

УДК 539.385

А.А.Мовчан, А.А.Измайлов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
МАЛОЦИКЛОВОГО УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ
ПРИ СЛОЖНОЙ ИСТОРИИ НАГРУЖЕНИЯ

Экспериментально исследовано сопротивление малоциклового усталости для жесткого нагружения с деформационными перегрузками или с разнесенными в пространстве деформаций циклами малой амплитуды. Обнаружено, что применение закона линейного суммирования повреждений к этим задачам в ряде случаев систематически завышает долговечность по сравнению с экспериментальной. Для расчета долговечности применяется кинетический критерий накопления повреждений. Получаемый из него новый закон суммирования повреждений неплохо описывает экспериментальные данные.

Для определения числа циклов до разрушения при нерегулярном малоцикловом жестком нагружении обычно используется закон линейного суммирования повреждений в форме

$$\Omega = \sum \frac{1}{N(e_{ai})} = 1. \quad (1)$$

Здесь суммирование производится по всем полуциклам, e_{ai} - амплитуда деформаций, соответствующая полуциклу номер i , входящему в программу, $N(e_{ai})$ - число полуциклов до разрушения в случае регулярного нагружения с амплитудой деформаций e_{ai} (симметричный цикл). Соотношение (1) проверялось различными авторами [1,2] в экспериментах, где, как правило, программа состояла из симметричных циклов различной амплитуды. Для этого случая установлено соответствие с экспериментальными данными. Известно, однако, что в случае, например, прерывания больших по амплитуде полуциклов малыми результатами, даваемые соотношением (1), не соответствуют экспериментальным данным. Для ликвидации этого противоречия используются

искусственные приемы выделения циклов типа метода "падающего кожда" /3/.

В работах /4,5/ для исследования явления малоциклового усталости применен кинетический критерий накопления повреждений, учитывающий влияние предшествующей истории на скорость накопления повреждений. Установлено, что влияние предшествующей истории подчиняется принципу запаздывания /6/: скорость накопления повреждений на данном фрагменте пути деформирования зависит не от всей предшествующей истории, а лишь от части пути деформирования длины h , примыкающего к рассматриваемому фрагменту. След запаздывания h может быть определен исходя из соотношения

$$\int_0^1 \left(\frac{1 - e^{-\alpha \xi}}{\alpha} \right)^n d\xi = \frac{1}{n+1} \left(\frac{e_*}{D} \right)^{n+1}. \quad (2)$$

Здесь D - предельная продольная деформация в момент разрушения при монотонном растяжении; e_* и $\alpha = \frac{1}{n+1}$ - параметры уравнения малоциклового усталости Коффина-Мэнсона

$$e_a = \frac{e_*}{N^\alpha}. \quad (3)$$

Уравнение (2) служит для определения параметра α , через который вычисляется след запаздывания

$$h = \frac{D}{\alpha} \ln \frac{2}{\varepsilon}, \quad (4)$$

где ε - допуск при определении следа запаздывания, принимаемый далее равным 0,1.

Установлено /7/, что в рамках кинетического критерия накопления повреждений закон линейного суммирования в форме (I) справедлив для блочного нагружения в том случае, когда длина дуги деформирования за блок много больше следа запаздывания. Пусть путь деформирования состоит из повторяющихся блоков, а длина дуги деформирования за блок много меньше h ; общая длина дуги деформирования до разрушения много больше h . Для этого практически важного случая в /8/, исходя из кинетического критерия, получена новая формулировка закона суммирования повреждений

$$\sum \rho_i = 1. \quad (5)$$

Для приложения соотношения (5) определяется среднее значение

деформации за блок ε_0 . Суммирование в (5) производится по всем точкам реверсов, причем ρ_i есть модуль разности между деформацией, соответствующей точке реверса, и ε_0 . Знак плюс берется в случае, если в точке реверса этот модуль разности имеет максимум, знак минус - если минимум.

Формулировка (5) не приводит к тем противоречиям с экспериментальными данными, которые получаются из соотношения (1) для малых полуциклов, прерывающих большие полуциклы. В случае, когда путь деформирования состоит из симметричных циклов, соотношение (5) дает тот же результат, что и (1), т.е. правильно описывает экспериментальные данные.

