяет получить значения параметров C_p и α_p аппроксимации кривой усталости по образованию макротрещины с заданной вероятностью P , является модифицированная теория «слабого» звена /2/.

Выражение (2) дает зависимость времени τ при фиксированной амплитуде напряжений. При стохастическом характере нагружения для определения момента появления макротрещины с заданной вероятностью необходимо воспользоваться формулой полной вероятности.

Рассматривается силовая конструкция, представляющая собой пространственную раму с элементами трубчатого сечения. Анализ напряженно-деформированного состояния конструкции при детерминированных

нагрузках показал, что наиболее опасными для конструкции являются сечения около узлов крепления. Поэтому расчет ведется для сечения А-А (рис. I).

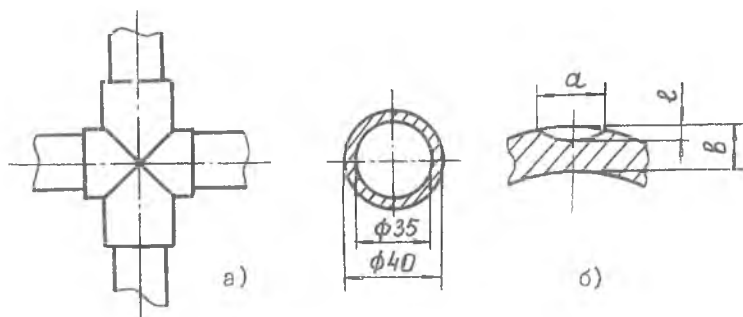


Рис. I

Материал конструкции АМг-6М, его характеристики, моменты распределения начальной l_0 и предельно допустимой l_c длины усталостной трещины приведены в таблице I. Здесь же даны параметры спектральной плотности изменения напряжений

$$S_{\sigma}(\omega) = \frac{\alpha}{\pi} \sum_{i=1}^3 \frac{(\omega^2 + \alpha^2 + \beta_i^2) D G_i}{(\omega^2 - \alpha^2 - \beta_i^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2}, \quad (3)$$

полученной из решения задачи для всей конструкции /2/.

Таблица I

Исходные данные для расчета

$\langle \gamma_{ic} \rangle$, КДЖ М	$\sqrt{D \gamma_{ic}}$, КДЖ М	$\langle \sigma_T \rangle$, МПа	$\sqrt{D \sigma_T}$, МПа	α , I/c	β_i , I/c	$D G_i$, (МПа) ²	$\langle l_0 \rangle$, мм	$D l_0$, (мм) ²	$\langle l_c \rangle$, мм	$D l_c$, (мм) ²
28,48	0,472	204	9,03	0,335	19	242	0,507	0,033	2,535	0,0055
				0,335	30	470				
				0,335	96	98				

Так как по условиям эксплуатации внутри трубчатых элементов рамы протекает жидкость, то в нашем случае под отказом понимается

прорастание трещины на глубину $l = b$, т.е. сквозная трещина (рис.1б).

Величина \mathcal{J} -интеграла для полуэллиптической трещины подсчитывается путем суммирования приращений потенциальной энергии на единицу высвобождающейся площади при виртуальном продвижении трещины на малую величину: $\mathcal{J}_{эф} = \sum_{i=1}^n \partial A / \partial s_i$. Вклад приращений энергии в величину интеграла $\mathcal{J}_{эф}$ пропорционален соответствующим длинам дуг фронта трещины (рис.2 а, б).

Заведомое завышенное значение $\mathcal{J}_{эф}$, получаемое в результате такого суммирования, идет в запас прочности рассматриваемого конструктивного элемента. Величина коэффициента интенсивности напряжений $K_{эф}$ для полуэллиптической трещины находится из соотношения

$$K_{эф} = [\mathcal{J}_{эф} E / (1 - \mu^2)]^{-1/2},$$

где E, μ - модуль упругости и коэффициент Пуассона материала.

На следующем этапе учитывается кривизна рассматриваемого элемента конструкции введением числового коэффициента $\alpha = \varphi (R_1/R_2) / 3$ (рис.2 в).

