

# IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ ГТД

УДК 539.4

Л. А. Козлов, Б. Ф. Балашов

## СУММИРОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ И ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Развитие статистических представлений о сопротивлении усталости и о напряжениях, действующих в эксплуатационных условиях, связано с разработкой вероятностных методов расчета для оценки вероятности разрушения и статистических запасов прочности [1, 2].

В связи с этим в последнее время широко изучались закономерности сопротивления усталости при действии изменяющихся во времени переменных напряжений, превышающих предел выносливости (перегрузок). Исследования проводились как при однократной перегрузке, так и при программном нагружении [3, 4]. Классификация критериев сопротивления усталости, применяемых для оценки результатов испытаний на усталость с перегрузками, приведена на рис. 1.

Испытания с однократной перегрузкой проводятся по следующей схеме:

1. Образец нагружается переменным напряжением  $\sigma_n > \sigma_{-1}$  в течение определенного числа циклов  $n_n$  и затем испытывается до разрушения в течение  $n_k$  циклов при контрольном напряжении  $\sigma_k$ , которое может быть принято большим, равным или меньшим исходного предела выносливости.

2. По полученным результатам испытаний могут определяться:

— кривая повреждаемости, ограничивающая область безопасных перегрузок, если контрольное напряжение  $\sigma_k = \sigma_{-1}$  и образец не разрушается до числа циклов  $n_k \geq N_0$  (рис. 1, а);

— кривая изменения относительной долговечности  $(N_k - n_k)/N_k$ , если контрольное напряжение  $\sigma_k > \sigma_{-1}$  (рис. 1, б);

— снижение исходного предела выносливости, если контрольное напряжение  $\sigma_k < \sigma_{-1}$  и число циклов  $n_k \geq N_0$  (рис. 1, в);