Для проверки формулировки (5) были проведены испытания на многоцикловую усталость в соответствии с двумя программами, изображенными на рис. 1 и 2. Блок первой программы состоит из одного большого (перегрузочного) цикла с размахом деформаций Δ и K малых пульсирующих циклов размаха δ . Решение этой задачи в соответствии с законом суммирования (3) имеет вид

$$\sigma_{\Sigma} = M \frac{(K+1)\varepsilon_0^{1/\alpha} + (\Delta - \varepsilon_0)^{1/\alpha} + K(\delta - \varepsilon_0)^{1/\alpha}}{2\varepsilon_*^{1/\alpha}} = 1 \quad (6)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta^2 + K\delta^2}{2(K\delta + \Delta)}$$

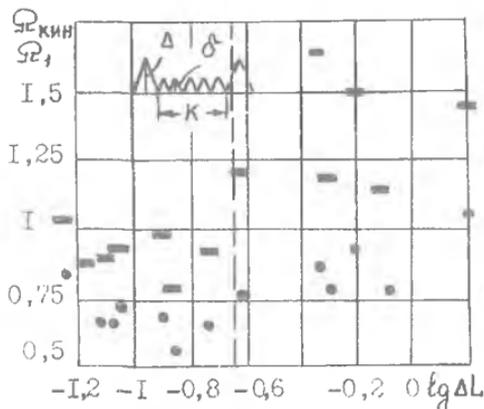


Рис. 1

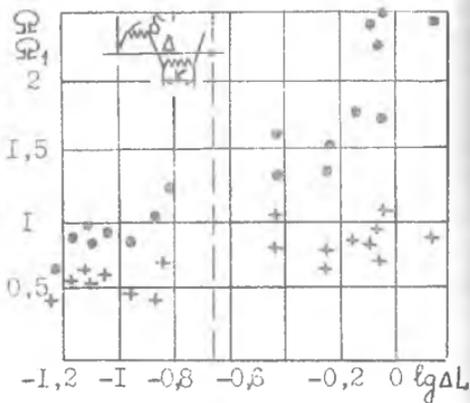


Рис. 2

и соответствии с обычным законом линейного суммирования (I)

$$\Omega = M \left[\left(\frac{\Delta}{2 \varepsilon_*} \right)^{1/\alpha} + K \left(\frac{\delta}{2 \varepsilon_*} \right)^{1/\alpha} \right] = 1. \quad (7)$$

Здесь M - число блоков до разрушения.

Были произведены испытания на циклическое растяжение - сжатие простых образцов из сплава АМЦ в состоянии поставки. В предварительных экспериментах по регулярному жесткому симметричному деформированию было установлено, что параметры уравнения Коффина-Мэнсона (3) для исследуемого сплава равны $e_* = 0,615$, $\alpha = 0,635$; испытанию на разрушение при монотонном растяжении дало $D = 0,7$, откуда, решив уравнение (2) и подставляя результат в (4), можно получить $h = 0,23$.

На рис.1 приведены значения правых частей Ω' (6) - точки и Ω'' (7) - крестики, вычисленные в момент разрушения; по оси абсцисс отложены логарифмы значений длин дуг деформирования за блок ΔL или соответствующих образцов.

Блок второй программы (рис.2) состоит из двух симметричных полуциклов большого размаха Δ и двух серий по K циклов малого размаха δ , обладающих близким к единице коэффициентом асимметрии $\gamma = \frac{\Delta - \delta}{\Delta}$. Обычный закон линейного суммирования (I) для этой задачи дает

$$\Omega = M \cdot \frac{\Delta^{1/\alpha} + 2K\delta^{1/\alpha}}{2e_*^{1/\alpha}} = 1, \quad (8)$$

предлагаемая формулировка (5) записывается в виде

$$\Omega'' = M \frac{(K+1)\Delta^{1/\alpha} - K(\Delta - 2\delta)^{1/\alpha}}{2e_*^{1/\alpha}} = 1. \quad (9)$$

На рис.2 приведены вычисленные в момент разрушения для всех испытанных образцов значения Ω (8) и Ω'' (9) в момент разрушения, а также соответствующие значения длин дуг деформирования за блок. Вертикальная линия на рис.1 и 2 соответствует значению $\Delta L = h$. Как видно из рис.1 и 2, при $\Delta L \gg h$ в полном соответствии с кинетическим критерием накопления повреждений близкие к действительности результаты дает обычная форма закона линейного суммирования (I), а новая формулировка существенно занижает число блоков до разрушения по сравнению с экспериментальным. При уменьшении ΔL умень-

шаются обе величины σ_R и σ_R^* . В случае, когда $\Delta L \ll h$, близкими к единице становятся уже значения σ_R^* , т.е. пользоваться надо новой формулировкой (5), а обычный закон линейного суммирования будет существенно завышать долговечность по сравнению с экспериментальной. В промежуточных областях $\Delta L \approx h$ рекомендуется использовать также новый закон (5), как дающий результаты в запас прочности.

