

$$N = \frac{Q}{\sigma} \cdot \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma - \sigma_{RP}}{v_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} \quad (1)$$

и

$$N = N_0 \cdot \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma - \sigma_R}{v} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} \quad (2)$$

где N – число циклов до предельного повреждения, N_0 – число циклов до точки нижнего перегиба кривой усталости, σ – максимальное напряжение цикла, σ_R – среднее значение предела выносливости при асимметрии цикла R , σ_{RP} – значение предела выносливости при асимметрии цикла R и вероятности неразрушения P , v_0 – параметр с размерностью напряжения, $Q = N_0 \cdot \sigma_R$ – коэффициент сопротивления усталости, v – характеристика угла наклона кривой усталости $\left| \frac{d\sigma}{d \ln N} \right|$.

Отметим, что

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{\alpha \cdot \sigma_R} + \frac{1}{v_0}, \quad (3)$$

где α – безразмерный параметр.

Параметры уравнений (1)-(3) определяются из эксперимента. Испытания при отнулевом и симметричном нагружениях позволяют оценить чувствительность к асимметрии нагружения по уравнению $\psi = \frac{2 \cdot \sigma_{-1}}{\sigma_0} - 1$ и использовать полученное ранее

уравнение [2,3] для оценки предела выносливости при коэффициенте асимметрии $R \geq 1$:

$$\sigma_R = a \cdot \sigma_{-1}, \quad \text{где} \quad a = 2 / [2 - (1 - \psi) \cdot (1 + R)] \quad (4)$$

Информация о параметрах уравнений (1) – (4) является необходимой и достаточной для оценки ресурса конструкций при известных параметрах нерегулярного нагружения. Решение задач оценки усталости при фиксированной вероятности неразрушения подробно рассматриваются в монографиях [1-3].

На начальном этапе анализа нерегулярного нагружения необходимо учитывать, что машины проектируются для эксплуатации в условиях многократного повторения технологических или транспортных процессов. Каждый процесс состоит из типовых режимов эксплуатации.

Типовой режим эксплуатации в общем, виде можно представить как многократно повторяющийся блок случайного многочастотного нагружения, из которого необходимо выделить блоки нагружения для каждой частоты. Например, при типовом режиме движения автомобиля на несущие конструкции воздействуют нагрузки как минимум трех частот за счет колебаний неподрессоренных масс, колебаний поддрессоренных масс и воздействий дороги. Каждое воздействие необходимо рассматривать как многократно повторяемое нагружение конструкции блоком нерегулярного нагружения.

Нерегулярное одночастотное нагружение в наиболее общем виде является многократно повторяемым блоком циклов нагружения со случайными и случайно перемешанными значениями максимальных напряжений и коэффициентов асимметрии.

Реализация метода суммирования усталостных повреждений требует приведения циклов со случайными значениями коэффициента асимметрии нагружения к эквивалентным по усталостному повреждению симметричным (или отнулевым циклам), а необходимость учитывать снижение в процессе повреждения величины

предела выносливости требует построения нагрузочных блоков в виде убывающих рядов приведенных циклов напряжений.

Из уравнения (2) при $N_0 = \text{const.}$ следует формулировка эквивалентности циклов:

$$\frac{\sigma_{\max} - \sigma_R}{v_R} = \frac{\sigma - \sigma_{-1}}{v_2}, \quad (5)$$

где $\sigma_{\max}, \sigma_R, v_R$ – максимальное напряжение и параметры уравнения кривой усталости для асимметричного цикла; σ, σ_{-1}, v_2 – для симметричного цикла. Отсюда

$$\sigma = \sigma_{-1} + \frac{v_2}{v_R} (\sigma_{\max} - \sigma_R).$$

Полагая линейную зависимость v от коэффициента асимметрии цикла $v_R = v_1 + (v_1 - v_2) \cdot R$ и, используя уравнение (4), из уравнения (5) следует уравнение приведения асимметричных циклов к эквивалентным по повреждению симметричным циклам:

$$\sigma = b \cdot \sigma_{\max} - (a \cdot b - 1) \cdot \sigma_{-1}, \quad (6)$$

$$\text{где } b = \frac{v_2}{v_R} = 1 / \left[\frac{v_1}{v_2} + \left(\frac{v_1}{v_2} - 1 \right) \cdot R \right].$$

Отметим, что по той же схеме может быть получено уравнение приведения асимметричных циклов к эквивалентным по повреждению отнулевым.

