

В.Т.Тимшин, Х.С.Хазянов

### РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ НАГРУЗКАХ

Большинство элементов авиационных конструкций в процессе эксплуатации подвергаются воздействию случайных нагрузок. Однако экспериментальные исследования их усталостной прочности проводятся, как правило, при гармоническом нагружении. При этом некоторый характерный параметр случайной нагрузки  $\sigma_{сл}$  предполагается эквивалентным определенному уровню гармонической нагрузки [1]. В связи с этим встает вопрос о выборе обоснованных параметров эквивалентных режимов нагружения.

Задача эта решается путем сопоставления результатов усталостных испытаний при случайном нагружении с результатами испытаний при гармонической нагрузке. Обычно с этой целью вводят коэффициент эквивалентности, определяемый отношением уровней сравниваемых нагрузок, взятых при одинаковом числе циклов  $N$  или времени  $T$  до разрушения

$$K_{экр} = \left( \frac{\sigma_r}{\sigma_{сл}} \right)_T \quad (1)$$

За  $\sigma_r$  принимают, как правило, амплитудные значения гармонической нагрузки, а за  $\sigma_{сл}$  — среднеквадратические или максимальные значения случайной нагрузки. Однако такой выбор параметров не дает достаточной характеристики режима нагружения с точки зрения его влияния на усталостную прочность. Процессы с одинаковыми среднеквадратическими значениями могут заметно различаться по числу максимумов. В то же время число максимумов нагружения

является одним из параметров, оказывающих существенное влияние на усталость [2].

В настоящей работе предлагается определять величины, входящие в (I), с использованием введенного в [3,4] коэффициента полноты диаграммы нагрузки, т.е. :

$$\sigma_r = \eta_r \sigma_a \quad (2)$$

$$\sigma_{cl} = \eta_{cl} \sigma_{max}$$

Здесь  $\eta_r = 0,6366$  - коэффициент полноты диаграммы гармонической нагрузки [4];  $\eta_{cl}$  - коэффициент полноты диаграммы случайной нагрузки;  $\sigma_{max}$  - наибольшее из максимальных значений случайной нагрузки на данном уровне нагружения (обычно принимают  $\sigma_{max} \approx 3\bar{\sigma}$ , где  $\bar{\sigma}$  - среднеквадратическое отклонение нагрузки). Тогда выражение (I) можно записать в виде

$$K_{экс} = \frac{\eta_r (\sigma_a)_r}{\eta_{cl} (\sigma_{max})_r} \quad (3)$$

Рассмотрим методику получения коэффициента  $\eta_{cl}$ . Пусть имеется реализация случайной нагрузки  $\sigma(t)$  продолжительности  $t_0$  (рис. I).

Точки пересечения кривой нагрузки с осью абсцисс разбивают реализацию на  $n$  полуциклов, которые могут быть как простыми, характеризующимися одной точкой экстремума (а), так и сложными, с тремя или более экстремумами (б). Для любого из этих полуциклов значение коэффициента полноты диаграммы определяется выражением

$$\eta_i = \frac{\int_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} \sigma(t) dt}{\sigma_{max_i} \Delta t_i} \quad (4)$$

В общем случае величины коэффициентов  $\eta_i$  для каждого из полуциклов могут быть различными. Но даже и при одинаковых  $\eta_i$  полуциклы с различными уровнями максимальных напряжений по-разному влияют на процесс накопления усталостных повреждений. Так, принято считать, что напряжения меньше предела усталости не вносят усталостных повреждений.

Поэтому коэффициент  $\eta_{cl}$  для всей реализации будем определять с учетом его "веса" в каждом полуцикле, т.е. воспользуемся формулой

$$\eta_{cl} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \eta_i |\sigma_{max_i}|}{\sum_{i=1}^{n_1} |\sigma_{max_i}|} \quad (5)$$

Суммирование производится по всем полудиклам, для которых  $|\sigma_{max_i}| \geq \sigma_{-1}$ , т.е.  $n_i \leq n$ . При этом коэффициент  $\eta_{ca}$  уменьшается с повышением уровня нагрузки. Для иллюстрации на рис. 2 показан график изменения коэффициента  $\eta_{ca}$  при чистом изгибе и кручении в зависимости от  $\sigma_{max}$  и  $\tau_{max}$ . Число полудиклов  $n$  при подсчете  $\eta_{ca}$  было принято равным 200.