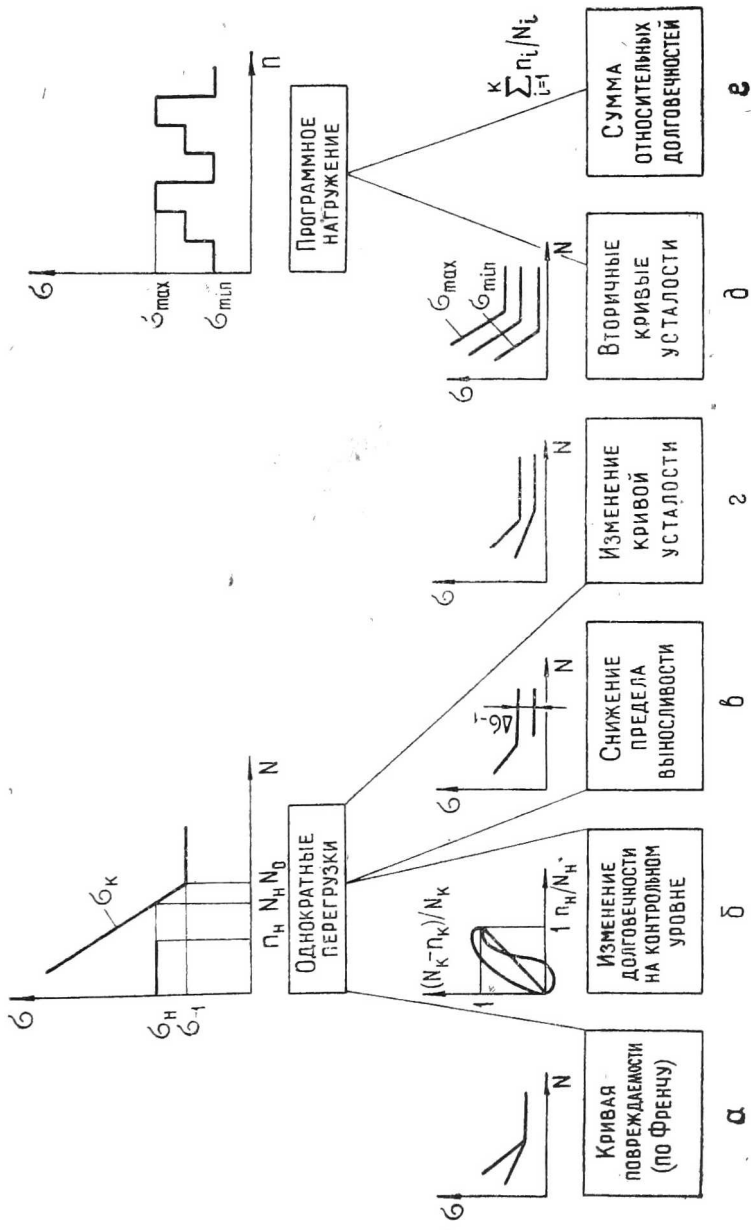


Рис. 1. Классификация критериев сопротивления усталости

— кривая усталости, учитывающая начальные повреждения при различных контрольных напряжениях  $\sigma_k \geq \sigma_{-1}$  (рис. 1, *з*).

Испытания с программным нагружением позволяют получить вторичные кривые усталости (рис. 1, *д*) и обосновать условия суммирования усталостных повреждений в пределах левой ветви кривой усталости (рис. 1, *е*).

Вторичные кривые усталости могут быть построены в различных координатах: по оси абсцисс — суммарное число циклов до разрушения, а по оси ординат — одно из действующих перегрузочных напряжений  $\sigma_{\max}$  или  $\sigma_{\min}$ ; напряжение с наибольшей длительностью действия  $t_{i \max}$ ; напряжение с наибольшей приведенной к максимальному напряжению длительностью действия  $t_i^* \max = t_i (\sigma_i / \sigma_{\max})^m$ ; напряжение, характеризующее максимальное повреждение  $(n_i / N_i)_{\max}$  и т. д.

Из большого числа разработанных оценок усталостного повреждения практическое применение нашли лишь два критерия, используемые в расчетах на прочность при нестационарном нагружении: снижение исходного предела выносливости в результате повреждающего действия напряжений, превышающих предел выносливости [4] (рис. 1, *в*, *г*, *д*), и суммирование усталостных повреждений в пределах левой ветви кривой усталости (рис. 1, *е*). В данной работе рассматриваются оба критерия, для второго дается экспериментальное обоснование и использование в расчетах на прочность.

#### СНИЖЕНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПРИ ПЕРЕГРУЗКАХ

Снижение предела выносливости в результате повреждающего действия напряжений, превышающих предел выносливости, показано на рис. 2, где приведены исходная кривая 1 усталости, кривая 2 действующих напряжений и кривая 3 снижения исходного предела выносливости. При регулярном нагружении  $\sigma = \text{const}$  ( $\sigma > \sigma_{-1}$ ) для функции  $\sigma'_{-1} = \Psi(n)$  были предложены различные выражения [4], в том числе зависимость С. В. Серенсена

$$\sigma'_{-1} = \sigma_{-1} \left[ 1 - \frac{n_n}{N_n} \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_{-1}} - 1 \right) K \right],$$

где  $K$  — параметр, характеризующий снижение предела выносливости.

В случае блочного нагружения при определении снижения предела выносливости используется двухступенчатая нагрузка (рис. 3). Показано снижение предела выносливости при регулярном нагружении  $\sigma_1 > \sigma_{-1}$  и  $\sigma_2 > \sigma_{-1}$ .

При действии напряжения  $\sigma_1$  в течение числа циклов  $n_1$  в результате повреждения предел выносливости снижается по линии 1—2. Переход на ступень нагружения  $\sigma_2$  происходит по го-

горизонтальной линии 2—3, и дальнейшее снижение предела выносливости при действии напряжения  $\sigma_2$  в течение  $n_2$  циклов происходит по линии 3—4. Повторение ступенчатых блоков ( $\sigma_1, n_1; \sigma_2, n_2$ ) приводит к снижению предела выносливости по ступенчатой линии до разрушения. Используя схему рис. 3, можно определить долговечность до разрушения при блочном многоступенчатом нагружении.

