

УДК 539.385:620.178.3

В.Т.Тимшин

УСТАЛОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Значительная часть элементов авиационных конструкций работают в процессе эксплуатации при динамических нагрузках в условиях сложного напряженного состояния. Основными источниками нагрузок являются воздушные порывы, маневры в воздухе, движение по земле (рулежка, взлет, посадка) и т.д. Обычно спектр таких нагрузок лежит в диапазоне частот $0 + 20$ герц [1]. Как показывают результаты исследований [1-3], именно в этой области частот на элементы авиаконструкций действуют нагрузки наибольшей интенсивности, приводящие к усталостным разрушениям. По данным работы [1], удельный вес усталостных повреждений конструкций крыла, стабилизатора и киля некоторых пассажирских самолетов при взлете, посадке и рулежке составляет $70 + 90\%$.

В общем машиностроении детали машин также сравнительно редко работают в условиях одноосного напряженного состояния. Все это настоятельно требует изучения усталостного поведения конструкционных материалов в условиях сложного напряженного состояния.

В настоящей работе представлены результаты испытаний на усталостную прочность и долговечность образцов из конструкционных материалов при различном характере нагружения в условиях сложного напряженного состояния. Напряженное состояние реализовывалось совместным действием знакопеременных изгибающего и крутящего моментов.

1. Основная часть усталостных испытаний проводилась на сплошных цилиндрических образцах из стали 30ХГСА. Некоторые дополнитель-

ные эксперименты были проведены на образцах из стали IX18H10T и сплава Д16Т. Геометрические размеры и форма исследуемых образцов представлены на рис. I. Обработка поверхности образцов в пределах рабочей части соответствовала 8-9 классу чистоты. Окончательны их доводка шлифованием производилась после термообработки. Режим термообработки для образцов из стали ЗОХГСА - закалка в масле при температуре $870^{\circ} \pm 10^{\circ}\text{C}$ с последующим отпуском в течение часа при температуре $370^{\circ} \pm 10^{\circ}\text{C}$. Образцы из сплава Д16Т и стали IX18H10T испытывались в состоянии поставки.

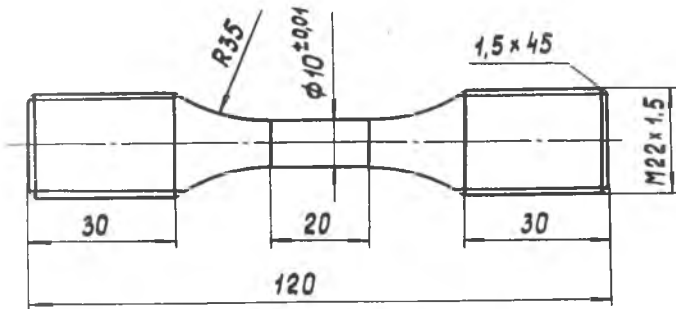


Рис. I

Для определения механических характеристик исследуемых материалов были проведены контрольные статические испытания на растяжение и кручение. Результаты испытаний сведены в таблице I.

Таблица I

	$\sigma_{0,2}$ кг/мм ²	σ_b кг/мм ²	δ %	$\tau_{0,3}$ кг/мм ²	τ_b кг/мм ²	$\psi_{разр.}$ град
Ст. ЗОХГСА $E = 2,1 \cdot 10^4$ кг/мм ² $G = 8,5 \cdot 10^3$ кг/мм ²	114	137	19,9	73	99	235
Ст. IX18H10T $E = 1,97 \cdot 10^4$ кг/мм ²	33,2	81,7	43	-	-	-
Сплав Д16Т $E = 7,2 \cdot 10^3$ кг/мм ²	26,5	40	10	-	-	-

Усталостные испытания осуществлялись на экспериментальной установке, созданной на кафедре прочности летательных аппаратов Куйбышевского авиационного института [4]. Были проведены испытания образцов при синфазном их нагружении чистым изгибом и кручением и нагружении с произвольным сдвигом фаз при широком варьировании соотношения между нормальными σ и касательными τ напряжениями. Исследовано поведение образцов при гармоническом, программном и случайном характерах нагружения.

