

ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ  
АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Межвузовский сборник, вып. 3, 1977

УДК 539.431

Е.В.Гиацинтов, Г.Г.Белоусов, А.С.Серегин, Э.В.Дунаев

СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ СПЛАВОВ АВ, В91 и Д1  
ПРИ ПРОГРАММНОМ НАГРУЖЕНИИ

Изучению сопротивления усталости алюминиевых сплавов при программном нагружении посвящено много работ, однако еще не найдены обобщающие зависимости, позволяющие надежно прогнозировать долговечность без экспериментальной проверки величины суммы относительных долговечностей. Частично это объясняется тем, что накопление повреждений обычно исследуется на отдельных сплавах, причем спектры нагрузок чаще всего не претерпевают каких-либо изменений в процессе испытаний отдельных серий образцов. Кроме того, очень мало исследованы вопросы подобия при нестационарном нагружении.

В настоящей работе приводятся результаты стационарных и программных испытаний образцов (гладких полированных  $\phi$  8 мм) из сплавов АВ, В91, Д1, а также образцов с концентрацией напряжений ( $\alpha_E = 1,45$ ;  $\alpha_G = 2,27$ ), имевших диаметр рабочей части 40 мм и моделей коробчатого сечения из сплава АВ.

Испытания проводились на машинах МУИ-6000, МВП-10000, У-167 и электродинамическом вибростенде П-647. Изменения напряжений в образцах при их испытаниях осуществлялись устройствами, по принципу работы аналогичными с описанными в работе [1].

Исследования сопротивления усталости проводились как при постоянных амплитудах напряжений (стационарное нагружение), так и по программам, представленным в относительных координатах на рис.1. Сплошными ступенчатыми линиями показаны программы испытаний сплава Д1, пунктирной — сплавов АВ и В91. Количество ступеней в программах испытаний сплава Д1 было выбрано равным пятнадцати.

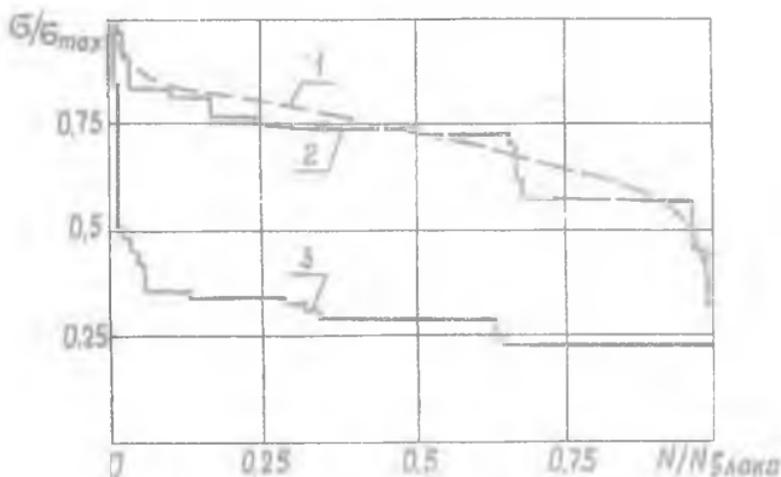


Рис. 1

Программы № 1 и № 2, по которым была проведена основная масса испытаний, близки друг другу. Они характерны тем, что основная доля напряжений, составляющих блок, равна примерно  $0,75 \sigma_{max}$ . Продолжительность действия этих напряжений  $\approx 50\%$  от всей емкости программного блока.

Программа № 3 выглядит значительно контрастнее по сравнению с программами № 1 и № 2. Характерным для нее является наличие резко выраженных максимальных напряжений относительно малой продолжительности ("пиковые" напряжения). Общая доля напряжений, превышающих  $0,5 \sigma_{max}$ , составляет  $\approx 2\%$  от всей длительности программы.

Кривые усталости, полученные в результате испытаний и соответствующие вероятности разрушения  $P = 50\%$ , показаны на рис. 2. По оси ординат здесь откладывались максимальные амплитуды напряжений программных блоков. Кривые усталости показывают, что уменьшение напряженности программных блоков и трансформация самих программ в сторону уменьшения количества относительно больших напряжений приводит к увеличению долговечности (составление проводится при равенстве  $\sigma_{max}$ ). На расположение кривых усталости также влияет способность материалов более или менее интенсивно накапливать повреждения в процессе воздействия