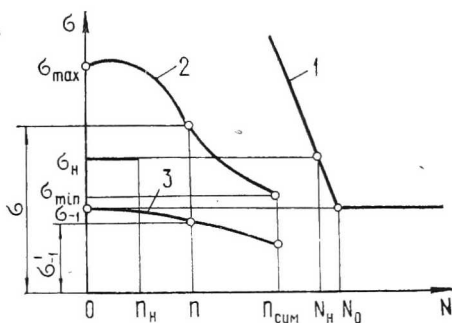


Рис. 2. Снижение предела выносливости при перегрузках:  
 1 —  $\sigma^m N = \text{const}$ ; 2 —  $\sigma = F(n)$ ;  
 3 —  $\sigma'_{-1} = \Psi(n)$

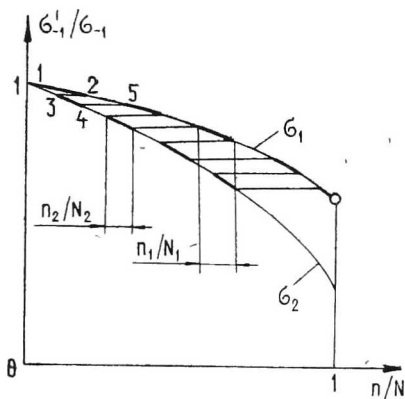


Рис. 3. Схема накопления усталостного повреждения и снижения предела выносливости при блочном нагружении

Не исключен также вычислительный подход при определении предела выносливости  $\sigma'_{-1}$  поврежденного материала. При регулярном нагружении  $\sigma = \text{const}$  ( $\sigma > \sigma_{-1}$ ) расчетное выражение для вычисления предела выносливости  $\sigma'_{-1}$  можно получить из уравнения кривой усталости поврежденного материала в предположении  $m = \text{const}$  и  $N_0 = \text{const}$ :  $(N - n)\sigma^m = N_0\sigma'_{-1}{}^m$ ,

откуда

$$\sigma'_{-1} = \sigma_{-1} (1 - n/N)^{1/m}.$$

Аналогично записываются приближенные выражения для многоступенчатой перегрузки

$$\sigma'_{-1} = \sigma_{-1} \prod_{i=1}^k (1 - n_i/N_i)^{1/m},$$

$$\sigma'_{-1} = \sigma_{-1} \left\{ 1 - \sum_{i=1}^k [1 - (1 - n_i/N_i)^{1/m}] \right\}.$$

Если перегрузка характеризуется функцией плотности  $\varphi(\sigma)$  распределения напряжений, то предел выносливости поврежденного материала  $\sigma'_{-1}$  определяется из интегрального уравнения

$$\sigma'_{-1} = \sigma_{-1} \left\{ 1 - \frac{n_{\text{сум}}}{N_0 \sigma_{-1}^m} \int_{\sigma_{-1}}^{\sigma_{\text{max}}} \sigma^m \varphi(\sigma) d\sigma \right\}^{1/m},$$

где  $\sigma'_{-1}$  — предел выносливости поврежденного материала;  $n_{\text{сум}}$  — суммарное число циклов действия перегрузочных напряжений;  $N_0$  — абсцисса точки перелома кривой усталости;  $\sigma_{\text{max}}$  — максимальное значение напряжений в спектре;  $m$  — показатель кривой усталости.

Подобное выражение для предела выносливости поврежденного материала может быть получено из кинетического уравнения повреждаемости, предложенного И. А. Биргером [5].

### СУММИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Предложено большое число феноменологических гипотез суммирования усталостных повреждений, большая часть которых основывается на рассмотрении суммы относительных долговечностей с тем или иным учетом отклонений этой суммы от простого линейного суммирования [3]. Сумма относительных долговечностей зависит от особенностей нагружения и характеристик сопротивления усталости и ее можно записать для блочного нагружения в следующем виде:

$$\lambda \sum_{i=1}^k n_i / N_i = F(Q, R),$$

где  $\lambda$  — число одинаковых блоков до разрушения;  $Q$  и  $R$  характеризуют соответственно нагружение (величины напряжений в блоке и длительность их действия) и сопротивление усталости.

Экспериментальные исследования условий суммирования усталостных повреждений обычно проводятся при детерминированном блочном нагружении, и закономерности распределения суммы относительных долговечностей оказываются зависящими только от рассеяния характеристик сопротивления усталости при регулярном нагружении. На рис. 4 в качестве примера приведено распределение долговечностей при регулярном и блочном (в двумя ступенями) нагружениях для сплава ЭИ617 при 800°C перегрузками (параметры нагружения  $\sigma_2/\sigma_1 = 33/28 = 1,18$  и  $\beta = n_2/n_1 = 0,1; 1; 10$ ). Аналогичные испытания были проведены для сплава ЭИ437Б при 700°C и 800°C, сплава ЭИ617 при 900°C, а также стали 40ХНМ при 20°C, 300°C и 500°C. Эти испытания показали, что  $S_{lg N}$  при блочном и регулярном нагружениях подчиняется нормальному распределению и не наблюдается существенной разницы в параметрах рассеяния, т. е. условие суммирования повреждений может быть сведено к простому линейному закону.

Во многих случаях параметры нагружения (напряжение, температура, длительность) не являются заданными (детерминированными) величинами, а обладают большим рассеянием и их целесообразно рассматривать как случайные. Однако необходимо иметь в виду, что принципы суммирования повреждений отражают физические закономерности и они не должны зависеть от способа детерминированного или случайного описания процесса накопления повреждений, что использовалось в многочисленных работах по усталости [1, 3, 5].

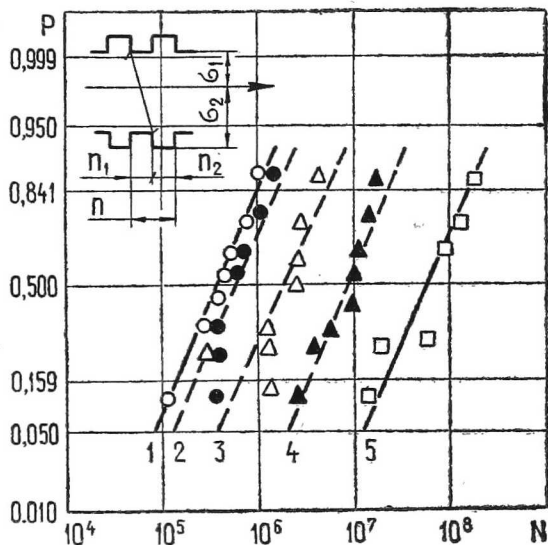


Рис. 4. Результаты испытаний сплава ЭИ617 при 800°C с перегрузками:  $S_{1gN}=0,45$ ; значки — эксперимент; ——— регулярное нагружение, 1 — 330 МПа, 5 — 250 МПа; - - - блочное нагружение, 2 —  $\beta=10$ , 3 —  $\beta=1$ , 4 —  $\beta=0,1$

Сумма относительных долговечностей может вычисляться различными способами:

— по средним значениям долговечностей, рассматриваемым как детерминированные величины,

$$\bar{a} = \sum_{i=1}^k \bar{n}_i / \bar{N}_i = \bar{N}_\Sigma \sum_{i=1}^k t_i / \bar{N}_i;$$