Для оценки ресурса с учетом снижения предела выносливости в процессе повреждения блок случайно перемешанных симметричных напряжений ($\sigma_i > 0$) необходимо представить в виде убывающего ряда симметричных циклов:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > \dots > \sigma_i > \dots > \sigma_n. \quad (6)$$

Если все напряжения блока больше предела выносливости, то для расчета циклической долговечности N_Σ можно использовать гипотезу Пальмгрена – Майнера [5] в записи:

$$N_\Sigma = \left(\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\beta_i}{N_i} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где $\beta_i = n_i / n_{\text{бл}}$, $n_{\text{бл}}$ – число циклов многократно повторяющегося нагрузочного блока, n_i – число циклов i -го напряжения в нагрузочном блоке, N_i – циклическая долговечность при действии i -го напряжения в условиях регулярного нагружения.

В реальных условиях нагружения, когда существует вероятность превышения максимальными напряжениями блока предела выносливости вследствие как рассеяния эксплуатационных нагрузок, так и рассеяния значений предела выносливости, уравнение (7) дает завышенные оценки циклической долговечности. Гипотеза Пальмгрена – Майнера не учитывает снижения предела выносливости и подключения в процессе нагружения к повреждению напряжений ниже начального значения предела выносливости [1-3]. Из кинетической теории механической усталости с достаточной для расчетов точностью:

$$\sigma_R = g \cdot |\lg D|, \quad (8)$$

где g – коэффициент с размерностью напряжения, D_i – степень повреждения в виде отношения поврежденных усталостью площадей или моментов сопротивления (инерции) опасных сечений конструкций к номинальным. В процессе повреждения величина предела выносливости снижается с величины σ_R в начальный момент нагружения при D_0 до величины σ_{RK} в момент предельного повреждения D_k .

При повреждающем действии только напряжения σ_1 при подключении к повреждению напряжения σ_2 средняя скорость снижения предела выносливости равна $\Delta\sigma_R / \Delta N_{11}$, где ΔN_{11} определяется из уравнений кривых усталости при двух значениях предела выносливости σ_{R1} и $\sigma_{R2} < \sigma_2$. Напряжение σ_2 становится повреждающим, когда σ_{R2} будет на любую, сколь угодно малую, величину меньше этого напряжения.

При повреждающем действии напряжений σ_1 и σ_2 скорости снижения предела выносливости для подключения напряжения σ_3 равны $\Delta\sigma_R / \Delta N_{21}$ и $\Delta\sigma_R / \Delta N_{22}$, где числа циклов в знаменателях определяется как разности двух значений циклической долговечности при регулярном нагружении, напряжениях σ_1 и σ_2 и двух значениях предела выносливости σ_{R2} и $\sigma_{R3} < \sigma_3$.

Скорость снижения предела выносливости при действии всего блока напряжений $\Delta\sigma_R / \Delta N_{\Sigma 1}$ на первом этапе нагружения при подключении к повреждению напряжения σ_2 равна $\beta_1 \cdot \Delta\sigma / \Delta N_{11}$, а на втором этапе нагружения $\Delta\sigma / \Delta N_{\Sigma 2}$ при подключении к повреждению напряжения σ_3 равна: $\beta_1 \frac{\Delta\sigma_R}{\Delta N_{21}} + \beta_2 \frac{\Delta\sigma_R}{\Delta N_{22}}$. Следовательно, на первом этапе:

$$\Delta N_{\Sigma 1} = \frac{\Delta N_{11}}{\beta_1},$$

а на втором этапе:

$$\Delta N_{\Sigma 2} = 1 / \left(\frac{\beta_1}{\Delta N_{21}} + \frac{\beta_2}{\Delta N_{22}} \right).$$

Суммарное число циклов, необходимое для снижения предела выносливости до предельного повреждения:

$$N_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{j=k} \Delta N_{\Sigma j} = \sum_{j=1}^{j=k} \left(1 / \sum_{i=1}^{i=n_j} \frac{\beta_i}{\Delta N_{ji}} \right), \quad (9)$$

где k – количество напряжений, подключаемых к процессу усталостного повреждения по мере снижения предела выносливости конструкций, n_j – число повреждающих напряжений на j -том уровне напряжений.

Нерегулярное многочастотное нагружение в наиболее общем виде является многократно повторяемым блоком циклов нагружения со случайными и случайно перемешанными значениями максимальных напряжений и коэффициентов асимметрии как результат воздействия нагрузок нескольких частот. Расчет ресурса конструкций при многочастотном нагружении требует: выделения циклов напряжений действующих частот, приведения случайных асимметричных циклов к эквивалентным по повреждению симметричным (или отнулевым), построения убывающих рядов (блоков) напряжений для каждой частоты, оценку ресурса конструкций при повреждающем действии блоков каждой частоты, суммирование повреждающих действий нагрузочных блоков всех частот [7-10].