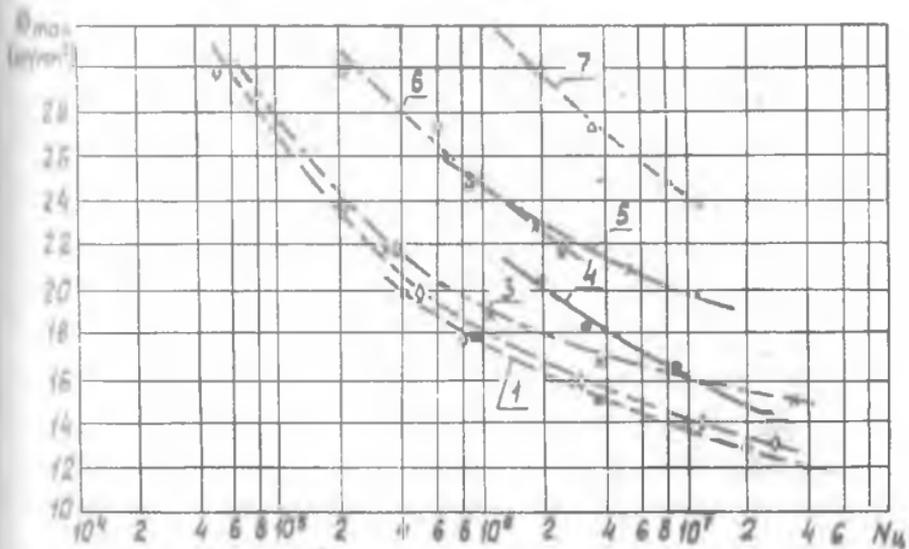


Рис. 2

ни них циклических напряжений. Так кривые усталости сплавов В91 и Д1, полученные при стационарных испытаниях гладких полированных образцов, отличаются по величине ограниченных пределов выносливости на  $1 - 2 \text{ кг/мм}^2$ . Однако кривые усталости этих же сплавов, испытанных по схожим программам (№1 и №2), практически совпадают.

Сопоставление кривых усталости сплавов АВ и Д1, испытанных по этим же программам, показывает, что они заметно отличаются друг от друга (разница в пределах выносливости превышает  $3 \text{ кг/мм}^2$ ).

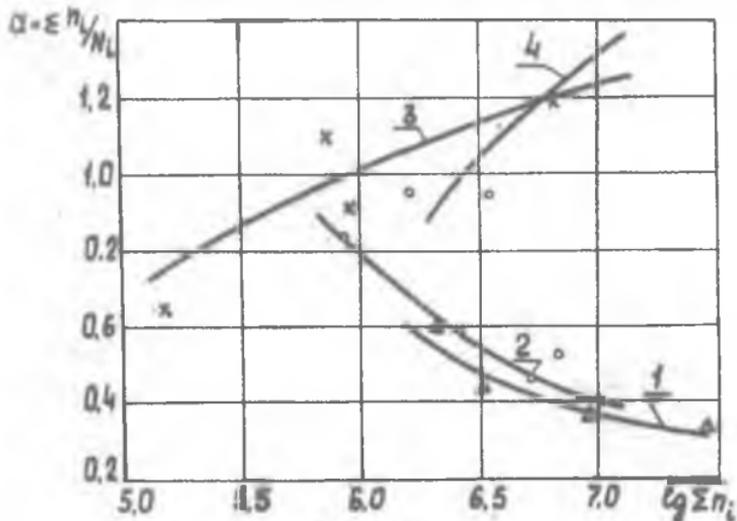


Рис. 3

В то же время кривые усталости, полученные для этих сплавов при стационарном нагружении, отличаются по пределам выносливости менее чем на  $0,5 \text{ кг/мм}^2$ . Все это говорит о том, что сплав ДІ по сравнению со сплавами АВ и В9І более устойчив к действию нестационарных нагрузок.

Большая устойчивость сплава ДІ к воздействиям нестационарных нагрузок подтверждается и тем, что значения сумм относительных долговечностей, определенные в результате проведенных исследований, оказались больше, чем для сплавов АВ и В9І (рис. 3).

Сумма относительных долговечностей сплава ДІ, испытанного по программе № 2, более чем в 2 раза превышает сумму относительных долговечностей сплава АВ и в 1,5 раза - сплава В9І.

Величина  $\sum n_i/N_i$  в зависимости от долговечности до разрушения также зависит от типа сплава. Так для сплавов АВ и В9І эта зависимость носит убывающий характер. Для сплава ДІ в диапазоне долговечностей от  $2 \cdot 10^5$  до  $3 \cdot 10^6$  циклов значения сумм относительных долговечностей возрастают.

