Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. LXXXVII, 1981 г.

УДК 621.81

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Е.С.КУЗНЕЦОВ

Подавляющее большинство деталей машин и транспортных устройств подвержены переменным нагрузкам, подчиняющимся общим статистическим закономерностям. Переменные нагрузки постоянного уровня - стационарные, а изменяющегося (в первую очередь, с меняющейся амплитудой $\sigma_a$ или $\tau_a$ ) - нестационарные. Значительная часть машин (прессы, станки, автомобили, тракторы, экскаваторы, горные, транспортные и другие машины) работает при нестационарных режимах. К машинам, работающим в постоянном (маломеняющемся во времени) режиме относятся машины центральных силовых и насосных станций, транспортные машины для работы на длинных линиях.

Для большинства технологических и транспортных машин записаны действующие нагрузки в функции времени и имеется обобщающая эксплуатационная информация о нагрузках [I], которая говорит о том, что в общем случае переменными являются как амплитуды, так и средние значения нагрузок и напряжений. При тензометрировании осциллограммы носят довольно сложный характер, и для практического использования их систематизируют, причем непрерывное изменение нагрузок заменяют дискретным и общий диапазон разбивают на I0-I5 интервалов [3].

При уточненных расчетах напряжения могут быть приведены к симметричному знакопеременному циклу [4]

$$\sigma_{a\,экв} = \sigma_a + \Psi \sigma_m , \qquad (I)$$

где $\sigma_a$ - половина размеха между максимальным и ближайшим минимальным значением напряжения полуцикла (рис.I); $\sigma_m$ - среднее значение напряжений того же полуцикла; $\Psi$ - коэффициент асимметрии цикла.

Сначала подсчитывают размахи, не превышающие двух интервалов, затем их исключают из осциллограмм и выбирают размахи до трех интервалов и т.д. При условии учета средних напряжений проводится двухпараметрическая схематизация - построение корреляционных таблиц.

Известно около 20 методов систематизации процессов нагружения, случайных по амплитуде и коэффициенту асимметрии. Наиболее адекватным являет-

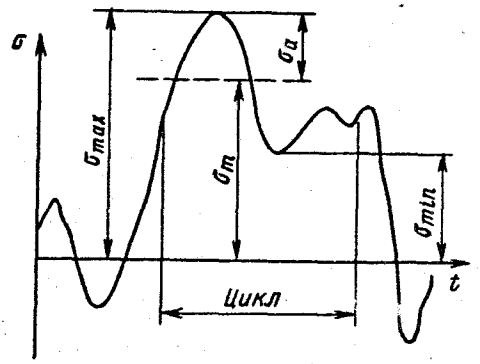



Рис.1. Общий цикл изменения напряжений

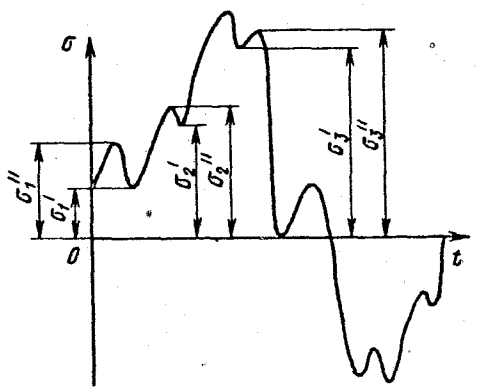



Рис.2. Метод систематизации по полным циклам

ся процесс систематизации по полным циклам. Для каждого максимума $\sigma_i''$ находят парный минимум $\sigma_i'$, расположенный справа от него, если процесс нарастает, или слева, если процесс убывает (рис.2). Оставшиеся несгруппированными после первого прохода экстремумы группируют по этому же принципу при втором проходе осциллограммы.

