

УДК 621. 979

© А.В. Корнилова, 2008

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБЪЕКТА ПО КРИТЕРИЮ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ



А.В. Корнилова,
канд. техн. наук
(ЗАО «ПРОЧНОСТЬ»,
г. Москва)

The paper presents systematic review of the hypotheses of damageability accumulating under multi-cycle fatigue conditions. It is demonstrated that application of a single linear hypothesis results in large error when determining durability of hardware and, correspondingly, of the object's residual life.

Согласно РД 03-484—02 «Положение о порядке продления срока безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений на опасных производственных объектах» экспертиза промышленной безопасности эксплуатации устройств, отработавших нормативный срок, обязательно включает в себя определение остаточного ресурса. Первый шаг при установлении общей долговечности и соответственно остаточного ресурса — выявление разрушающего процесса или сочетания разрушающих процессов, приводящих устройство в предельное состояние. По данным Института вычислительного моделирования СО РАН, основным фактором разрушения служит рост трещин, а преобладающим разрушающим процессом является многоцикловая усталость. Определение остаточного ресурса по максимальной нагрузке дает неоправданно заниженные значения долговечности технических устройств, особенно при ее кратковременном воздействии. При нахождении остаточного ресурса объектов, работающих в условиях спектра нагрузок, используют преимущественно одну линейную гипотезу накопления повреждаемости.

Однако в настоящее время нашли практическое применение и другие гипотезы, учитывающие различные аспекты этой проблемы. Все они носят вероятностный характер и имеют равные права на существование. Вполне возможно, что при дальнейшей работе по предлагаемой методике (оценке повреждаемости по всем значимым гипотезам) и накоплении статистических данных, выделится какая-либо одна гипотеза или группа гипотез для каждого сочетания «материал — конструкция — технология изготовления — характер нагружения — среда обитания», которая будет альтернативой повсеместно применяемой сейчас гипотезе линейного суммирования повреждений.

Аналогичная ситуация с поиском критерия разрушения технических устройств сложилась в кон-

це XIX в., когда появилось более 20 теорий статической прочности. Однако сейчас применяются в основном 1-я, для хрупких материалов, и 4-я, считающаяся универсальной. Все гипотезы накопления усталостной повреждаемости технических устройств можно разбить на несколько групп в зависимости от того аспекта проблемы, который автор гипотезы счел самым значимым. Наиболее известная группа — гипотезы линейного накопления повреждений. Первая гипотеза этой группы была предложена Пальмгреном в 1924 г. и усовершенствована Майнером. Позднее с накоплением статистических и экспериментальных данных в нее были внесены уточнения В.П. Когаевым, и до сих пор она остается наиболее применяемой для определения числа циклов нагружений до разрушения деталей, подвергающихся спектру нагружения.

Особый интерес из гипотез этой группы представляет билинейное правило накопления повреждений Мэнсона. Оно основано на предположении Гровера о том, что весь процесс усталости можно разделить на две фазы — зарождение трещины и ее рост, и хорошо согласуется с постулатами механики разрушения. Другая группа гипотез основана на предположении о преобладающем влиянии на повреждаемость снижения предела выносливости материала. Это гипотезы — Генри, Гатса, Броуна—Уорка, С.В. Серенсена, М.Я. Шашина, Е.К. Почтенного и др. Гипотезы Кортена—Долана, Марко—Старки и Марина основаны на предположении о том, что на повреждаемость технических устройств наибольшее влияние оказывает вид кривых повреждаемости (зависимостей повреждаемости от относительного числа циклов).

Особое место занимает гипотеза Л.А. Сосновского, базирующаяся на предположении о том, что законы накопления усталостной повреждаемости различны для циклически упрочняющихся, разупрочняющихся и циклически стабильных материалов. Оценка усталостной долговечности технических устройств по различным гипотезам позволит снизить риск ошибки при определении остаточно-

го ресурса объекта. Рассмотрим основные гипотезы каждой группы.

Гипотеза Пальмгрена—Майнера может быть описана с помощью кривой усталости (рис. 1). Принято, что при действии напряжений σ_i в течение n_i циклов нагружения повреждаемость $D_i = n_i/N_i$. При действии спектра различных уровней напряжений на деталь или образец, разрушение произойдет, если выполняется следующее условие:

$$\sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (1)$$

где q — число блоков нагружения; N_i — полное число циклов до разрушения при действии блока нагружения с характеристиками σ_i, n_i .