Остается выяснить вопрос о необходимой продолжительности реализации процесса. Для этого на примере нагружения образцов из стали 30ХГСА чистым изгибом или кручением при гармонических и случайных нагрузках исследуем изменение  $K_{эkv}$  в зависимости от долговечности  $T$  для различного числа полудиклов  $n$ . Базовые кривые усталости для чистого изгиба и кручения при этих нагрузках приведены на рис. 3. Кривые соответствуют 50-процентной вероятности. Эксперимент осуществлялся на сплошных цилиндрических образцах, имеющих диаметр рабочей части 10мм, с помощью установки, описанной в [5].

На рис. 4 по реализациям случайного процесса на разных уровнях нагружения построены для чистого изгиба графики изменения  $K_{эkv}$  в зависимости от долговечности. При этом число полудиклов  $n$  принималось равным 50, 100, 150 и 200.

Из рассмотрения рис. 4 вытекает важный вывод: значение коэффициента эквивалентности, определенного по рекомендуемой методике, практически не зависит от времени до разрушения или, что то же самое, от уровня нагружения. По мере увеличения общего числа полудиклов величина коэффициента  $K_{эkv}$  приближается к единице. Можно считать, что при  $n = 200$  обеспечивается уже абсолютная эквивалентность сравниваемых режимов нагружения, так как при этом  $K_{эkv} \approx 1$ . Аналогичную картину можно наблюдать и в случае кручения.

Если положить коэффициент эквивалентности равным единице, то выражение (3) для чистого изгиба запишется в следующем виде:

$$(\sigma_a)_T = \frac{\eta_{ca}}{\eta_a} (\sigma_{max})_T \quad (6)$$

Аналогично для кручения имеем

$$(\tau_a)_T = \frac{\eta_{ca}}{\eta_a} (\tau_{max})_T \quad (7)$$

Используя кривые усталости гармонического нагружения, приведенные на рис. 3, и выражения (6), (7) с учетом числовых значе-

