

А.А.Козлов

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ПО МОМЕНТУ ПОЯВЛЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ МАКРОТРЕЩИНЫ

В настоящей статье для расчета долговечности использован подход с энергетических позиций. Для решения поставленной задачи будем исходить из предположения, что появление усталостной макротрещины является следствием разрушения некоторого локального объема материала после затраты критической энергии w^* .

Энергию, поглощенную локальным объемом материала за один цикл нагружения, полагаем равной площади петли гистерезиса при циклическом деформировании. При этом считаем, что напряжения, лежащие ниже предела выносливости материала σ_{-1} , не вносят повреждения.

Диаграмму циклического деформирования можно представить в виде, показанном на рис. 1:

при $\varepsilon_{-1}^0 < \varepsilon_i \leq \varepsilon_s$

$$\sigma_i = \sigma_{-1}^0 + (\varepsilon_i - \varepsilon_{-1}^0) E', \quad (1)$$

при $\varepsilon_i > \varepsilon_s$

$$\sigma_i = \sigma_{-1}^0 + (\varepsilon_s - \varepsilon_{-1}^0) E' + (\varepsilon_i - \varepsilon_s) E'' \quad (2)$$

Удельная энергия, накапливаемая за один цикл нагружения, будет равна (удвоенная заштрихованная площадь на рис. 1а)

$$w_i = k_1 (\sigma_{-1}^2 - 2\sigma_{-1} + c), \quad (3)$$

где $k_1 = \frac{1}{E'} - \frac{1}{E}$;

$$\left. \begin{aligned} b &= \sigma_s + k_2(\sigma - \sigma_s) \\ c &= \sigma_s^2 + k_2(\sigma^2 - \sigma_s^2) \end{aligned} \right\} \text{при } \sigma > \sigma_s;$$

$$b = \sigma, \quad c = \sigma^2 \quad \text{при } \sigma \leq \sigma_s,$$

а

$$k_2 = \frac{(\epsilon - \epsilon'')\epsilon'}{(\epsilon - \epsilon')\epsilon''}$$

Степень повреждения локального объема материала, подвергнувшегося циклическому нагружению, можно выразить через уменьшение прочности. Экспериментально установлено [1], что в процессе нагружения предел усталости σ_{-1} уменьшается по сравнению с первоначальным значением σ_{-1}^0 . Хотя все эксперименты проведены для образцов, на наш взгляд, изменение предела выносливости имеет место и для локального объема.

Будем полагать, что снижение предела выносливости за цикл пропорционально удельной энергии W_i :

$$\frac{d\sigma_{-1}}{dn} = -k_3 W_i \quad (4)$$

Подставив (3) в выражение (4) и проинтегрировав, получим с учетом того, что при $n=0$ $\sigma_{-1} = \sigma_{-1}^0$, а при $n=N$ $\sigma_{-1} = \sigma_{-1}^N$, следующие зависимости для определения числа циклов N до появления усталостной микротрещины:

$$kN = \frac{1}{\sigma - \sigma_{-1}^0} - \frac{1}{\sigma - \sigma_{-1}^N} \quad (\text{при } \sigma \leq \sigma_s) \quad (5)$$

$$kN = \frac{1}{2\sqrt{\delta}} \ln \left[\frac{(\sigma_{-1}^N - b + \sqrt{\delta})a}{(\sigma_{-1}^0 - b - \sqrt{\delta})} \right] \quad (\text{при } \sigma > \sigma_s) \quad (6)$$

$$\text{Здесь: } \delta = k_2(k_2 - 1)(\sigma - \sigma_s)^2 \quad a = \frac{\sigma_{-1}^0 - b - \sqrt{\delta}}{\sigma_{-1}^0 - b + \sqrt{\delta}},$$

σ_{-1}^N - конечное значение предела выносливости; k - постоянная.