Для узлов крепления траверсы к стойке амортизатора при посадке и рулежке самолета по взлетно-посадочной полосе характерно нагружение блоками, содержащими перегрузочные циклы. Предполагается, что основной элемент подобного узла - проушина - изготовлена из листового сплава Д16Т перпендикулярно направлению прокатки и нагружается через болт, вставленный с зазором $0,001d$. Расчет долговечности производится с помощью закона суммирования повреждений (6) для нагружения проушины блоком, содержащим один цикл большого размаха номинальных напряжений $\Delta \sigma = 166,6$ МПа и $K = 100$ циклов малого размаха номинальных напряжений $\delta \sigma$. Варьируется значение δ .

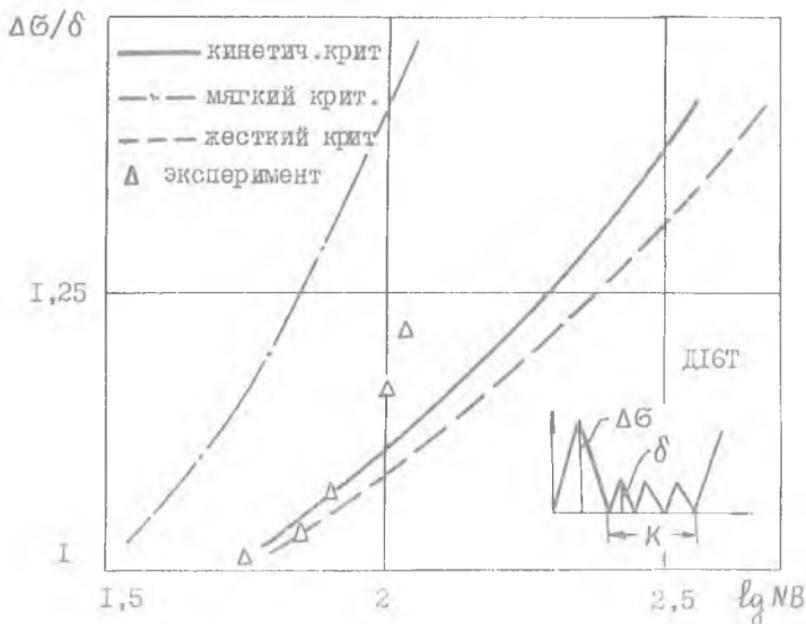


Рис. 3

На рис.3 в координатах $\Delta G / \delta G \sim \lg N^{\text{рег}}$ приведены результаты расчета, иллюстрирующие влияние уменьшения размаха малых циклов на долговечность, полученных с использованием (6) и (7). Результаты эксперимента на нагружение модели проушины блоком соответствующей формы представлены на рис.3. Видно, что экспериментальные точки для рассматриваемой серии нагружения ближе лежат к кривой, полученной в соответствии с (6), чем к кривой, найденной по гипотезе линейного суммирования повреждений (7). Поэтому расчет проушин для данного вида нагружения целесообразно вести с использованием нового закона суммирования повреждений.

Библиографический список

1. Прочность при малоцикловом нагружении. Основы методов расчета и испытаний / Под ред. С.В.Серенсена. М.: Наука, 1975. 287 с.
2. Стасюнас Р.А. Исследование закономерностей накопления повреждений при нестационарном малоцикловом деформировании: Автореф. канд.дисс. / КТИ. Каунас, 1967. 21 с.
3. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. М.: Мир, 1984. 624 с.
4. Мовчан А.А. Феноменологическое описание дислокационного механизма образования зародышевых дефектов при пластическом деформировании // Прикладная механика и техническая физика. 1987. № 1. С. 147-155.
5. Мовчан А.А. Накопление рассеянных повреждений при пластическом деформировании: Автореф. дисс. докт. физ-мат. наук. М., 1988. 71 с.
6. Мльюшин А.А. О связи между напряжениями и деформациями в механике сплошных сред // Прикладная математика и механика. 1964. Т. 18, вып.6.
7. Мовчан А.А. О влиянии деформационных перегрузок на долговечность при малоцикловой усталости // Расчет тонкостенных элементов конструкции на прочность, устойчивость, колебания и долговечность. М.: МАИ, 1983. С.57-61.