Пальмгрен предложил свою гипотезу для циклов нагружения с коэффициентом асимметрии $R = -1$

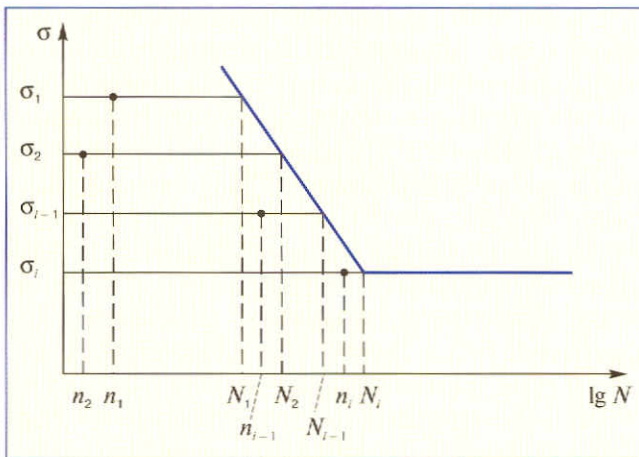


Рис. 1. Зависимость, поясняющая гипотезу линейного суммирования повреждений по Пальмгрена

($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$, где $\sigma_{\min}, \sigma_{\max}$ — соответственно минимальное и максимальное напряжение циклов нагружения). Эти циклы характеризуются быстрым ростом и доломом образовавшейся трещины, т.е. основной вклад в долговечность объекта вносит фаза зарождения усталостного дефекта. Позднее эту гипотезу стали применять для всех типов циклов (в том числе и для тех, у которых фазы роста и долома по длительности соизмеримы с фазой зарождения).

Простота гипотезы Пальмгрена—Майнера — следствие недоучета некоторых факторов, поэтому в предсказании разрушения по этой гипотезе возможна большая погрешность. К наиболее значимым недостаткам линейной гипотезы относится то, что она не учитывает историю нагружения исследуемого объекта. При разрушении реальных объектов выявлено, что сумма $\sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N_i}$, соответствующая разрушению, колеблется от 0,6 до 14.

В связи с этим В.П. Когаев предложил корректированную линейную гипотезу накопления усталостных повреждений [1]. Он предположил, что зарождение усталостного дефекта наступает при следующих условиях:

$$\sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N_i} = a_p, \quad (2)$$

где a_p — некая расчетная величина, значения которой лежат в пределах $0,1 \leq a_p < 1$. На основе анализа ряда экспериментальных данных для a_p было получено:

$$a_p = \frac{\sigma_{a \max} \xi - k_a \sigma_{-1}}{\sigma_{a \max} - k_a \sigma_{-1}} = \frac{\sum_{i=1}^q \sigma_{ai} t_i - k_a \sigma_{-1}}{\sigma_{a \max} - k_a \sigma_{-1}};$$

$$\xi = \sum_{i=1}^q \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a \max}} t_i.$$

где $\sigma_{a \max}, \sigma_{ai}$ — соответственно максимальная и i -я амплитуды гистограммы нагружения объекта (зависимости, иллюстрирующей историю нагружения объекта в координатах (n, σ)); $0 < k_a < 1$ — постоянное число, определяющее нижнюю границу повреждающих напряжений (по опытным данным обычно принимается $k_a = 0,5$); σ_{-1} — предел выносливости технических устройств; $t_i = n_i/n^*$; n^* — суммарное число циклов в гистограмме нагружения за вычетом циклов с $\sigma_{ai} < 0,5\sigma_{-1}$.

Длительность фазы роста трещины по В.П. Когаеву оценивается по критериям механики разрушения.

Мэнсоном в рамках классических подходов к усталости предложено отдельно оценивать длительность фаз зарождения и развития усталостного дефекта [2]. Фазу развития трещины можно оценивать соотношением:

$$N_p = PN^p,$$

где N_p — число циклов, при которых происходит распространение трещины, после того как она образовалась; P и p — коэффициенты (по экспериментальным данным для всех типов сталей $P = 14, p = 0,6$).

Число циклов до зарождения трещины:

$$N' = N - N_p \text{ или } N' = N' - 14 N^{0,6}.$$

Применяя гипотезу линейного суммирования повреждений, для каждой фазы запишем:

1. Трещина, способная к росту в данных условиях нагружения, возникает в момент, когда выполняется условие:

$$\sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N'_i} = 1. \quad (3)$$

2. Разрушение происходит вследствие развития трещины в момент, когда реализуется условие:

$$\sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N_{pi}} = 1. \quad (4)$$