— по долговечностям с одинаковой вероятностью (в предположении, что случайные величины  $n_{i,P}$  и  $N_{i,P}$  строго коррелированы между собой)

$$a_P^* = N_{\Sigma P} \sum_{i=1}^k t_i / N_{i,P};$$

— по долговечностям с вероятностью  $P$  для блочного нагружения и средним значениям долговечностей при регулярном нагружении

$$a_P = N_{\Sigma P} \sum_{i=1}^k t_i / \bar{N}_i.$$

На рис. 5 приведена схема блочного нагружения с  $k$  ступенями нагрузки. Введены обозначения:  $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_k$  — ступени напряжений,  $n_1, n_2, \dots, n_k$  — числа циклов в одном блоке нагружения;  $N_1 < N_2 < \dots < N_k$  — долговечности при регулярном нагружении;  $n_6 = \sum_{i=1}^k n_i$  — число циклов в блоке;  $t_1 = n_1/n_6$ ,  $t_2 = n_2/n_6$ , ...,  $t_k = n_k/n_6$  — относительные длительности ступеней нагружения в блоке;  $\lambda$  — число одинаковых блоков до разрушения;  $N_{\Sigma} = \lambda n_6$  — общее число циклов до разрушения при блочном нагружении.

Как показали многочисленные экспериментальные исследования, суммы относительных долговечностей  $\bar{a}$  и  $a_P^*$  практически одинаковы и являются детерминированными величинами, в то время как сумма  $a_P$  оказывается случайной величиной, распределение которой зависит от распределения характеристик сопротивления усталости при регулярном нагружении. При  $P = 0,5$  значения сумм относительных долговечностей тождественно равны:  $\bar{a} = a_{P=0,5}^* = a_{P=0,5}$ .

Рассмотрим сумму относительных долговечностей с учетом отклонения этой суммы от результата простого линейного суммирования и сопоставим между собой соответствующие оценки для  $N_{\Sigma}$  [3]:

$$\lambda \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = \frac{N_{\Sigma}}{N_1} \sum_{i=1}^k t_i \frac{N_1}{N_i} = \begin{cases} 1; & N_{\Sigma} = 1 \frac{N_1}{\sum_{i=1}^k t_i (\sigma_i/\sigma_1)^m}; \\ a; & N_{\Sigma} = a \frac{N_1}{\sum_{i=1}^k t_i (\sigma_i/\sigma_1)^m}; \\ \neq 1; & N_{\Sigma} = \frac{N_1}{\sum_{i=1}^k t_i (\sigma_i/\sigma_1)^q}; \end{cases}$$

$$\lambda \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \omega_i = \frac{N_{\Sigma}}{N_1} \bar{\omega} \sum_{i=1}^k t_i \frac{N_1}{N_i} = 1; \quad N_{\Sigma} = \frac{1}{\bar{\omega}} \frac{N_1}{\sum_{i=1}^k t_i (\sigma_i/\sigma_1)^m}.$$

Таким образом, предложенные феноменологические гипотезы суммирования усталостных повреждений заключаются в том,

что учитывается отклонение от результата простого линейного суммирования путем введения множителей  $a$ ,  $1/\sqrt{\omega}$  или изменения показателя  $m$  на  $q$  кривой усталости, по которой проводится суммирование.

Наибольшее практическое использование в расчетах на прочность получило суммирование в форме  $\lambda \sum_{i=1}^k n_i/N_i = a$  и поэтому большое число экспериментальных работ посвящено исследованию характеристики  $a$  сопротивления перегрузкам.

