

6. Хоффман, Зегер. Обобщенный метод оценки многоосного упруго-пластического напряженно-деформированного состояния у надреза. Часть I: теория.

7. Мовчан А.А. О суммировании малоцикловых усталостных повреждений при изменении направления нагружения; Моск. авиац. ин-т. - М., 1986. - 15 с. Деп. в ВИНТИ 9.07.86, № 4598-В-86 ДЕП.

8. Рыбакина О.Г. Феноменологическое описание малоцикловой усталости при некоторых видах асимметричного деформирования // Изв. АН СССР, МТТ, 1969. - № 6. С. 61.

9. Стрижало В.А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. - Киев: Наукова думка, 1978.

10. Мовчан А.А. О влиянии истории деформирования на скорость накопления повреждений при немономтонном упругопластическом нагружении. - ПМТФ, 1984, № 5, 125-132.

11. Измайлов А.А., Мовчан А.А. О малоцикловсй усталости образцов и некоторых элементов конструкции из авиационных алюминиевых сплавов // Доклады на II Всесоюзной конференции "Современные проблемы строительной механики и прочности ЛА". - Куйбышевский авиационный институт, 1986.

УДК 539.4

Н.И.Гриненко, И.Г.Завалич,
С.Я.Меньшиков, Л.А.Шефер

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассматривается метод расчета характеристик сопротивления усталости элементов конструкций на стадии проектирования. Исходной информацией для расчета служит кривая усталости, полученная на образцах одного типоразмера при гармоническом нагружении. Предлагаемый метод позволяет оценить влияние конструктивных факторов (масштаб, концентрация напряжений) и вида нагружения на долговечность детали с учетом структуры реального (случайного) динамического воздействия.

На первом этапе расчета определяются характеристики сопротивления усталостному разрушению элемента конструкции при гармоническом нагружении. Эта задача решается в вероятностной постановке на основе теории прочности "наиболее слабого звена" /1,2/, согласно

которой вероятность разрушения детали $P(\sigma_{max})$ описывается уравнением:

$$P(\sigma_{max}) = \begin{cases} 1 - \exp \left\{ - \int_{F_u} \left[\frac{\sigma_{max} f(x,y) - u}{S_{\sigma,0}} R \right]^m \frac{dF}{F_0} \right\} & \text{при } \sigma_{max} \geq u \\ 0 & \text{при } \sigma_{max} < u \end{cases} \quad (I)$$

Здесь σ_{max} - максимальное напряжение в зоне концентрации; $f(x,y)$ - безразмерная функция координат; F_u - часть площади рабочего сечения, для которой $\sigma_{max} f(x,y) \geq u$; u , $S_{\sigma,0}$, m , R - параметры исходного распределения Вейбулла, описывающего вероятность разрушения $P_1(\sigma_i)$ единичного сечения F_0 :

$$P_1(\sigma_i) = \begin{cases} 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_i - u}{S_{\sigma,0}} R \right)^m \right] & \text{при } \sigma_i \geq u \\ 0 & \text{при } \sigma_i < u \end{cases} \quad (2)$$

При этом значение $S_{\sigma,0}$ соответствует СКО пределов выносливости единичного сечения F_0 для заданной долговечности.

Параметр u определяет нижнюю границу рассеивания пределов ограниченной выносливости и зависит от долговечности: чем больше долговечность, тем меньше значение u (рис. I).

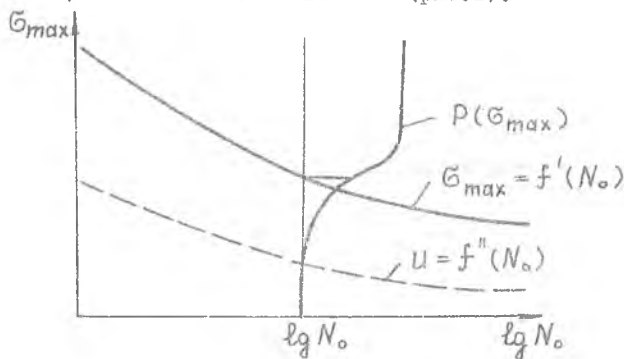


Рис. I

Наличие порога чувствительности по циклам и нижней границы рассеивания по напряжениям обосновано в ряде работ [3, 4], где показано, что для заданной долговечности N_0 значение нижней границы рассеивания пределов ограниченной выносливости, выраженных в максимальных напряжениях, не зависит от конструктивных факторов и для конкретного материала остается величиной постоянной.