В качестве первого примера рассмотрим анализ результатов тензометрирования (данные С.М. Минюковича) рамы автомобиля – самосвала при эксплуатации в карьере. Самым тяжелым режимом является движение автомобиля в карьере с грузом. Нагруженность в этих условиях регистрировалась с помощью тензорезисторов в 50 точках рамы. Наиболее опасной по усталости являлась зона 45-го датчика на нижней полке левого лонжерона (район задних осей) в месте приварки передней части ресилителя к полке лонжерона. Обработка результатов тензометрирования велась в автоматическом режиме.

В качестве второго примера рассмотрим анализ нагруженности оси прицепа – самосвала. Нагруженность оси моделировалась при движении прицепа по дорожному

полотну (камень-брусчатка в плохом состоянии) с постоянной скоростью 40 км/час (материалы представлены автору П.П.Капустой). Обработывалось в автоматическом режиме 10 тыс. ординат напряжений, полученных с шагом 0,005 сек.

Нагрузочные блоки симметричных напряжений рассматривались как вариационные ряды, которые обрабатывались с использованием функции распределения Вейбулла в записи:

$$\frac{i}{n} = \exp \left[- \left(\frac{\sigma_i - \hat{\sigma}}{\sigma_w} \right)^w \right], \quad (10)$$

где n – число напряжений в вариационном ряду, i – порядковый номер напряжения σ_i в этом ряду, $\hat{\sigma}$ – аппроксимированное минимальное значение напряжения, σ_w – параметр с размерностью напряжения, w – показатель степени. При $i = 1$ определяется $\hat{\sigma}$ – аппроксимированное максимальное значение напряжения. Метод определения параметров рассматривается в монографии [3]. Вычисление параметров функции распределения выполнялись на персональном компьютере. Алгоритм и программа разработаны в ИМИНМАШ.

Параметры нагрузочных блоков.

Объект	Частота	Число циклов на 1 км пробега	Число циклов блока	$\hat{\sigma}$ МПа	$\hat{\sigma}$ МПа	σ_w МПа	w
Рама	1	600	30	243	6,56	29,0	0,583
	2	280	14	249	5,92	81,1	0,885
	3	100	5	241	59,43	107,1	0,901
Ось	1	1257	699	83,5	0	25,7	1,59
	2	297	165	50,4	0	15,9	1,42
	3	108	60	45,6	0	13,7	1,17

Нагрузки, действующие на раму автомобиля и ось прицепа, в порядке убывания частоты нагружения определяются: колебаниями неподрессоренных масс, колебаниями поддрессоренных масс и микропрофилем дорожного полотна.

В кинетической теории механической усталости при анализе многочастотного нагружения [3] вводится понятие повреждающего действия нагрузочных блоков и, как результат анализа, сделан вывод, что при многочастотном нагружении суммарное повреждающее действие всех нагрузочных блоков равно сумме повреждающих действий нагрузочных блоков каждой частоты. Для транспортных машин:

$$\frac{1}{L_c} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_i} + \dots + \frac{1}{L_k}, \quad (11)$$

где L_i – ресурс в км пробега при повреждающем действии отдельных нагрузочных блоков, L_c – ресурс при одновременном повреждающем действии всех блоков, k – число одновременно повреждающих блоков.

Нерегулярное многорежимное нагружение является совокупностью типовых режимов эксплуатации при многократном повторении одних и тех же процессов эксплуатации машин. Так, например, для карьерного самосвала многократно

повторяющийся эксплуатационный процесс – транспортировка груза из карьера на обоганительную фабрику, а типовыми режимами эксплуатации являются загрузка, разгрузка и движение с грузом и без груза. Движение в свою очередь включает в себя совокупность типовых режимов эксплуатации в зависимости от скорости движения, геометрии и микрогеометрии дороги. Анализ движения – это выделение типовых режимов с определением их относительной протяженности β_i – отношением длины участка типового режима ко всей протяженности транспортного процесса. Сумма относительных протяженностей: $\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_i + \dots + \beta_m = 1$.

Загрузка и разгрузка многократно повторяются вместе с повторением процесса эксплуатации, поэтому при оценке ресурса конструкции в км. пробега циклическую долговечность этих типовых режимов можно относить к протяженности транспортного процесса ($\beta=1$).

Для суммирования повреждений при расчетах ресурса конструкций необходимо иметь информацию о ресурсе конструкции при всех типовых режимах нагружения опасных зон. При анализе многорежимного нагружения вводится понятие повреждающего действия и принцип суммирования формулируется следующим образом [3]: повреждающее действие многорежимного нагружения равно сумме повреждающих действий отдельных типовых режимов нагружения с учетом относительной продолжительности действия этих режимов в общем процессе многорежимного нагружения.