Влияние накопления усталостных повреждений на последующее усталостное поведение углеродистой стали (по экспериментальным данным [3]) показано на рис. 2. Амплитудные значения напряжений 310 МПа. Наиболее развитой (и не требующей проведения дополнительных экспериментальных исследований) из группы гипотез, учитывающих снижение предела выносливости материала объекта в процессе эксплуатации, является гипотеза Генри [4], согласно которой текущий предел выносливости σ_{-1n} может быть найден по формуле

$$\sigma_{-1n} = \frac{\sigma_i \left(1 - \frac{n_i}{N_i}\right)}{\left(\sigma_i - \sigma_{-1}\right) \frac{1}{\sigma_{-1}} \left(1 - \frac{n_i}{N_i}\right)}. \quad (5)$$

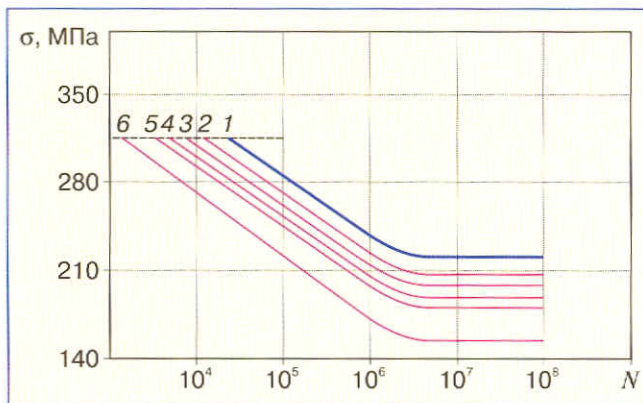


Рис. 2. Зависимость числа циклов до разрушения N от амплитудных напряжений σ :

1 — для неповрежденного материала; 2–6 — для материала с различной степенью поврежденности, отработавшего соответственно 5000, 10 000, 15 000, 20 000 и 25 000 циклов

Повреждаемость через n_i циклов нагружения:

$$D = \frac{\frac{n_i}{N_i}}{1 + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_i - \sigma_{-1}} \left(1 - \frac{n_i}{N_i}\right)}. \quad (6)$$

Для описания уменьшения предела выносливости С.В. Серенсен в 1944 г. рекомендовал следующее выражение [5]:

$$\frac{\sigma_{-1n}}{\sigma_{-1}} = 1 - \left(\frac{n_i}{N_i}\right) \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{-1}} - 1\right) \frac{1}{\frac{\sigma_i}{\sigma_{-1}} - \left(\frac{n_i}{N_i}\right)^2}. \quad (7)$$

Примерно в это же время М.Я. Шашин [6] выдвинул теорию накопления усталостных повреждений, основное уравнение которой можно представить следующим образом:

$$\frac{\sigma_{-1n}}{\sigma_{-1}} = 1 - \left(\frac{n}{N}\right) \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{-1}} - 1\right) \exp\left(-\frac{m_i}{m}\right), \quad (8)$$

где m, m_i — показатели соответственно первичной и вторичной кривых усталости, т.е. характеристики наклона кривых усталости в логарифмических координатах $\lg \sigma - \lg N$.

Позже (в 1963 г.) Броун и Уорк предложили следующее соотношение [7]:

$$\frac{\sigma_{-1n}}{\sigma_{-1}} = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{-1}}\right)^{k_m (n_i/N_i)}, \quad (9)$$

где k_m — постоянная материала.

Критерием разрушения технических устройств по всем вышеприведенным гипотезам данной группы будет равенство нулю текущего значения предела выносливости материала.

Последняя гипотеза этой группы (Е.К. Почтенного [8]) была выдвинута в 70-е годы XX в. Е.К.Почтенный на основании того, что более высокие напряжения приводят к разрушению через меньшее число циклов нагружения, предположил, что конечный предел выносливости (на момент долома) больше в тех случаях, когда действует более высокое напряжение (рис. 3). Предел выносливости материала после воздействия n_i циклов нагружения с амплитудой σ_i

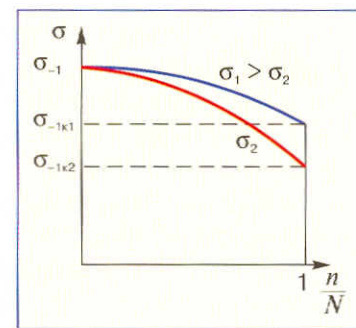


Рис. 3. Зависимость снижения пределов выносливости σ_{-1} от отношения n/N ($\sigma_{-1k1}, \sigma_{-1k2}$ — предел выносливости в момент долома при работе на 1-м и 2-м уровнях напряжений)

$$\sigma_{-1n} = \frac{\sigma_i - V_0 (1 + Z_i)}{2} + \sqrt{\left[\frac{\sigma_i - V_0 (1 + Z_i)}{2}\right]^2 + \sigma_i V_0}, \quad (10)$$

где $V_0 = \frac{\sigma_i k}{\sigma_i - k}$; k — характеристика наклона кривой усталости в полулогарифмических координатах

тах $\sigma - \lg N$; $Z_i = \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{N_i - n_i}{N_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}$; N_0 — базовое число циклов.