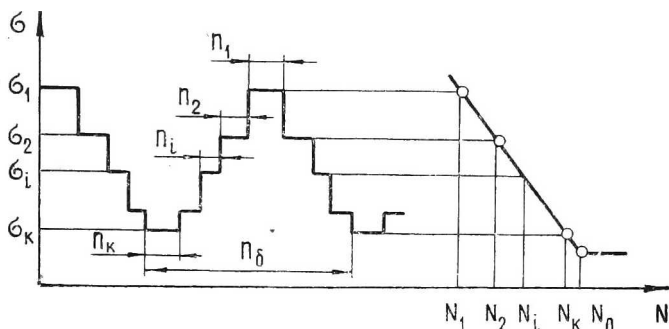


Рис. 5. Блок нагружения с  $k$  ступенями нагрузки

В результате анализа большого числа экспериментальных данных установлено, что значение  $a$  уменьшается с увеличением отношения  $\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$  и с уменьшением относительного времени действия максимальных напряжений. Также установлено, что амплитуды напряжений, не превышающие предел выносливости, могут оказывать повреждающее действие при наличии в блоке нагружения амплитуд  $\sigma_a > \sigma_{-1}$  [6]. При кратковременных весьма высоких напряжениях («пиковые» нагрузки,  $\sigma_{\max}/\sigma_{-1} = 1,5-2$ ) и малой их длительности ( $t_{\sigma_{\max}} \leq 0,01$ ) в сочетании с основной нагрузкой, близкой к пределу выносливости ( $\sigma_{\text{осн}}/\sigma_{-1} = 1,01-1,1$ ), экспериментальные значения  $a$  могут составлять доли единицы.

При вычислении запаса прочности (детерминированного и статистического) значение суммы относительных долговечностей  $a$  входит под знаком корня степени  $m$  (обычно  $m = 5-15$ ) и величина  $\sqrt[m]{a} \approx 1 \pm 0,1$  (экспериментальные значения  $a = 0,3-2$ ) мало сказывается на расчетном запасе. Поэтому при вычислении запаса прочности можно принимать  $a = 1$ , т. е. использовать простое линейное суммирование.

Сопоставление результатов моделирования испытаний на усталость с суммированием усталостных повреждений по различным гипотезам показало, что отклонение от простого линейного закона суммирования нельзя признать значимым и при-



кладные инженерные расчеты можно выполнять на основе линейного закона [7].

В заключение необходимо отметить, что при нестационарном нагружении деталей в эксплуатации уровни действующих напряжений при многоциклового усталости оказываются существенно ниже исходного предела выносливости и закономерности суммирования усталостных повреждений используются при подобном преобразовании спектра действующих нагрузок для возможности определения запаса прочности по напряжениям, а также в связи со снижением сопротивления усталости детали в эксплуатации (коррозионно-эрозионное повреждение, механические повреждения, изменение свойств от воздействия температуры) при многоциклового усталости для назначения сроков регламентных осмотров [1].

Весьма актуальными являются вопросы суммирования повреждений при малоциклового усталости для определения запаса по долговечности (по числу циклов  $N$ ) в связи с назначением эксплуатационного ресурса.

## Л и т е р а т у р а

1. Серенсен С. В., Когаев В. П., Козлов Л. А., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1975.
2. Биргер И. А. Вероятность разрушения, запасы прочности и диагностики.— В кн.: Проблемы механики твердого деформируемого тела. Л., 1970.
3. Прочность при нестационарных режимах нагрузки: сб. /Под ред. С. В. Серенсена. Киев: АН УССР, 1961.
4. Балашов Б. Ф., Козлов Л. А. Критерии сопротивления усталости при нестационарной нагруженности.— Проблемы прочности, 1974, № 1.
5. Биргер И. А. Детерминированные и статистические модели суммирования повреждений.— Проблемы прочности, 1978, № 11.
6. Серенсен С. В., Когаев В. П. Долговечность деталей машин с учетом вероятности разрушения при нестационарном переменном нагружении.— Вестник машиностроения, 1966, № 1.
7. Болотин В. В., Ермоленко А. Ф. Суммирование усталостных повреждений и статистический разброс прочности.— Машиноведение, 1979, № 1.

УДК 621.438-226.001.24

*В. Н. Альперт, Н. А. Филиппова*

## ПРОЕКТИРОВОЧНЫЙ И ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТЫ ТУРБИННОГО ДИСКА

При проектировании турбинных дисков учет многорежимности и цикличности нагружения обычно проводят предварительным увеличением запасов статической прочности. В последующем