Это позволяет предположить, что значение параметра u при заданной долговечности N_0 одинаково для образцов с площадью поперечного сечения F_0 и для деталей произвольной формы, изготовленных из того же материала. Тогда значение математического ожидания напряжений $\bar{\sigma}_{max}$ при заданной долговечности N_0 будет определяться через СКО пределов ограниченной выносливости детали S_{σ} выражением

$$\bar{\sigma}_{max} = u + t_0 S_{\sigma}, \quad (3)$$

где t_0 - квантиль закона распределения пределов выносливости, соответствующий вероятности разрушения $P = 0$.

Будем считать, что распределение пределов ограниченной выносливости деталей из разных материалов описывается законом Вейбулла в виде (2). При этом форма закона распределения, определяемая параметром m , не зависит от материала и геометрии детали. Данное допущение основано на результатах экспериментальных исследований [3], показывающих неизменность формы закона распределения пределов ограниченной выносливости от материала и конструктивных особенностей образцов. На основании данных экспериментов были определены параметры m и t_0 , однозначно связанные между собой. Их осредненные значения равны: $m = 4$ и $t_0 = 3,59$. Переменными параметрами закона распределения являются лишь математическое ожидание $\bar{\sigma}_{max}$ и СКО пределов ограниченной выносливости S_{σ} , которые зависят от долговечности N_0 , геометрии и вида нагружения.

Из проведенного анализа следует, что вероятность разрушения детали (I) будет в то же время описываться законом Вейбулла (2), в котором параметры m , u , R останутся прежними, изменятся только $\bar{\sigma}_i$ и $S_{\sigma,0}$:

$$P(\bar{\sigma}_{max}) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{\bar{\sigma}_{max}-u}{S_{\sigma,g}} R\right)^m\right] & \text{при } \bar{\sigma}_{max} \geq u \\ 0 & \text{при } \bar{\sigma}_{max} < u \end{cases}, \quad (4)$$

где $S_{\sigma,g}$ - СКО пределов ограниченной выносливости детали при заданной долговечности.

Приравнивая выражения (I) и (4), получим

$$S_{\sigma,g} = (\bar{\sigma}_{max} - u) \left\{ \int_{F_u} \left[\frac{\bar{\sigma}_{max} f(x,y) - u}{S_{\sigma,0}} \right]^m \frac{dF}{F_0} \right\}^{-1/m}. \quad (5)$$

Пусть известны характеристики сопротивления усталости лабораторных образцов конкретного типоразмера при заданном виде нагружения (изгиб, растяжение-сжатие) в условиях гармонического воздейст-

вия: $\bar{\sigma}_{\max,1} = f'(N_0)$; $S_{\sigma,1} = f''(N_0)$. Требуется определить характеристики сопротивления усталости детали произвольной формы, изготовленной из того же материала, при том же или другом виде нагружения. Используя зависимость (3) для заданной долговечности N_0 , получим

$$\bar{\sigma}_{\max,1} - \bar{\sigma}_{\max,2} = t_0 S_{\sigma,1} (1 - S_{\sigma,2}/S_{\sigma,1}), \quad (6)$$

где индексом „2" обозначены параметры, относящиеся к детали.

Обозначив $K_{\sigma} = \bar{\sigma}_{\max,2}/\bar{\sigma}_{\max,1}$, с учетом (5) и (6) получим

$$K_{\sigma} = 1 + t_0 \nu_{\sigma,1} \left\{ \left[\frac{\int_{F_{u,1}} [\bar{\sigma}_{\max} f_1(x,y) - u]^m dF}{\int_{F_{u,2}} [\bar{\sigma}_{\max} f_2(x,y) - u]^m dF} \right]^{1/m} - 1 \right\}, \quad (7)$$

где $\nu_{\sigma,1} = S_{\sigma,1}/\bar{\sigma}_{\max,1}$ - коэффициент вариации пределов ограниченной выносливости образцов.

Зависимость (7) позволяет определить влияние конструктивных факторов и вида нагружения на математическое ожидание напряжений $\bar{\sigma}_{\max,2}$ детали для заданной долговечности.