Испытания гладких образцов из сплава ДІ по программе с "пиковыми" напряжениями (№ 3) показали, что значения  $\sum n_i/N_i$  не имеют заметного уменьшения от 1, в то время как для ряда конструкционных сталей чаще наблюдается обратная картина [2-4].

Для оценки влияния продолжительности воздействия "пиковых" напряжений на сопротивление усталости проводились испытания сплава ДІ по программе № 3, которая была видоизменена. Изменения заключались в том, что продолжительность ступеней блока, при которых напряжения превышают  $0,5 \sigma_{\text{max}}$ , была увеличена в 10 и 40 раз. Емкость блока при этом оставалась прежней за счет пропорционального уменьшения продолжительности действия остальных амплитуд напряжений. В результате проведенных испытаний (при  $\sigma_{\text{max}} = 27,5 \text{ кг/мм}^2$ ) получены значения  $\sum n_i/N_i$ , равные 0,75 при 10-кратном увеличении и 1,2 - при 40-кратном. Таким образом, и в этом случае наблюдается высокая стабильность сплава ДІ к воздействию нестационарных нагрузок.

Как уже отмечалось выше, для исследования влияния концентрации напряжений, масштабного фактора и вопросов подобия были испытаны крупногабаритные образцы, образцы с концентрацией напряжений и модели из сплава АВ. Испытания проводились при стационарном нагружении и по программе № 1 (рис. 1).

Оценка влияния концентрации напряжений и масштабного фактора производилась с помощью эффективных коэффициентов концентрации  $K_\sigma = \frac{\sigma}{\sigma_{-1k}}$  и коэффициентов влияния абсолютных размеров

$\varepsilon_{\sigma} = \frac{\sigma - 11}{\sigma - 1}$ . Значения величин  $K_{\sigma}$  и  $\varepsilon_{\sigma}$  для различной долговечности и вероятности разрушения приведены в таблицах 1 и 2.

Сопоставление значений коэффициентов  $K_{\sigma}$  и  $\varepsilon_{\sigma}$ , подсчитанных по результатам программных и стационарных испытаний, указывает на общие закономерности изменения влияния концентрации напряжений и размеров образцов на сопротивление усталости в зависимости от долговечности и вероятности разрушения.

В частности, следует отметить, что с увеличением числа циклов до разрушения влияние концентрации напряжений несколько возрастает.

Переход к меньшим вероятностям разрушения сопровождается увеличением коэффициентов  $K_{\sigma}$  и  $\varepsilon_{\sigma}$ , при этом они стремятся к своим предельным значениям ( $K_{\sigma} \rightarrow \alpha$ ,  $\varepsilon_{\sigma} \rightarrow 1$ ). Таким образом, при программных испытаниях, так же как и при испытаниях с постоянной амплитудой напряжений [5], с уменьшением вероятности разрушения влияние концентрации напряжений усиливается, а масштабного фактора ослабевает.

При исследовании влияния конструкционных параметров образцов на накопление повреждений было установлено, что между значениями сумм относительных долговечностей и логарифмом критерия подобия усталостного разрушения  $\lg \frac{L}{G}$  ( $L$  - периметр наиболее нагруженной части образца и детали,  $G$  - относительный градиент первого главного напряжения в зоне наибольшей напряженности [6]) существует линейная зависимость. Это подтверждается графиками, приведенными на рис. 4. Здесь помимо результатов испытаний