Согласно [8] текущее значение предела выносливости в момент долома соответствует конечной величине, зависящей от амплитудных напряжений и, в общем случае, не равной нулю.

Гипотезы, учитывающие снижение предела выносливости материала в процессе нагружения, дают возможность предложить программу нагружения технического устройства, позволяющую максимально продлить остаточный ресурс объекта. Естественно, в тех случаях, где это возможно по техническим условиям. Из всех линейных гипотез сделать это опосредованным образом позволяет только билинейное правило суммирования Мэнсона.

Наиболее распространенной из группы гипотез, основанных на предположении о превалирующем влиянии на повреждаемость вида кривых повреждаемости, является гипотеза Кортена—Долана [9]. Она не требует предварительных особых экспериментальных исследований для каждого сочетания «материал — вид нагружения» как, например, гипотезы Марко—Старки [10] и Марина [11]. По Кортену—Долану разрушение наступит в момент, когда выполняется условие

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_1} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^d + \frac{n_3}{N_1} \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_1} \right)^d + \dots + \frac{n_i}{N_1} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_1} \right)^d = 1, \quad (11)$$

где n_i , N_1 , σ_1 относятся к блоку с максимальной амплитудой напряжений, независимо от того, где он находится в гистограмме нагружения. Экспериментально было установлено, что для многих марок сталей d меняется в довольно узком диапазоне от 6,2 до 6,9 (среднее значение $d = 6,57$), для алюминиевых сплавов $d = 6$.

Гипотеза Л.А. Сосновского [12] в обобщенном виде формулируется следующим образом — разрушение наступает в момент, когда выполняется условие

$$\sum_{i=1}^q \left[1 - \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^m \right]^l = 1, \quad (12)$$

где m и l — параметры упрочнения; $m > 1$, $l = 1$ — для циклически разупрочняющихся материалов; $m = 1$, $l > 1$ — для циклически упрочняющихся материалов; $m = 1$, $l = 1$ — для циклически стабильных материалов; $m \neq 1$, $l \neq 1$ — для металлов, обнаруживающих упрочнение и разупрочнение на разных стадиях временного деформирования.

В качестве примера на рис. 4 показана поверхность математических ожиданий усталостной повреждаемости при линейном напряженном состоянии для различных материалов ($m = \text{var}$, $l = \text{var}$).

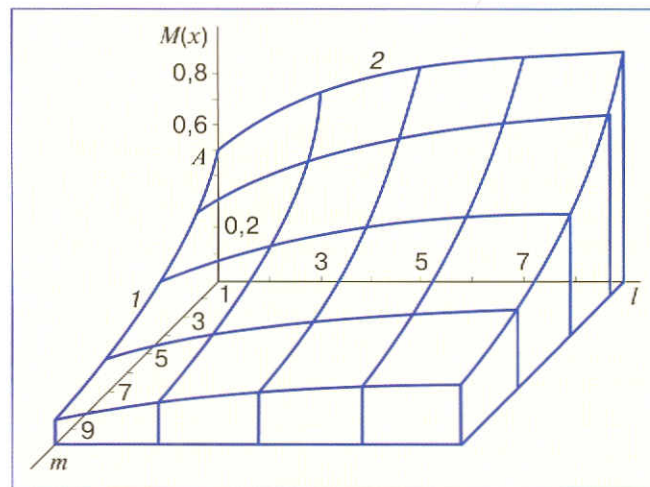


Рис. 4. Поверхность математических ожиданий $M(x)$ усталостной повреждаемости:
1, 2 — соответственно циклически разупрочняющихся и упрочняющихся металлов (точка А соответствует циклически стабильным металлам)