Если после второго прохода остаются несгруппированные экстремумы, делают третий проход, который, как правило, является исчерпывающим. Пары максимума и минимума, полученные в результате этих проходов (подсчетов), заносят в соответствующие клетки таблицы (см.таблицу) с помощью определенных знаков, например кружочков. После этого подсчитывают число попаданий $n_i$ в каждую клетку корреляционной таблицы, определяют значения

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad \text{и} \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

и по формуле (I) находят величину эквивалентного напряжения $\sigma_{a\,экв\,i}$ симметричного цикла. В результате появляется массив случайных значений $\sigma_{a\,экв\,i}$, каждое из которых повторяется $n_i$ раз; по этому массиву и строят гистограмму

$$p_i^* / \Delta\sigma_{a\,экв\,i} = f(\sigma_{a\,экв\,i}),$$

где $p_i^*$ - статистическая вероятность попадания напряжения (нагрузки) в данный интервал корреляционной таблицы, $p_i = n_i / \sum n_i$; $n_i$ - число попаданий в данный интервал; $\sum n_i$ - общее число экспериментальных данных.

По мере сужения интервала напряжений, т.е. при более тонком разделении амплитуд, ступеньки будут сглаживаться и в пределе ступенчатая диаграмма превратится в непрерывную кривую, называемую спектром распределения амплитуд $f(\sigma_{a\,экв})$ (рис.3). Спектр является основной характеристикой нестационарных циклов. При достаточно большом числе замеренных амплитуд можно считать, что спектр, полученный для блока, является одновременно спектром всего срока службы детали в данных условиях эксплуатации.

Предлагают и другие методы обработки осциллограмм [3], преследующие в общем одну и ту же цель - найти наиболее правильную меру оценки больших и малых амплитуд и определить степень их влияния на процесс разрушения.

Корреляционная таблица

| $\sigma_{min}$ | $\sigma_{max}$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $\sigma_A-\sigma_B$ | $\sigma_B-\sigma_C$ | $\sigma_C-\sigma_D$ | ... | $\sigma_k-\sigma_{k+1}$ |
| $\sigma_a-\sigma_b$ | ooooo | oooo | | | |
| $\sigma_b-\sigma_c$ | oooo | | | | |
| $\sigma_c-\sigma_d$ | | | | | oooooo |
| ... | | | | ooo | oooo<br>oooo |
| $\sigma_k-\sigma_{k+1}$ | | | oooo<br>oooo | ooo<br>oooo | ooo<br>oooo |

Примечание. $\sigma_A$, $\sigma_a$, ..., $\sigma_{k+1}$ - численные значения постоянных интервалов напряжений.

После построения спектра распределения амплитуд переходят к расчету долговечности. Для этого вводят понятие накопления повреждения: в процессе многократного изменения напряжений в материале накапливаются повреждения, которые приводят к разрушению, причем усталостное повреждение представляет собой некоторую функцию числа циклов. Обычно принимают самую простую гипотезу о том, что каждый оставшийся неизменным цикл добавляет к повреждению одну и ту же величину и повреждения суммируются от цикла к циклу - линейная теория суммирования усталостных повреждений [2, 3]. Она основана на предположении, что доля повреждающего воздействия от каждого напряжения $\sigma_i$ пропорциональна цикловому отношению $z_i / N_i$, т.е.

$$\frac{z_1}{N_1}+\frac{z_2}{N_2}+\cdots+\frac{z_i}{N_i}=a \quad \text{или} \quad \sum\frac{z_i}{N_i}=a\,, \qquad (2)$$

где $z_i$ - фактическое число циклов действия некоторого напряжения $\sigma_i$; $N_i$ - число циклов действия того же напряжения, при котором (образец) деталь разрушается, т.е. циклическая долговечность; $a$ - экспериментально устанавливаемый коэффициент, часто принимаемый (в запас) равным единице.

В действительности величина $0,8 \leqslant a \leqslant 3,2$, т.е. при $a \neq 1$ работает так называемая корректированная линейная теория суммирования повреждаемости (коэффициент $a$ зависит от материала детали, соотношения и последовательности изменения напряжений [4]). Суммирование ведется от напряжения, равного $\sigma_R$ и выше, так как напряжения менее $\sigma_R$ не вызывают повреждающих воздействий на деталь.