Рассеивание пределов ограниченной выносливости детали $S_{\sigma,2}$ определяется из уравнения (3) через коэффициент вариации $\nu_{\sigma,2}$:

$$\nu_{\sigma,2} = (t_0 \nu_{\sigma,1} + K_{\sigma} - 1)/t_0 K_{\sigma}. \quad (8)$$

Определяющим параметром уравнения (7) является интеграл \mathcal{J} :

$$\mathcal{J} = \int_{F_u} [\bar{\sigma}_{\max} f(x,y) - u]^m dF,$$

значения которого для лабораторных образцов определяются аналитически [2], а для сложных элементов конструкций - численными методами.

Конечным результатом на первом этапе расчета является кривая усталости детали при гармоническом нагружении.

Допустим, известна кривая усталости, описывающая математические ожидания долговечности $\lg N_0$ гладких лабораторных образцов при гармоническом воздействии:

$$\lg \bar{N}_0 = C - B \lg(\sigma_1 - \bar{\sigma}_0). \quad (9)$$

Здесь C и B - параметры кривой усталости; $\bar{\sigma}_0$ - математическое ожидание предела неограниченной выносливости.

Тогда с учетом (7) кривая усталости детали будет иметь вид

$$\lg \bar{N}_0 = C_1 - B \lg(\sigma_2 - \bar{\sigma}_0 K_{\sigma} / \alpha_{\sigma}), \quad (10)$$

где $C_1 = C - B \lg \frac{\alpha_{\sigma}}{K_{\sigma}}$; α_{σ} - теоретический коэффициент концентрации напряжений; σ_1, σ_2 - номинальные напряжения в образце и детали.

Переходя к ОКО напряжений S , запишем

$$\lg \bar{N}_o = A_r - B \lg (S_2 - \bar{S}_o^* K_G / \alpha_G), \quad (II)$$

где

$$S_2 = \bar{G}_2 / \sqrt{2}; \quad \bar{S}_o^* = \bar{G}_o \sqrt{2}; \quad A_r = C_1 - B \lg \sqrt{2}.$$

Предложенные расчетные зависимости подтверждены экспериментальными данными. Проведено также сравнение результатов вычислений по предлагаемому методу и методике /2/, которое показало хорошее соответствие между ними.

На втором этапе решается задача по оценке характеристик сопротивления усталости детали в условиях случайного нагружения.

В качестве характеристического параметра, отражающего структуру случайного процесса нагружения, принята безразмерная функция G /4/:

$$G = \frac{S_{ms}}{S_m} \frac{n_s}{n} \Pi, \quad (I2)$$

где S_{ms} - среднеквадратическое значение (СКЗ) повреждающих максимумов /4/; S_m - СКЗ положительных максимумов; n_s - среднее число повреждающих максимумов в единицу времени; n - среднее число положительных максимумов в единицу времени; $\Pi = \frac{G_{max}^*}{S}$ - пик-фактор; G_{max}^* - максимальный выброс процесса.

Анализ характеристик сопротивления усталости при гармоническом и случайных процессах нагружения различной структуры (с различным коэффициентом нерегулярности i) в плоскости $S - G$, где каждому процессу соответствует конкретное значение характеристического параметра G , позволили получить пучок лучей, сходящихся в точку с координатами \bar{G}_o, \bar{S}_o^* (рис.2). Каждый луч на рисунке характеризует определенную долговечность.

На основании этого было получено обобщенное уравнение кривых усталости в зависимости от структуры процесса нагружения /4/:

$$\lg \bar{N}_o = A_r - B \left[\frac{G_o - G_r}{G_o - G} (S - \bar{S}_o^*) \right], \quad (I3)$$

где $G_r = \sqrt{2}$ - параметр структуры гармонического процесса нагружения; $G_o = 4$ - координата полюса (рис.2).

С учетом асимметрии процесса нагружения /5/, величины рассеивания пределов ограниченной выносливости /4/, конструктивных факторов (7), а также структуры процесса нагружения (I3) долговечность детали с заданной вероятностью разрушения определится:

$$\lg N_o = A_r - B \lg \left\{ \frac{G_o - G_r}{G_o - G} \left[\frac{Q(1 + \Psi_s M)}{Q \pm t_{q,k} \sqrt{G_2}} S_2 - \bar{S}_o^* K_G / \alpha_G \right] \right\}. \quad (I4)$$

Здесь ψ_s - коэффициент чувствительности материала к асимметрии нагружения /5/; $\mu = \sigma_m / S$ - коэффициент асимметрии нагружения; σ_m - математическое ожидание процесса нагружения; $\nu_{\sigma, 2}$ - коэффициент вариации пределов выносливости детали при гармоническом нагружении (8); $t_{q, k}$ - квантиль распределения, соответствующий заданной вероятности разрушения; $Q = \{(\sigma_o - G_r) / (\sigma_o - G)\}^{5/2}$.