В процессе эксперимента фиксировался момент появления видимой трещины и полное разрушение образца. Трещина определялась с помощью микроскопа типа "Мир" методом проникающих красок. Число циклов или время, при котором она достигала размера 0,05 мм, принималось за долговечность образца по моменту появления трещины. Для построения кривых усталости выбиралось по 3 и более уровней напряжений. На каждом уровне испытывалось не менее 6 образцов.

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась на основе линейного регрессионного анализа.

2. Усталостные испытания при гармоническом нагружении проводились с частотой 10 герц. Отношение амплитуд нормальных и касательных напряжений σ_a/τ_a принималось равным 0 (кручение); 0,5; 1,0; 2,0; 4,0 и ∞ (чистый изгиб). Были рассмотрены два вида нагружения - синфазное и со сдвигом фаз.

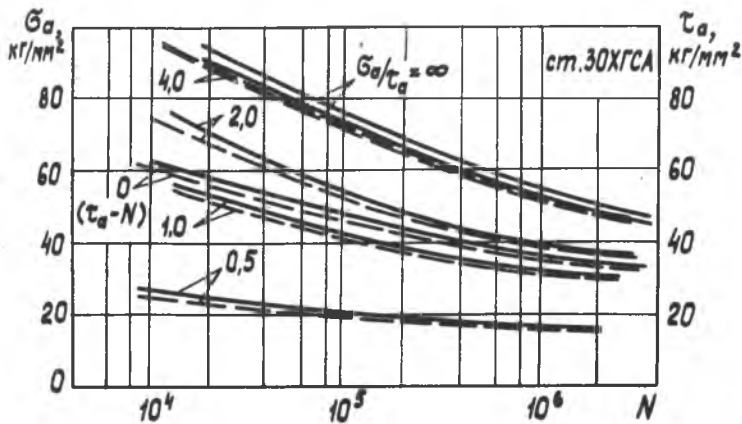


Рис. 2

С и ф а з н о е н а г р у ж е н и е. На рис. 2 представлены усталостные кривые по моменту появления видимой трещины (пунктирные линии) и по разрушению (сплошные линии) для образцов из стали 30ХГСА для различных σ_a/τ_a . Здесь и далее кривые усталости, соответствующие 50-процентной вероятности, построены для $\sigma/\tau = 0$ (кручение образца) в координатах $\tau - N (T)$, а остальные кривые - в координатах $\sigma - N (T)$. Для образцов из стали 1Х18Н10Т и сплава Д16Т диаграммы усталости по разрушению показаны на рис. 3.

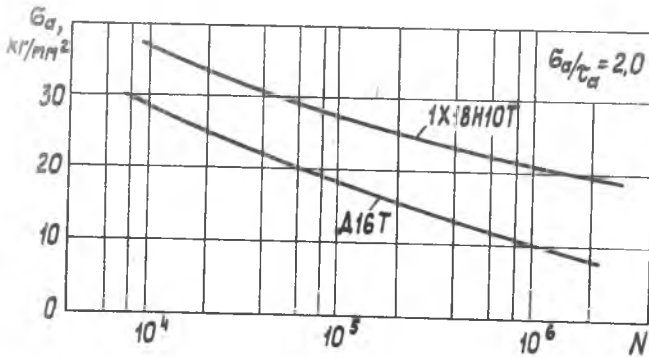


Рис. 3

Н а г р у ж е н и е с п о с т о я н н ы м с д в и г о м ф а з. При постоянном сдвиге фаз напряжения в поперечном сечении образца изменялись по закону

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sigma_a \sin \omega t, \\ \tau(t) &= \tau_a \sin(\omega t + \alpha), \end{aligned} \quad (I)$$

где α - угол сдвига фаз. В наших экспериментах принималась $\alpha = \pi/2$

На рис. 4 представлены усталостные кривые, построенные по моменту появления видимой трещины (пунктирные линии) и по разрушению (сплошные линии), для образцов из стали 30ХГСА. Для образцов из стали 1Х18Н10Т и сплава Д16Т они показаны на рис. 5.

Н а г р у ж е н и е с п е р е м е н н ы м с д в и г о м ф а з. Переменный сдвиг фаз реализовался за счет несовпадения частот изменения напряжений изгиба и кручения. Рассматривались два варианта соотношения частот, приведенные в таблице 2.