При оценке остаточного ресурса по различным гипотезам (выражения (1)–(12) и т.п.) получается некий разброс расчетных значений. Если разрушение исследуемого объекта приводит к гибели людей, то однозначно следует назначать остаточный ресурс по гипотезе (группе гипотез), предсказывающей минимальное значение общей долговечности технических устройств и соответственно остаточного ресурса объекта. В каждом конкретном случае невозможно однозначно прогнозировать, какая именно гипотеза покажет минимальное значение долговечности (зависит от коэффициента асимметрии цикла, свойств материала и т.д.). Поэтому расчет по нескольким гипотезам предпочтительнее. В случае если вероятность гибели людей близка к нулю, то необходимо оценивать потери предприятия, эксплуатирующего исследуемый объект, возникающие в результате ошибок при назначении остаточного ресурса. Автором данной статьи разработан алгоритм, связывающий разброс получаемых значений долговечности технических устройств с риском, возникающим при наступлении отказов, путем применения математических методов принятия решений в условиях неопределенности и многокритериальности. Первый шаг — составление таблицы («платежной матрицы» в терминах применяемого раздела математики), в которой оцениваются потери предприятия y_{xs} в зависимости от принятой стратегии экспертной организации x_i . Для назначения остаточного ресурса, перестраива-

Стратегия экспертной организации x_i	Потери предприятия, эксплуатирующего исследуемый объект y_{xs} , тыс. руб.		
	Вероятные события		
	Объект вышел из строя раньше срока, указанного экспертной организацией	Объект вышел из строя в срок, регламентируемый экспертной организацией	Объект является работоспособным на момент выработки заявленного экспертной организацией ресурса
Остаточный ресурс назначен по гипотезе, предсказывающей значение долговечности:			
минимальное	y_{11}	$y_{12} = 0$	y_{13}
усредненное	y_{21}	$y_{22} = 0$	y_{23}
максимальное	y_{31}	$y_{32} = 0$	y_{33}

Примечание. $y_{11}-y_{33}$ — первая цифра в подстрочном индексе относится к стратегии экспертной организации, вторая — к вероятным событиям.

ем платежную матрицу в таблицу рисков для всех возможных событий. Применительно к анализу технических систем риск α_{xs} рассматривается как вероятность потерь и представляется в форме произведения потерь y_{xs} на вероятность P_{xs} их возникновения $\alpha_{xs} = y_{xs} P_{xs}$.

Для анализа рисков предлагается следующая целевая функция:

$$\left(\sum_{s=1}^3 \alpha_{xs} \right)_{\text{опт}} = \min \sum_{s=1}^3 \alpha_{xs}.$$

Т.е. оптимальной будет та стратегия назначения остаточного ресурса объекта (при оценке долговечности технических устройств по нескольким гипотезам), которой соответствует минимальное значение из суммы рисков по всем возможным событиям.

Вышеприведенный подход — обобщенный и упрощенный алгоритм назначения остаточного ресурса исследуемых объектов в рыночных условиях. В каждом конкретном случае появляются свои тонкости и нюансы как в технической, так и в экономической части предлагаемого подхода.

Список литературы

1. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. — М.: Машиностроение, 1993. — 364 с.

2. Manson S.S. Interfaces Between Fatigue, Creep, and Fracture. — Proceeding of International Conference on Fracture, Vol. 1. — P. 342–348.

3. Battelle Memorial Institute, Prevention of Fatigue in Metals. — New York: John Wiley & Sons, 1941. — P. 43.

4. Henry D.L. Theory of Damage Accumulation in Steel — ASME Transaction, 77 (1955). — P. 913.

5. Серенсен С.В. Об оценке долговечности при изменяющейся амплитуде переменных напряжений // Вестник машиностроения. — 1944. — № 7. — С. 1–7.

6. Шашин М.Я. Оценка долговечности при изменяющейся амплитуде переменных напряжений // Вестник машиностроения. — 1945. — № 3. — С. 3–11.

7. Brown G.W., Work C.E. An evaluation of the influence of cyclic prestressing on fatigue limit. — Proceedings of ASTM, 1963. — P. 706–712.

8. Почтенный Е.К. Кинетическая теория механической усталости и ее приложения. — Минск: Наука и техника, 1973. — 203 с.

9. Corten H.T., Dolan T.J. Cumulative Fatigue Damage. — Proceedings of International Conference on Fatigue of Metals. — ASME and IME (1956). — P. 235.

10. Marco S.M., Starkey W.L. A Concept of Fatigue Damage. — ASME Transactions, 76 (1954). — P. 627.

11. Marin J. Mechanical Behavior of Engineering Materials. — Englewood Cliffs, N.J.: Prentice — Hall, 1962. — P. 567.

12. Сосновский Л.А. Статистическая механика усталостного разрушения. — Минск: Наука и техника, 1987. — 288 с.

Внимание авторов и читателей!

За публикацию в журнале вознаграждение авторам не выплачивается. Отдельные статьи рецензируются. Отрицательные рецензии доводятся до сведения авторов. Статьи, представленные в редакцию, авторам не возвращаются. Один экземпляр журнала с опубликованной статьей высылается каждому автору бесплатно. Журнал выпускается в свет и в электронной версии.