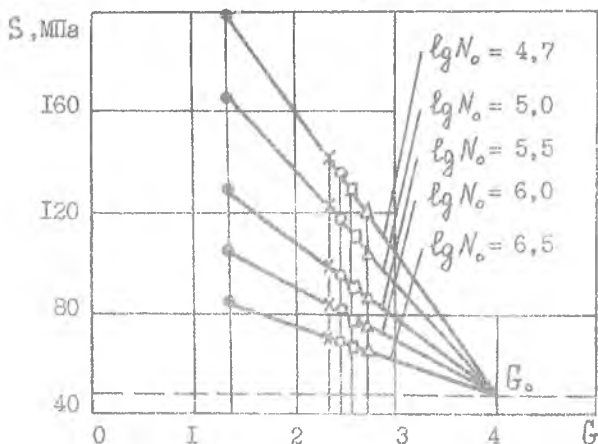


Рис. 2

Зависимость (14) подтверждена экспериментальными результатами авторов и данными из литературных источников (рис.3).

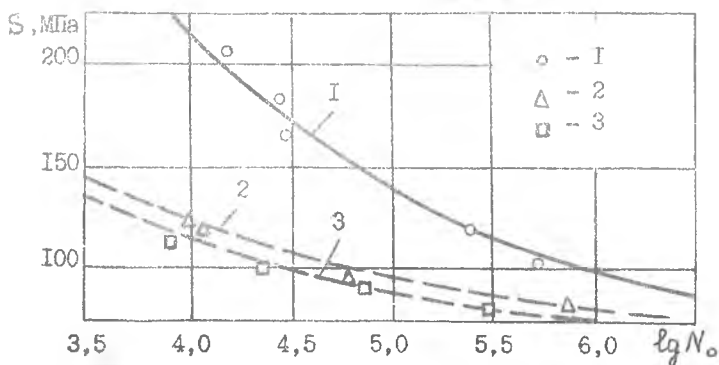


Рис. 3

Предложенный метод расчета позволяет определить предельное состояние детали в условиях случайного динамического воздействия. При этом учитываются конструктивные факторы, вид нагружения, структура случайного процесса, математическое ожидание и заданная вероятность разрушения. Расчетные зависимости дают возможность существенно уменьшить объем экспериментального материала (не требуется оценивать чувствительность материала к концентрации напряжений и масштабному фактору), а также избежать погрешностей вычислений, связанных с использованием гипотез суммирования усталостных повреждений.

Л и т е р а т у р а

1. Weibull W. A statistical theory of the strength of materials. - Proc. Roy. Swed. Inst. Eng. Res., 1939, N151, p. 5-48.
2. Кобаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. - М.: Машиностроение, 1977. - 232 с.
3. Степнов М.Н., Гиацинтов Е.В. Усталость легких конструкционных сплавов. - М.: Машиностроение, 1973. - 318 с.
4. Завалич И.Г., Шефер Л.А. Прогнозирование усталостной долговечности на основе характеристических параметров процессов нагружения. - Проблемы прочности, № 10, 1982, с. 25-30.
5. Гриненко Н.И., Завалич И.Г., Шефер Л.А. Влияние асимметрии процессов на долговечность при гармоническом и случайном нагружении. - Проблемы прочности, № 5, 1985, с. 74-77.

УДК 678.5:539.4

Г.П.Зайцев

МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ КОСОМ УДАРЕ

Вопрос об определении динамической силы, действующей на полую изотропную оболочку двойной кривизны при поперечном упругом ударе шаром, рассмотрен в работе /1/. Влияние анизотропии цилиндрической оболочки на величину и время действия динамической силы при поперечном ударе шаром рассмотрено в работе /2/. В данной статье в приближенной постановке рассмотрены вопросы определения динамической силы, действующей на ортотропную оболочку двойной кривизны при косом ударе шаром, и виды разрушений при таком ударе