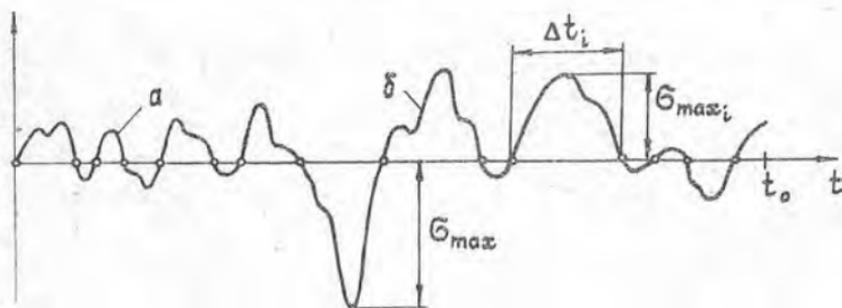


Рис. 1



Рис. 2

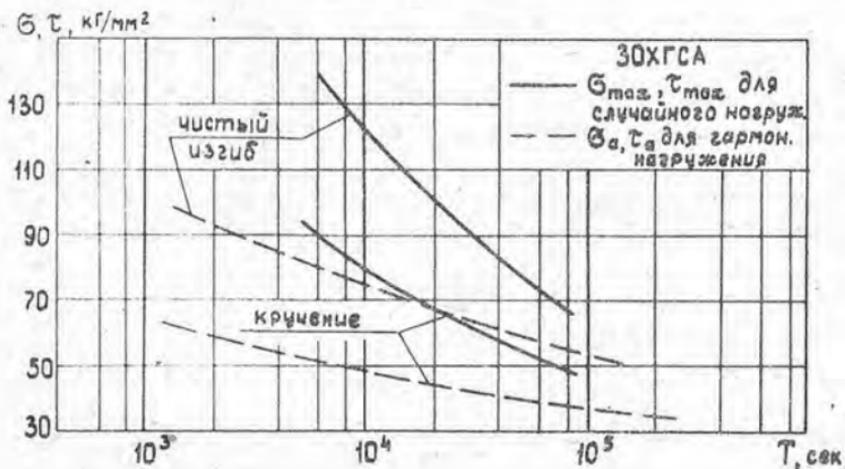


Рис. 3

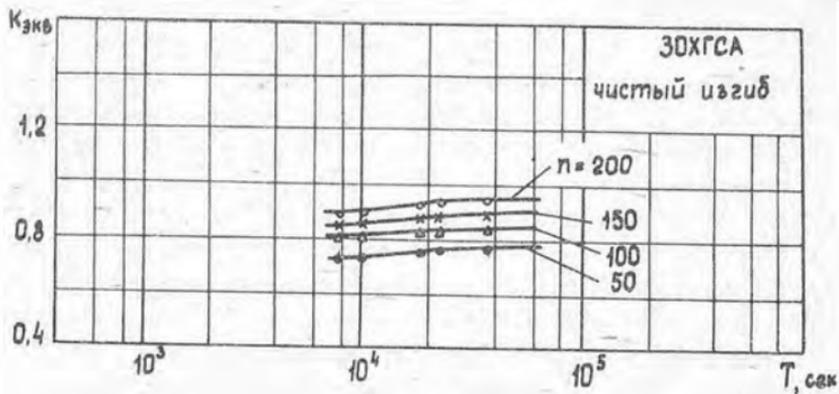


Рис. 4

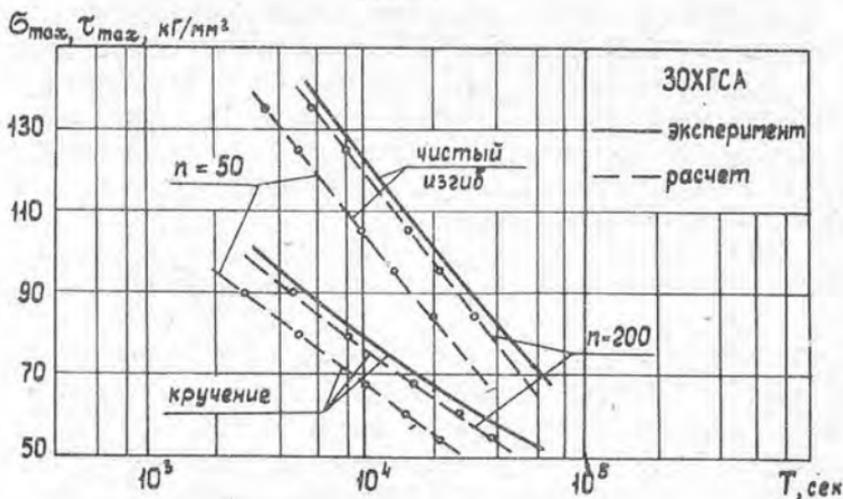
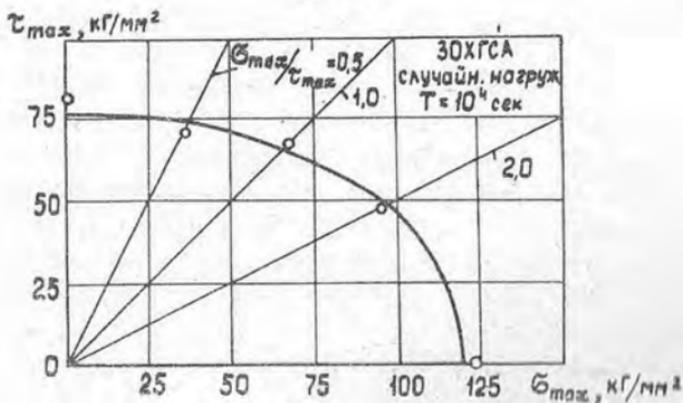


Рис. 5



ний коэффициентов  $\eta_{сн}$  (рис.2); построим расчетные усталостные кривые для случайного нагружения. На рис. 5 они показаны штриховыми линиями, а экспериментальные кривые при этом нагружении — сплошными. Расчетные кривые при  $n = 200$  вполне удовлетворительно согласуются с экспериментом как в случае чистого изгиба, так и кручения.