Таблица 2

	I вариант	2 вариант
Частота колебания напряжений изгиба в герцах	10	5
Частота колебания напряжений кручения в герцах	5	10

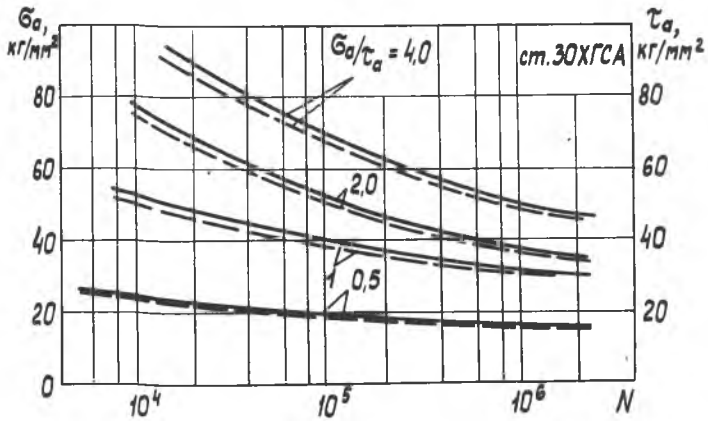


Рис. 4

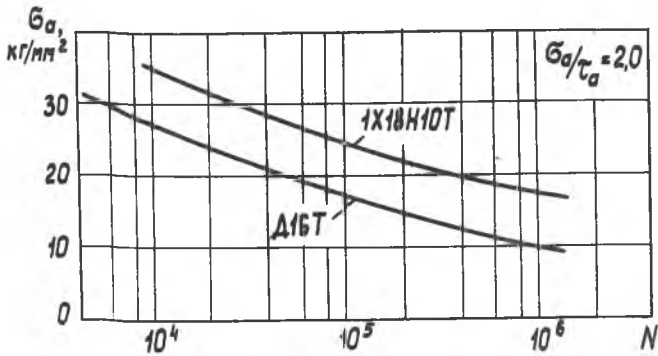


Рис. 5

Кривые усталости для данного вида нагружения изображены на рис. 6. При построении графиков число циклов определялось исходя из частоты 10 герц.

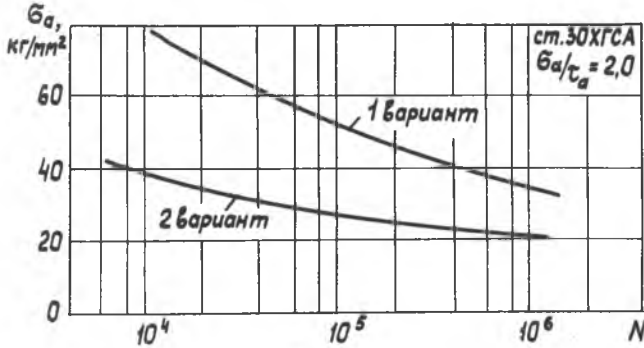


Рис. 6

3. Частота программных нагрузок составляла 10 герц. Блок программной нагрузки - симметричный, 16-ступенчатый - строился на основании статистической обработки реализаций случайного процесса по методу всех положительных максимумов [5]. Длительность блока принималась равной 104 секундам. Разбивка времени между ступенями блока показана в таблице 3. Здесь же в качестве примера даны значения напряжений, соответствующих одному из уровней, на котором проводились усталостные испытания при $\sigma_{max}/\tau_{max} = \infty$.

Таблица 3

№ ступени	I	2	3	4	5	6	7	8
Длительность ступени, сек	22	11	9	4	2	2	1	1
Амплитуда напряжения ступени, кг/мм ²	11,5	23	34,5	46	57,5	69	80,5	92

Кривые усталости, описывающие поведение материала 30XГСА при программном нагружении, показаны на рис. 7.

