

А.А.Чураков

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ

В процессе эксплуатации авиационные конструкции подвергаются воздействию со стороны различных по характеру изменения нагрузок. Наиболее реальными следует считать нагрузки, при которых напряжения в элементах конструкций изменяются во времени по случайному закону. Это нагрузки, связанные с полетом в неспокойном воздухе, транспортировкой, рулежкой, выполнением различных маневров в полете и т.д. Они характеризуются различными спектрами частот и законами распределения амплитуд.

Однако при расчетах вновь создаваемых конструкций пользуются в основном данными, получаемыми из упрощенных лабораторных испытаний при гармоническом или программном нагружении, т.к. моделирование сложных реальных нагрузок в лабораторных условиях практически невозможно по многим причинам.

Поэтому в настоящее время ведутся исследования по замене реальных нагрузок более простыми им эквивалентными. При этом в качестве критерия эквивалентности может быть использована величина повреждения, долговечность, скорость развития трещины, величина накопленной пластической деформации, снижение предела прочности или предела усталости после предварительного нагружения и т.д.

В настоящей статье описывается методика определения гармонической нагрузки, эквивалентной по долговечности любой другой более сложной нагрузке. Методика основана на использовании критерия равенства накопленного повреждения за определенный промежуток времени на стадии до появления усталостной трещины.

Пусть конструкция нагружается в течение некоторого промежутка времени t гармонической нагрузкой с амплитудой A . Затем уровень нагрузки повышается до значения A_0 , и испытания продол-

жуются до образования трещины в зоне максимальных напряжений. В результате подобного эксперимента выявится остаточная долговечность $T_{ост}$ на уровне A_0 . Если менять величину A (уровень предварительной нагрузки), оставляя неизменными t и A_0 , то получится ряд значений остаточной долговечности $T_{ост}$. То есть, имеет место некоторая функциональная зависимость

$$A = f(T_{ост}). \quad (1)$$

В общем случае это нелинейная функция. Ее вид может быть определен с использованием метода наименьших квадратов [1].

Если известна связь между нагрузкой A и напряжением в конструкции σ , то зависимость (1) может быть записана в виде

$$\sigma = \varphi(T_{ост}), \quad (2)$$

В дальнейшем полагаем, что такая связь существует.

Пусть имеется гармоническая нагрузка с амплитудой цикла A и произвольный режим нагружения A_1 . Будем считать их эквивалентными, если конструкции, находящиеся под их воздействием в течение равного промежутка времени t , показывают в дальнейшем при гармоническом нагружении на более высоком уровне A_0 равные значения оставшейся долговечности $T_{ост}$. Отсюда вытекает следующий порядок определения эквивалентных режимов нагружения:

- 1) выбираем базовый уровень A_0 гармонической нагрузки и длительность нагружения на уровне предварительной нагрузки t ;
- 2) варьируя значением A при гармоническом нагружении, получаем экспериментально ряд значений $T_{ост}$ и определяем вид функции (1);
- 3) проводим испытания в реальных условиях в течение того же периода времени t , потом продолжаем испытание при гармоническом нагружении на уровне A_0 до момента появления видимой трещины усталости заданных размеров. Получаем величину $T'_{ост}$;
- 4) подставляя $T'_{ост}$ в (1), определяем амплитуду гармонического нагружения, эквивалентного по долговечности реальной нагрузке. Если оперировать не нагрузками, а напряжениями, то нужно воспользоваться при этом зависимостью (2).

Изложенная методика была апробирована при определении гармонических режимов, эквивалентных заданной случайной нагрузке для конструктивных элементов в виде плоских образцов из материала IX18N10T с концентратором в форме отверстия.

Для определения вида функции (2) были проведены испытания образцов при двухступенчатом гармоническом нагружении. Испытания проведены на 5 уровнях предварительной нагрузки при ее длительности $t = 10$ мин. На каждом уровне испытывалось не менее 6 образцов. Величина базового уровня напряжения $\sigma_0 = 4 \text{ кг/мм}^2$. Для обоснования выбора величин t и σ_0 были проведены специальные исследования.

За долговечность по моменту появления трещины принималось время, за которое трещина усталости достигала длины 0,05 мм. Появление трещины определялось методом проникающих красок. Результаты подобных испытаний при 50% вероятности представлены на рис. 1. После их обработки функцию (2) можно записать в виде

$$\bar{\sigma} = 1,133 - 0,305 T_{ост} \quad (3)$$

Здесь обозначено:

$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_0}$ - относительный уровень предварительного напряжения;
 $T_{ост} = \frac{T_{ост}}{T_0}$ - относительная остаточная долговечность; T_0 - долговечность на базовом уровне напряжения.