Следует заметить, что выражение (5) и предположение (4) были высказаны и получены Геттсом в работе [2]. Однако Геттс рассматривал весь образец, и диаграмма циклического деформирования в его работе не соответствует, на наш взгляд, реальной картине. Экспериментальные данные по записи динамических петель гистерезиса [3] показывают, что для расчета может быть выбран вид диаграммы, изображенной на рис. 1а.

При действии напряжения σ_i в локальном объеме материала накапливается энергия. По достижении критической величины W^* происходит разрушение объема. За счет снижения предела выносли-

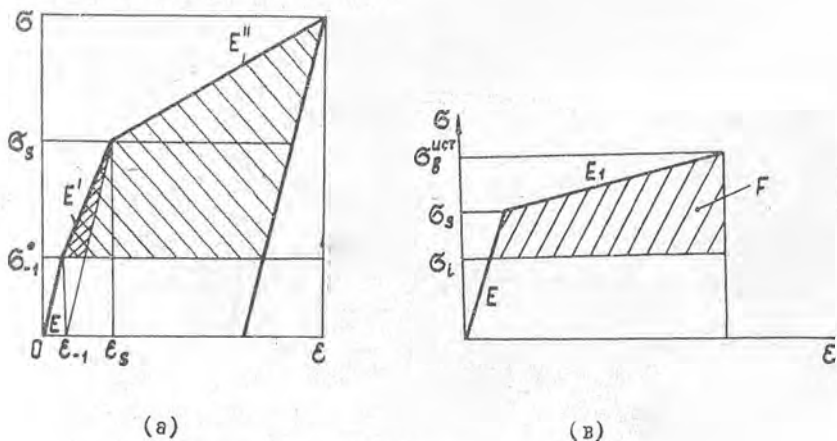


Рис. 1

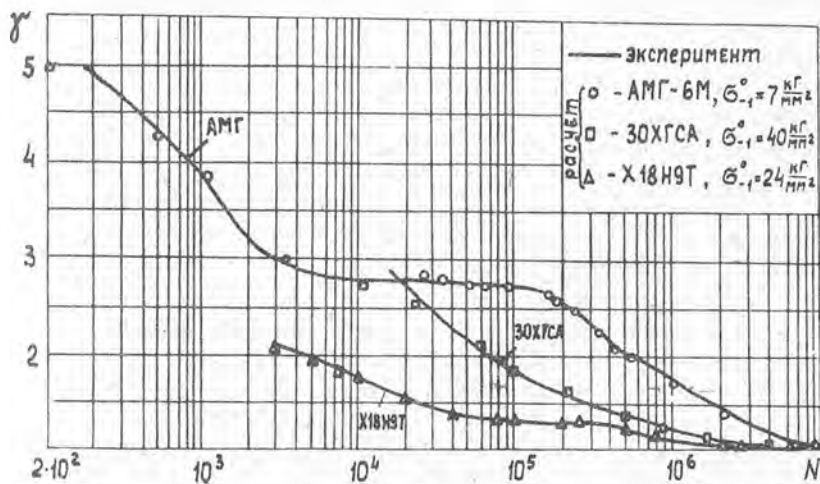


Рис. 2

ности к этому моменту оказывается накоплена энергия $(w_{-1})_i$. Величины w^* и $(w_{-1})_i$ пропорциональны соответственно площади под диаграммой при статическом разрушении и площади F (рис. 1в).