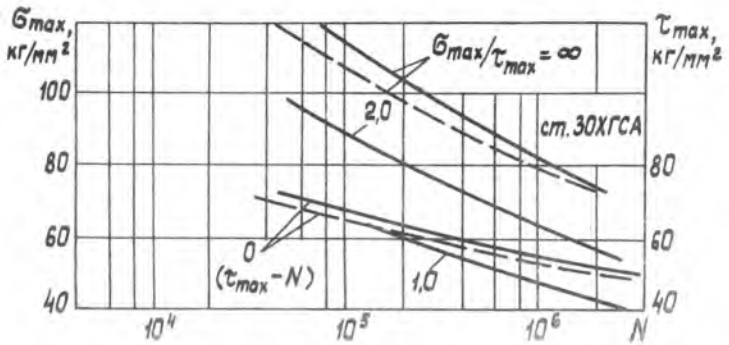


Рис. 7

4. Для исследования усталостной прочности образцов при случайном нагружении был смоделирован стационарный случайный процесс, подчиняющийся нормальному распределению с математическим ожиданием, равным нулю. Весь спектр мощности располагался в диапазоне частот 0 ± 20 герц. В этом диапазоне спектральная плотность процесса имела максимумы на трех преобладающих частотах (3,7; 9,1; 17,1 герц). При моделировании особое внимание было уделено задаче сохранения постоянства в процессе эксперимента среднего значения процесса и дисперсии.

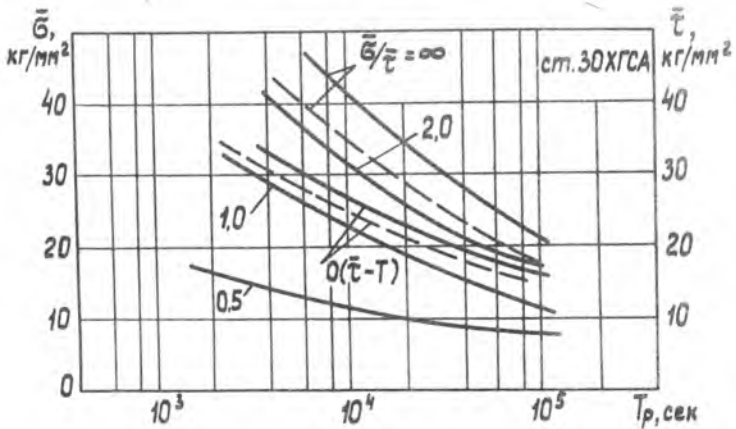


Рис. 8

В процессе испытаний варьировалось соотношение между дисперсиями или среднеквадратичными значениями нормальных и касательных напряжений. Оно принималось равным 0; 0,5; 1,0; 2,0 и ∞ . За долговечность образцов принималось время T в секундах.

Диаграммы усталости для случайного режима нагружения представлены на рис. 8.

ВЫВОДЫ

1. Как при гармоническом нагружении, так и при программных и случайных нагрузках по мере снижения отношения σ/τ долговечность образцов падает. Наименьшая долговечность наблюдается при отношении 0,5.

2. При гармоническом нагружении со сдвигом фаз долговечность образцов ниже, чем при синфазном нагружении.

3. Повышение частоты крутильных колебаний по сравнению с изгибными при совместном их действии ведет к существенному снижению характеристик усталости.

4. При программных и случайных нагрузках видимая усталостная трещина появляется на более ранней стадии, чем при гармоническом характере нагружения.

Л и т е р а т у р а

1. Гудков А.И., Лешаков П.С., Райков Л.Г. Внешние нагрузки и прочность летательных аппаратов. М., Оборонгиз, 1963.

2. Вигнес Э. Измерения, технические условия и методы испытаний. - В кн.: Случайные колебания. М., "Мир", 1967.

3. Элли В.Л., Ледбеттер Ц.К. Расчет и измерение собственных колебаний многоступенчатых ракет-носителей. "Ракетная техника и космонавтика", № 2, 1963.

4. Иванченко В.И., Тимшин В.Т. Установка для усталостных испытаний материалов при сложном напряженном состоянии. - В сб.: Вопросы прикладной механики в авиационной технике. Вып. 69. Труды КуАИ, 1974.

5. Хазанов Х.С., Лавров Б.А., Иванченко В.И., Петровичев М.А. Исследование влияния формы спектральной плотности стационарной случайной нагрузки на усталостную прочность образцов из сплава Д16АТ и ЗОХСА. - В сб.: Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Вып. 29. Труды КуАИ, 1967.