Таким образом, использование полученных нами коэффициентов обеспечивает построение расчетных кривых усталости для случайного нагружения по известным усталостным характеристикам гармонического нагружения. Соотношения (6) и (7) позволяют, имея записи случайного процесса на некотором уровне нагружения, найти для этого уровня расчетным путем эквивалентный по долговечности режим гармонического нагружения.

Рассмотрим теперь возможность прогнозирования усталостных свойств элементов конструкций, работающих при случайном нагружении в условиях сложного напряженного состояния. Для этого воспользуемся полученными расчетными кривыми усталости и расчетным уравнением условия усталостной прочности, учитывающего нелинейность влияния нормального напряжения на усталость [6]. Для случайного нагружения это уравнение примет вид

$$\left(\frac{1}{m^2} + \frac{1}{4}\right) \sigma_{max}^2 + \frac{K_T (\tau_{max})_T}{4} \sigma_{max}^3 - \frac{K_T}{64} \sigma_{max}^6 = (\tau_{max})_T^2, \quad (8)$$

где  $m = \bar{\sigma} / \bar{\tau} = \sigma_{max} / \tau_{max}$ ,

$K_T = \frac{4[2(\tau_{max})_T - (\sigma_{max})_T]}{(\sigma_{max})_T^3}$  — коэффициент, учитывающий нелинейность влияния нормального напряжения на усталость.

Через  $(\sigma_{max})_T$ ,  $(\tau_{max})_T$  обозначены ограниченные пределы выносливости при чистом изгибе и кручении. Эти величины могут быть найдены по расчетным кривым усталости, приведенным на рис. 5.

Кривая, построенная по формуле (8) для базы  $T = 10^4$  сек., приведена на рис. 6. Точками на графике нанесены результаты эксперимента при той же базе для сложного напряженного состояния при случайных нагрузках с различными отношениями  $m$ .

В процессе испытаний нормальные и касательные напряжения изменялись синфазно. Из рис. 6 видно, что расчетная кривая достаточно хорошо согласуется с экспериментом.

Таким образом, чтобы определить расчетным путем усталостные характеристики при сложном напряженном состоянии в условиях случайного нагружения, достаточно иметь представительные реализации случайного процесса на различных уровнях нагружения и кривые усталости для гармонического нагружения образцов чистым изгибом и кручением.

### Л и т е р а т у р а

1. Исмаев А.С. Экспериментальные исследования усталости при случайном нагружении. Труды МАТИ, вып. 61, 1964.
2. Rice J.R., Beer F.P. *On the distribution of rises and falls in continuous random process.* „Transaction of the ASME, series D”, вып. 87, №2, 1965.
3. Тимшин В.Т., Хазанов Х.С. Влияние сдвига фаз между напряжениями изгиба и кручения на усталостную прочность образцов. „Вопросы прочности элементов авиационных конструкций”. Труды КуАИ, вып. 60, 1973.
4. Тимшин В.Т. Об эквивалентности случайных и гармонических нагрузок. Сб. „Проблемы надежности в строительной механике”, М., 1975.
5. Тимшин В.Т., Иванченко В.И. Установка для усталостных испытаний материалов при сложном напряженном состоянии. „Вопросы прикладной механики в авиационной технике”. Труды КуАИ, вып. 69, 1974.
6. Тимшин В.Т. Об условиях усталостной прочности при сложном напряженном состоянии. Сб. „Творческий поиск молодых”, вып. I, КуАИ, Куйбышев, 1971.