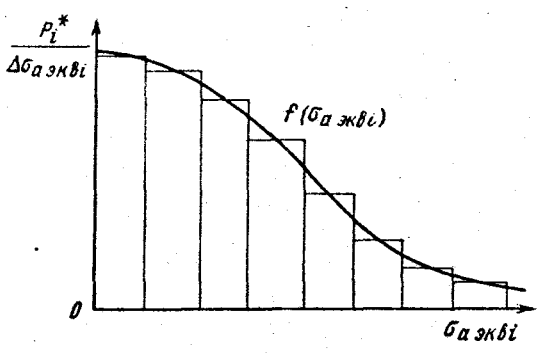



Рис.3. Спектр распределения амплитуд

При принятых обозначениях уравнений кривой выносливости имеет вид

$$\sigma_i^m N_i = \sigma_R^m N_0 = const\,. \qquad (3)$$

Умножая числитель и знаменатель уравнения (2) на $\sigma_i^m$, получим

$$\sum\frac{z_i\,\sigma_i^m}{N_i\,\sigma_i^m}=\sum\frac{z_i\,\sigma_i^m}{N_0\,\sigma_R^m}=a\,.$$

Умножим и разделим данное выражение на общее количество нагружений за весь срок службы детали $N$, тогда искомая средняя долговечность

$$\sum \frac{z_i}{N_0}\frac{\sigma_i^m}{\sigma_R^m}\frac{N}{N}=\frac{N}{N_0}\frac{1}{\sigma_R^m}\sum\frac{z_i}{N}\sigma_i^m=\frac{N}{N_0}\frac{1}{\sigma_R^m}\sum p_i\sigma_i^m=a\ , \qquad (4)$$

где $z_i/N$ - статистическая вероятность появления напряжения $\sigma_i$, $z_i/N = p_i$; $\sigma_R$ - длительный предел выносливости, установленный при базовом числе циклов $N_0$ (с учетом концентрации напряжений).

Средняя долговечность эксплуатируемой детали

$$N=\frac{a\sigma_R^m N_0}{\sum\sigma_i^m p_i}\ . \qquad (5)$$

Из формулы (4) может быть получено условие прочности по величине $\sigma_R$:

$$\sigma_R=\sqrt[m]{\frac{N}{aN_0}\sum\sigma_i^m p_i}\ . \qquad (6)$$

Условием прочности является амплитуда эквивалентного напряжения, действующего $N_0$ циклов и вызывающего такой же повреждающий эффект, как и все напряжения $\sigma_i$, действующие $N$ циклов. Уравнение (6) - граничное условие прочности, т.е. $\sigma_R = \sigma_{a\,экв}$, само условие прочности может быть записано следующим образом:

$$\sigma_R \geq \sqrt[m]{\frac{N}{aN_0}\sum p_i\sigma_i^m}\ . \qquad (6а)$$

Если вместо гистограммы действующих напряжений (рис.3) имеется аппроксимированный теоретический закон плотности распределения действующих напряжений $f(\sigma_{a\,экв})$ (спектр), то в формулах (5)-(6а) знак суммы должен быть заменен знаком интеграла, тогда расчетная долговечность

$$N=\frac{a\sigma_R^m N_0}{\int_{\sigma_R}^{\sigma_{max}}\sigma_{a\,экв}^m f(\sigma_{a\,экв})\,d\sigma_{a\,экв}}\ , \qquad (7)$$

где $f(\sigma_{a\,экв})\,d\sigma_{a\,экв}$ - элементарная вероятность.

Граничное уравнение прочности

$$\sigma_R=\sqrt[m]{\frac{N}{aN_0}\int_{\sigma_R}^{\sigma_{max}}\sigma_{a\,экв}^m f(\sigma_{a\,экв})\,d\sigma_{a\,экв}}\ . \qquad (8)$$

Таким образом, подход к расчету долговечности и прочности детали в условиях нестационарных режимов может быть определен. Однако в его основе лежит слабо подкрепленное упрощающее предположение о линейности накопления повреждений при любых комбинациях амплитуд, поэтому в задачах определения расчетной долговечности деталей окончательное слово принадлежит эксперименту. Опыт показывает, что для любой детали долговечность является резко выраженной функцией напряжений и определить ее в пределах обычной технической погрешности $\pm$10 % весьма затруднительно. Речь идет лишь о