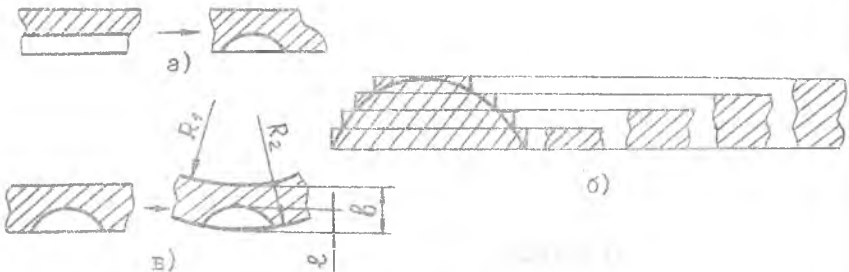


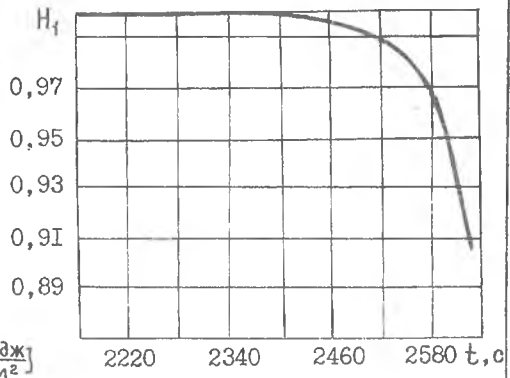
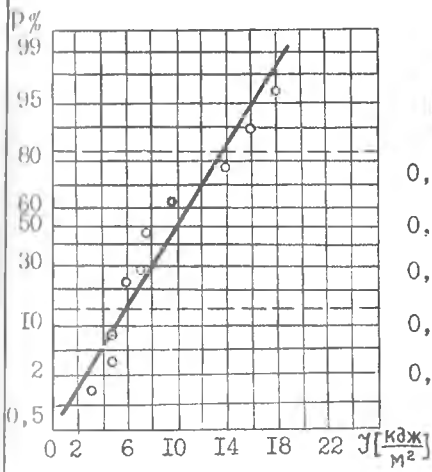
Рис. 2

С учетом зависимости $\mathcal{J}(l)$, полученной расчетным путем, следуя методике /4/ и известному закону $l(t)$ для данных условий эксплуатации, искомую функцию $\mathcal{J}(t)$ аппроксимируем выражением

$$\mathcal{J}(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2. \quad (4)$$

Так как внешняя нагрузка представляет собой случайный процесс, а механические характеристики материала имеют стохастическую природу, то $\mathcal{J}(t)$ тоже является случайной функцией.

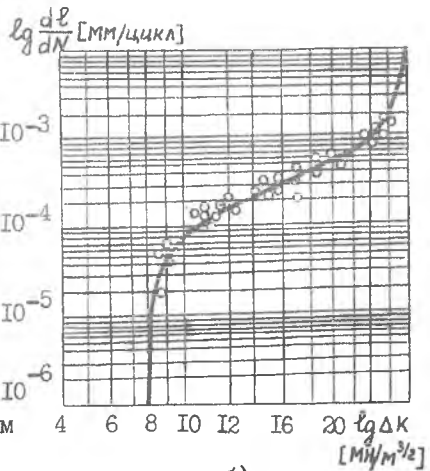
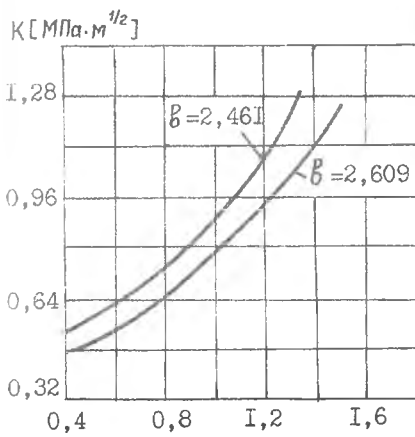
Для решения задачи статистической динамики использован метод интерполяционных полиномов. Основные формулы метода приведены в /2/. Результаты расчета функции распределения величины \mathcal{J} -интеграла нанесены на нормально-вероятностную бумагу (рис.3 а). Как



а)

б)

Рис. 3



а)

б)

Рис. 4

видно, закон можно вполне удовлетворительно аппроксимировать законом Гаусса.

С учетом найденных параметров по методике работы /4/ был проведен расчет условной функции надежности при внезапном отказе (рис.3,б).

Для расчета условной функции надежности при постепенном отказе можно воспользоваться методикой, изложенной в /5/. Однако эта методика предполагает постоянную скорость роста трещины $d\ell/dn$. Так как в нашем случае необходимо учитывать рост трещины от момента ее появления, то методика /5/ и программы расчета были соответствующим образом доработаны. Кроме того, введен учет корреляции между $\Delta \ell$ и ℓ на каждом шаге.

Случайный процесс изменения напряжения $\sigma(t)$ схематизируется с помощью неканонического разложения. При выборе шага интегрирования Δt и числа узлов интерполяции использованы исследования, приведенные в /6/. В результате было принято $\Delta t = 30$ сек, $q_1 = 2$, $q_2 = 2$, $q_3 = 8$. Исходные данные для расчета и кинетическая диаграмма, полученная опытным путем, приведены на рис.4.

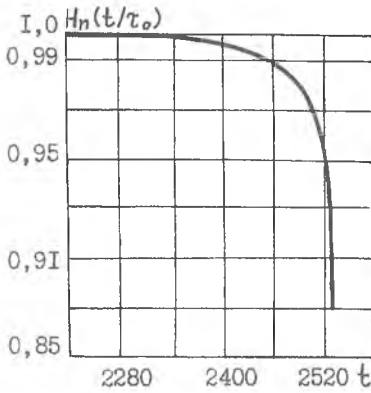
По полученным функциям надежности при постепенном и внезапном отказах была рассчитана общая условная функция надежности с использованием модели цепи /I/. Результаты расчета иллюстрирует рис.5б. Чтобы вычислить безусловную функцию надежности (I), предварительно необходимо определить функцию плотности вероятностей $f(\tau_0)$. Исходными данными при этом являются параметры Вейбулла для материала АМг-6М, приведенные в /I/.