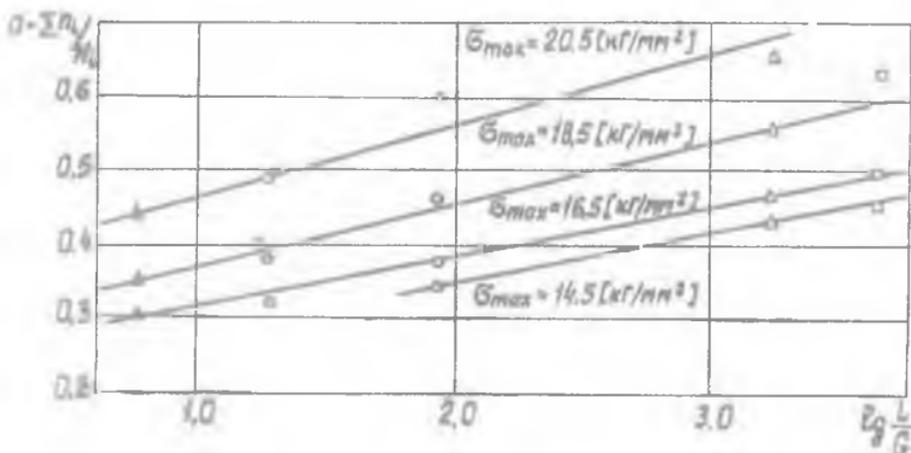


Рис. 4

Таблица 1

$\alpha_{\sigma}$	Долговечность в циклах	$K_{\sigma}$				
		P = 1%	P = 5%	P = 10%	P = 30%	P = 50%
1,45	$1 \cdot 10^6$	$1,44 / 1,41$	$1,43 / -$	$1,42 / 1,39$	$- / 1,37$	$- / 1,36$
	$2 \cdot 10^6$	$1,44 / 1,41$	$1,44 / -$	$1,42 / 1,40$	$1,40 / 1,38$	$1,38 / 1,36$
	$5 \cdot 10^6$	$1,45 / 1,43$	$1,44 / -$	$1,43 / 1,43$	$1,41 / 1,42$	$1,39 / 1,37$
2,27	$1 \cdot 10^6$	$2,20 / 2,11$	$2,16 / -$	$2,13 / 1,97$	$- / 1,91$	$- / 1,86$
	$2 \cdot 10^6$	$2,22 / 2,15$	$2,16 / -$	$2,14 / 1,97$	$2,11 / 1,89$	$2,11 / 1,88$
	$5 \cdot 10^6$	$2,25 / 2,20$	$2,23 / -$	$2,20 / 2,00$	$2,16 / 1,97$	$2,14 / 1,90$

Таблица 2

База испытаний $N_{ц}$	$\xi_{\sigma}$				
	P = 1%	P = 5%	P = 10%	P = 30%	P = 50%
$2 \cdot 10^6$	$0,99 / 0,95$	$0,98 / 0,92$	$0,97 / 0,91$	$0,95 / 0,89$	$0,93 / 0,87$
$5 \cdot 10^6$	$0,99 / 0,93$	$0,98 / 0,92$	$0,96 / 0,89$	$0,94 / 0,88$	$0,93 / 0,85$
$1 \cdot 10^7$	$- / 0,91$	$- / 0,90$	$0,96 / 0,89$	$0,94 / 0,86$	$0,92 / 0,85$

ПРИМЕЧАНИЕ: в числителе - значения  $K_{\sigma}$  и  $\xi_{\sigma}$  при программных испытаниях; в знаменателе - значения  $K_{\sigma}$  и  $\xi_{\sigma}$  при испытаниях с постоянной амплитудой напряжений.

образцов приведены значения  $\sum \sigma_i / N_i$  пресованных моделей коробчатого сечения, изготовленных из заготовок лонжеронов несущего винта вертолета. Как при испытании образцов, так и при испытании моделей с уменьшением уровня напряженности значения  $\sum \sigma_i / N_i$  снижаются. Однако при напряжениях  $\sigma_{\max} \leq 14,5 \text{ кг/мм}^2$  (что соответствует  $N \geq 10^6$  циклов) они остаются практически постоянными. Таким образом, нижняя прямая является предельной для образцов и моделей из сплава АВ, работающих по программе нагруженности № 1.

### В ы в о д ы

1. Сплав Д1 является более устойчивым к воздействию нестационарных нагрузок по сравнению со сплавами АВ и В91.
2. При программном нагружении с уменьшением вероятности разрушения влияние на сопротивление усталости концентрации напряжений усиливается ( $K_\sigma \rightarrow \alpha_\sigma$ ), а масштабного фактора ослабевает ( $\xi_\sigma \rightarrow 1$ ).
3. Между логарифмом критерия подобия усталостного разрушения и значениями сумм относительных долговечностей существует линейная зависимость.

### Л и т е р а т у р а

1. Литвак В.И. Автоматизация усталостных испытаний натуральных конструкций. М., "Машиностроение", 1972.
2. Вандышев В.П. Накопление усталостных повреждений стали 45 при действии "пиковых перегрузок". М., "Машиноведение", № 6, 1966.
3. Вандышев В.П. Об упруго-пластических деформациях и кинетике разрушения стали при усталостном нагружении с "пиковыми" перегрузками. Сб. "Общие проблемы машиностроения", М., "Наука", 1967.
4. Коновалов Л.В., Нистратов Н.И., Тимошук Л.Т. Методика оценки "пиковых" нагрузок на усталостную прочность крупногабаритных образцов при переменном нагружении. "Заводская лаборатория", № 1, 1967.
5. Степнов М.Н. Влияние конструктивных факторов на распределение долговечности легких сплавов. "Заводская лаборатория", № 2, 1967.
6. Серенсен С.В., Громан М.Б., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Валы и оси. Конструирование и расчет. М., "Машиностроение", 1970.