порядковой оценке. В силу этого обнаруживается, что в действительности разрушение происходит не при значении $a = I$, а при $0,I \leqslant a \leqslant 2,0$ (В.П.Когаев указывает на еще более широкий интервал $a$ - от 0,0I до I00 [4]). Однако следует помнить, что теория линейного накопления повреждений имеет ограниченные пределы применимости. Она позволяет достаточно точно определить долговечность детали при таких нестационарных режимах, где все амплитуды превышают предел выносливости и отсутствуют резкие всплески перегрузок.

Для спектров, в которых наряду с малыми амплитудами присутствуют амплитудные значения много большие, чем длительный предел выносливости $\sigma_R$, действительная долговечность оказывается существенно меньшей, чем расчетная ( $a = 0,I \div 0,2$). Для таких типов спектров предложена корректированная теория [5], которая приводит к следующему выражению для расчета накопленных повреждений:

$$a_P = \frac{\sum \sigma_{ai} \frac{z_i}{n_{БЛ}} - K\sigma_R}{\sigma_{a\,max} - K\sigma_R}, \qquad (9)$$

где $z_i$ - число циклов в блоке, соответствующее амплитуде $\sigma_{ai}$ ; $n_{БЛ}$ - общее число циклов в блоке нагружения; $K = 0,5 \div 0,7$; $\sigma_{a\,max}$ - максимальная амплитуда напряжения в блоке нагружения.

В противоположность весьма напряженным нестационарным режимам, где расчет ведется на долговечность, могут встретиться режимы с малыми амплитудами, не превышающими предела выносливости детали. В этом случае степень опасности нестационарного режима оценивается по коэффициенту запаса $n$, который может рассматриваться как некоторое число, показывающее, во сколько раз можно увеличить все амплитуды спектра в пределах заданной долговечности, т.е. вместо $\sigma_{ai}$ иметь $n\sigma_{ai}$ .

Используя основное уравнение кривой выносливости

$$N_i \sigma_{ai}^m = N_0 \sigma_R^m ,$$

применительно к данному случаю нужно написать:

$$N_i (n\sigma_{ai})^m = N_0 \sigma_R^m \qquad \text{или} \qquad N_i = \frac{N_0 \sigma_R^m}{(n\sigma_{ai})^m} .$$

По гипотезе линейного суммирования усталостных повреждений накопленное повреждение для блока

$$a_{БЛ} = \sum \frac{z_i}{N_i} = \sum \frac{z_i (n\sigma_{ai})^m}{N_0 \sigma_R^m} . \qquad (I0)$$

Если заданная долговечность содержит $\lambda$ блоков нагружения, то к моменту разрушения в детали накопится повреждение

$$a_P = \lambda a_{БЛ} = \lambda \sum \frac{z_i (n\sigma_{ai})^m}{N_0 \sigma_R^m} ,$$

отсюда величина запаса прочности

$$n = \frac{\sigma_R}{\sqrt[m]{\frac{\lambda}{a_p N_0} \sum z_i \sigma_{ai}^m}}, \qquad (11)$$

где расчетное значение накопленного повреждения $a_p$ задается в зависимости от характера нестационарного режима.

Если в спектре преобладают в среднем близкие амплитуды, $a_p = 1{,}0$. Если же наряду с множеством мелких амплитуд присутствуют резкие перегрузки, $a_p$ принимается равным 0,1–0,2.

ЛИТЕРАТУРА


1. Давыдов Б.Л., Скородумов Б.А. Расчет и конструирование угледобывающих машин. М., ГНТИ, 1963.

2. Детали машин / Под ред. Н.С.Ачеркана. М., Машиностроение, 1968–1969, т. 1–3.

3. Решетов Д.Н. Работоспособность и надежность деталей машин. М., Высшая школа, 1974.

4. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М., Машиностроение, 1975.

5. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М., Физматгиз, 1974.