По подсчитанным согласно работе /4/ параметрам α_p и C_p был произведен расчет дифференциального закона распределения случайной величины τ_0 , результаты которого представлены для логарифмически нормального распределения на рис.6,а и для распределения Вейбулла на рис.6,б.

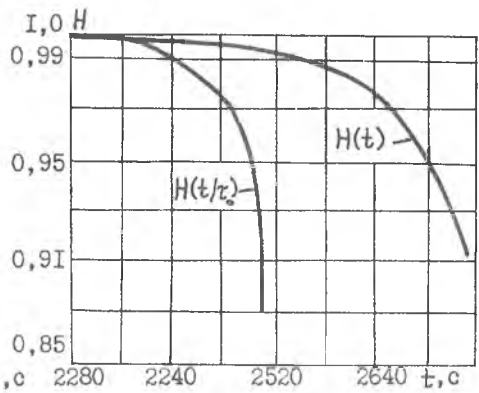
Из приведенных рисунков видно, что полученный закон соответствует распределению Вейбулла; обработка графика дает следующие параметры распределения:

$$f(\tau_0) = 1,2 \cdot 10^{-3} (\tau_0/692)^{-0,17} \cdot \exp[-(\tau_0/692)^{0,83}]$$

На основании расчета получен график безусловной функции надежности $H(t)$, который приведен на рис. 5,б.

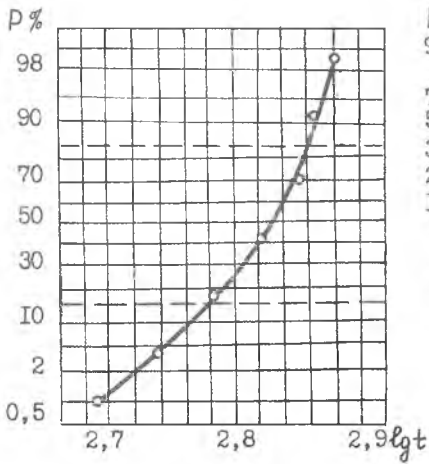


a)

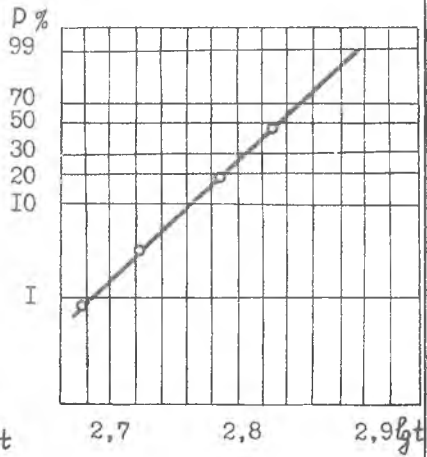


б)

Рис. 5



a)



б)

Рис. 6

Л и т е р а т у р а

1. Тарасов Ю.Л., Перов С.Н. Обеспечение прочностной надежности элементов конструкций на этапе проектирования // Тез. докл. научн.-техн. симпозиума специалистов стран - членов СЭВ. - Владимир, 1986. - С. 186-190.

2. Михайлов С.А., Миноранский Р.Э., Тарасов Ю.Л. Определение вероятностных характеристик поведения упругой системы при стохастическом нагружении методом интерполяционных полиномов. - Помещена в настоящем сборнике.

3. Cezari F., Hellen T. Evaluation of stress intensity factors for internally pressurised cylinders with surface flaws. "Int. J. Pressure vessels and Pip.", 1979, v. 7, N 3, p. 199-227.

4. Перов С.Н. Методика оценки вероятности безотказной работы элементов конструкций летательных аппаратов с учетом технологических и эксплуатационных трещиноподобных дефектов / КуАИ. - Куйбышев, 1985. - 77 с. - Деп. в ВИНТИ 03.06.85, № 3853.

5. 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: Межвузовский сборник / Под ред. Х.С. Хазанова. - Куйбышев: КуАИ, 1986. - С. 95-102.

6. Перов С.Н., Тарасов Ю.Л. Статистическое моделирование процесса роста усталостных трещин в элементах конструкций. - Помещена в настоящем сборнике.

УДК 539.43:629.7.018

В.М. Дуплякин

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВЕЙБУЛЛА ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ

Основное уравнение теории «слабого» звена при прогнозировании сопротивления усталости, предложенное Вейбуллом [3], связывает вероятность разрушения P с уровнем действующих напряжений σ_{max} :

$$-\ln(1-P) = \int_F \left(\frac{\sigma(\sigma_{max}, x, y) - \sigma_0}{\sigma_0} \right)^m dF. \quad (I)$$

Здесь $\sigma(\sigma_{max}, x, y)$ - функция, описывающая изменение напряжений в опасном сечении, F - площадь поперечного сечения, в пре-