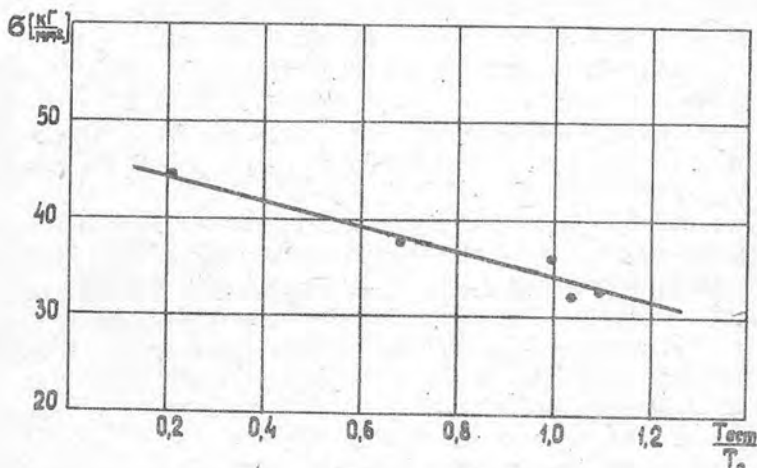


Рис. 1

В качестве нагрузки, которая заменялась эквивалентной гармонической, был взят случайный узкополосный процесс со средней частотой спектра 9,1 герц. Предварительное нагружение длительностью 10 минут проводилось на 6 уровнях среднеквадратического отклонения напряжения S , значения которых приведены в таблице I. Дальнейшие испытания проводились, как и ранее, при гармоническом нагружении с напряжением базового уровня 4 кг/мм^2 . Значения остаточной долговечности $T'_{ост}$, отнесенные к долговечности образца T_0 на базовом уровне σ_0 , показаны также в таблице I. Подставляя эти значения $T'_{ост}$ в (3), можно расчетным путем определить напряжения гармонических режимов нагружения $\sigma_{экв}$, эквивалентные заданным случайным.

Таблица I

S [кг/мм^2]	$\frac{T'_{ост}}{T_0}$	$\sigma_{экв}$ [кг/мм^2]	Долговечность по появлению трещины			Долговечность по разрушению		
			$T_{экс}$ [сек]	$T_{расч}$ [сек]	Δ %	$T_{экс}$ [сек]	$T_{расч}$ [сек]	Δ %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
29,4	0,455	40,7	$9,20 \cdot 10^2$	$9,56 \cdot 10^2$	3,8	$2,96 \cdot 10^3$	$3,16 \cdot 10^3$	6,4
25,5	0,520	40,0	$1,22 \cdot 10^3$	$1,55 \cdot 10^3$	6,0	$3,8 \cdot 10^3$	$4,58 \cdot 10^3$	17,0
23,5	0,600	39,0	$1,63 \cdot 10^3$	$2,00 \cdot 10^3$	18,5	$4,8 \cdot 10^3$	$5,89 \cdot 10^3$	18,0
18,8	0,815	36,3	$4,08 \cdot 10^3$	$4,36 \cdot 10^3$	7,4	$8,92 \cdot 10^3$	$1,05 \cdot 10^4$	15,0
14,7	0,980	34,3	$9,15 \cdot 10^3$	$9,45 \cdot 10^3$	3,2	$1,95 \cdot 10^4$	$2,09 \cdot 10^4$	6,7
13,2	1,030	33,5	$1,29 \cdot 10^4$	$1,43 \cdot 10^4$	9,8	$2,4 \cdot 10^4$	$2,82 \cdot 10^4$	14,5

Если для данного образца имеется кривая усталости при гармоническом нагружении, то, используя полученные значения $\sigma_{экв}$, можно получить расчетным путем долговечность при случайной нагрузке $T_{расч}$. В наших исследованиях кривые усталости для гармонических нагрузок были получены экспериментальным путем. Их уравнения для 50% вероятности в двойных логарифмических координатах для момента появления трещины и для разрушения соответственно имеют вид [2]:

$$\lg T_{Tp} = 23,66 - 12,84 \lg \sigma$$

$$\lg T_p = 21,05 - 10,92 \lg \sigma$$

(4)

Значения долговечности при случайной нагрузке, полученные

через $\sigma_{\text{экв}}$ по формулам (4), приведены в графах 4 и 7 таблицы I.

Для оценки точности расчетного определения долговечности были проведены испытания образцов при случайном нагружении. После обработки результатов уравнения кривых усталости по появлению трещины и по разрушению имеют соответственно вид:

$$\begin{aligned} \lg T_{\text{р}} &= 7,95 - 3,39 \lg S \\ \lg T_{\text{р}} &= 7,52 - 2,74 \lg S. \end{aligned} \quad (5)$$

По формулам (5) получены экспериментальные значения долговечностей $T_{\text{экс}}$ для указанных в таблице I уровней случайного напряжения. Они приведены в графах 5 и 8 таблицы. В графах 6 и 9 показана погрешность расчетного определения долговечности, вычисленная по формуле

$$\Delta = \frac{T_{\text{экс}} - T_{\text{расч.}}}{T_{\text{экс}}} 100\%. \quad (6)$$

Из приведенных данных видно, что совпадение долговечностей при случайном нагружении, полученных расчетным путем с использованием эквивалентного гармонического напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ и путем непосредственных экспериментов, удовлетворительное.

Л и т е р а т у р а

1. Липпак Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. Физматгиз, М., 1958.
2. Степнов М.И., Гиацинтов Е.В., Когаев В.П. Статистическая обработка результатов усталостных испытаний на основе линейного регрессионного анализа. Сб. "Проблемы прочности в машиностроении", вып.3, изд. АН СССР, 1959.