Будем полагать, что относительная величина падения предела выносливости пропорциональна отношению $(w_{-1})_i / w^*$, т.е.

$$\frac{\sigma_{-1}^0 - (\sigma_{-1}^N)_i}{\sigma_{-1}^0} = \frac{(w_{-1})_i}{w^*} \quad (7)$$

Отсюда

$$(\sigma_{-1}^N)_i = \sigma_{-1}^0 \left[1 - \frac{(w_{-1})_i}{w^*} \right] \quad (8)$$

Причем

$$(w_{-1})_i = \frac{(\sigma_s - \sigma_i)^2}{2E} + \frac{(\sigma_s^{уст} - \sigma_s)^2}{2E_1} + \frac{(\sigma_s^{уст} - \sigma_s)(\sigma_s - \sigma_i)}{E_1} \quad (9)$$

при $\sigma \leq \sigma_s$;

$$(w_{-1})_i = \frac{(\sigma_s^{уст} - \sigma_i)^2}{2E_1} \quad \text{при } \sigma > \sigma_s. \quad (10)$$

Здесь $\sigma_s^{уст}$ - истинное значение предела прочности, E и E_1 - тангенсы углов наклона участков диаграммы на рис. 1в.

Зависимости (5) и (6) были использованы вместе с (8), (9) и (10) для определения расчетным путем числа циклов до появления трещины. Неизвестные коэффициенты K и K_2 определялись из эксперимента при напряжениях $\sigma > \sigma_s$. Кроме того, неизвестной величиной является предел выносливости.

Экспериментальные исследования усталости образцов из сплава АМГ-6М показали, что в области низких уровней напряжений кривые усталости по появлению макротрещины при различном характере нагружения (изгиб и растяжение-сжатие), построенные в истинных напряжениях, достаточно хорошо совпадают. Поэтому неизвестная величина предела выносливости может быть взята из уже имеющихся экспериментов с данным материалом.

Результаты расчета по формулам (5) и (6) для образцов из разных материалов даны на рис. 2. Здесь же нанесены опытные данные. Напряжение бралось с учетом концентратора. Коэффициент концентрации в пластической области определялся по зависимостям Нейбера [4]. Для удобства все результаты представлены в безразмерных величинах $\gamma = \sigma / \sigma_{-1}^0$. Совпадение результатов расчета и эксперимента вполне удовлетворительное.

Полученная расчетным путем кривая усталости по трещине может быть использована для определения долговечности по появлению

микротрещины элемента конструкции. В качестве конструктивного элемента была выбрана трубка с фланцем из материала IX18H9T [6]. Весь эксперимент с материалом IX18H9T (плоские образцы и конструктивный элемент при гармоническом, случайном и программном нагружении) был проведен на кафедре "Прочность летательных аппаратов" Кушбшевского авиационного института А.А.Чуряковым.

Пренебрегая изменением напряжений по толщине стенок конструктивного элемента, получим на основании общего уравнения статистической теории усталостной прочности [5] следующее выражение:

$$-\ln [1 - P(\sigma_{max})] = 4Rh \int_{\alpha_u}^{\pi/2} \left(\frac{\sigma_{max} \sin \alpha - u}{\sigma_0} \right)^m d\alpha \quad (II)$$

Здесь $\alpha_u = \arcsin u / \sigma_{max}$, R - радиус элемента, h - толщина.

С учетом полученной расчетным путем кривой усталости по трещине для образцов из IX18H9T были определены по формулам работы [5] параметры Вейбулла, которые представлены на рис. 3. Численно интегрируя уравнение (II) для вероятности $P = 50\%$, получим кривую усталости по появлению трещины для той же вероятности. Результаты расчета и эксперимент в номинальных напряжениях сопоставлены на рис. 4.

Кривая усталости по трещине для элемента при гармоническом нагружении может быть использована при расчете долговечности элементов по макротрещине конструкции при случайном нагружении, используя подход работы [7]. В таблице I приведены результаты расчета долговечности по появлению трещины конструктивного элемента при случайном нагружении и данные опыта. За число циклов при случайном нагружении принималось число максимумов. Через $\bar{\sigma}$ обозначено среднее квадратичное отклонение.

Таблица I

$\bar{\sigma} \frac{кг}{мм^2}$	6,5	11	15,5	19	21,8	24	26,5
$N_{расч} \cdot 10^4$	44	6	1,21	0,62	0,42	0,338	0,257
$N_{эсп.} \cdot 10^4$	30	5,2	1,37	0,59	0,36	0,277	0,167

Таким образом, предложенная методика определения расчетным путем долговечности по появлению макротрещины может быть использована для оценки надежности конструкции, если появление макротрещины

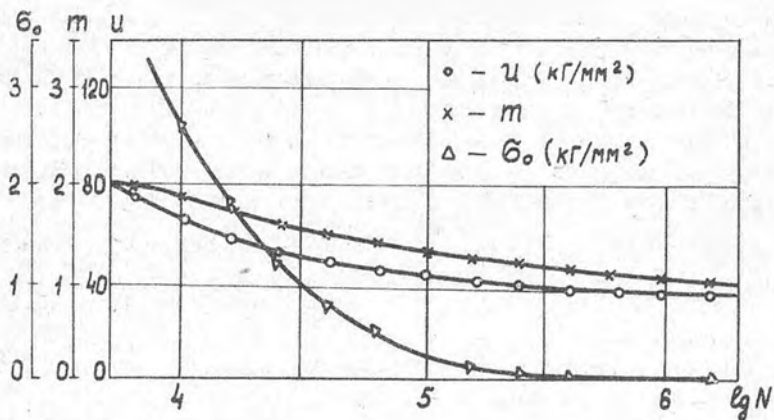


Рис. 3

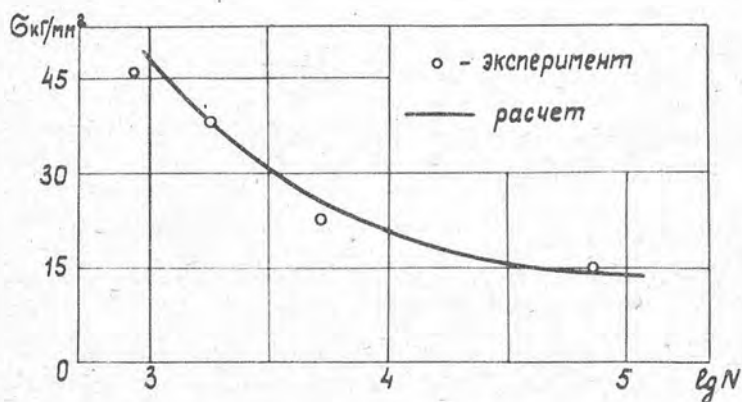


Рис. 4

влечет выход конструкции из строя. Кроме того, эта расчетная кривая позволяет оценить живучесть элемента конструкции, если воспользоваться уравнениями работы [6].

Л и т е р а т у р а

1. Прочность при нестационарных режимах нагрузки, под ред. акад. СССР С.В.Серенсена. Киев, 1961.
2. Геттс Р.Р. Применение понятия кумулятивного повреждения к проблеме усталости. "Труды американского общества инженеров-механиков" (русский перевод), серия Д, "Техническая механика", № 4, 1961.
3. Троценко В.Т. Усталость и неупругость металлов. Киев, 1971.
4. Нейбер Г. Теория концентрации напряжений в призматических стержнях, работающих в условиях сдвига для любого нелинейного закона, связывающего напряжения и деформации. Сб.переводов. "Механика", № 4, 1961.
5. Дуплякин В.М., Мостовой А.С. К вероятностному расчету кривых усталости деталей по результатам испытаний лабораторных образцов. "Вопросы прочности элементов авиационных конструкций". Межвузовский сборник, вып. I, изд.КуАИ, 1974.
6. Мостовой А.С., Козлов А.А., Фролова Л.К., Чураков А.А. Определение долговечности конструктивного элемента на основе некоторых представлений о механизме усталостного разрушения. "Проблемы прочности", № 3, 1972.
7. Мостовой А.С., Миноранский Э.И. Расчет кривой усталости по трещине для образца при программной и случайной нагрузках. "Вопросы прочности элементов авиационных конструкций", Труды КуАИ, вып. 39, 1968.