Так, например, повреждающее действие движения карьерного самосвала ($1/L_d$) равно сумме повреждающих действий типовых режимов движения ($1/L_{ci}$) с учетом относительной протяженности действия этих режимов (β_i):

$$\frac{1}{L_d} = \frac{\beta_1}{L_{c1}} + \frac{\beta_2}{L_{c2}} + \dots + \frac{\beta_i}{L_{ci}} + \dots + \frac{\beta_m}{L_{cm}}. \quad (12)$$

При суммировании необходимо учитывать возможность подключения к процессу повреждения типовых режимов эксплуатации по мере снижения предела выносливости конструкции по схеме расчета ресурса при многочастотном нагружении.

Ресурс конструкции (L_Σ) с учетом ресурсов, определяемых только загрузкой (L_3) или разгрузкой (L_p), а так же движением (L_d), и относящихся ко всей протяженности транспортного процесса, можно определить с использованием уравнения (11) в записи:

$$L_\Sigma = \left(\frac{1}{L_d} + \frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_p} \right)^{-1}.$$

Заключение. Разработанная методика анализа нагруженности и расчета ресурса элементов конструкций, подверженных механической усталости, обеспечивает:

1) оценку ресурса элементов конструкций по результатам испытаний опытных образцов машин, компьютерного моделирования или регистрации нагруженности в эксплуатации при фиксированных типовых режимах эксплуатации с учетом многократного повторения этих типовых режимов;

2) выявление и устранение причин недопустимой повреждаемости элементов на стадиях доработки конструкций и подготовки серийного производства машин;

3) определение повреждающего действия в условиях эксплуатации и устранение причин недопустимой повреждаемости конструкций за счет исключения перегрузок, улучшения дорожных условий и повышения технического уровня эксплуатации машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Почтенный Е.К. Кинетическая теория механической усталости и ее приложения. - Минск, Наука и техника, 1973, 216 с. ил.;
2. Почтенный Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин. – Минск, Наука и техника, 1983, 246 с. ил.;
3. Почтенный Е.К. Кинетика усталости машиностроительных конструкций. – Минск, «Арти – Фекс», 2002, 186 с. ил.;
4. Почтенный Е.К. Анализ экспериментально – аналитического метода усталостных испытаний.// Заводская лаборатория, диагностика материалов, №9, 2000, стр. 53 – 56;
5. Miner M.A. Cumulative damage in fatigue.// Journal of applied mechanics. Transaction of the ASME, vol.12, p.159 – 164;
6. Почтенный Е.К. Вероятностная оценка долговечности деталей машин при нерегулярном нагружении по результатам испытаний при регулярном нагружении.// Надежность и контроль качества, 1988, №10, стр. 25 – 29.
7. Высоцкий М.С., Почтенный Е.К., Горбачевич М.И., Курбан А.В. Исследования сопротивления усталости при двухчастотном нагружении.// Доклады АН БССР, 1991, т.35, №4, стр. 334 – 337;
8. Высоцкий М.С., Почтенный Е.К., Горбачевич М.И. Суммирование усталостных повреждений при двухчастотном нагружении.// Доклады АН Беларуси, 1992, том 36, №6, стр.511 – 514;
9. Высоцкий М.С., Почтенный Е.К., Парфенович Е.О. Сопротивление усталости элементов конструкций при двухчастотном нагружении.// Вестник машиностроения, 1995, №1, стр.3 – 6;
10. Почтенный Е.К., Кадолко Л.И., Парфенович Е.О.// Вести НАН Беларуси, серия физ.-техн. наук, 1997, № 4, стр.26 – 30.
11. Почтенный Е.К. Анализ и синтез усталости элементов конструкций.// Доклады НАН Беларуси, 2002, т.46, № 2, стр. 105 – 107.

УДК 621. 81: 621 – 192

П.П. Капуста

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ
НА СТАДИЯХ РЕСУРСНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ МАШИН ЗАДАННОЙ
НАДЕЖНОСТИ**

*Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь*

There were developed fundamentals of a system approach to resource design according to criteria of resistance of details fatigue on stages (including initial stage) of machine design. The approach consists of simulation machine modeling and conditions of operation. Thus, calculated definition of local dangerous on fatigue and loading elements of details (in places of localization of the biggest values of stress field) is ensured. The system approach is realized both at calculated-experimental and calculated predictions. The last, thus, has a series of advantages: definition of details fatigue on early machine design stages is ensured, cost and terms of design are reduced, competitiveness of created machines is increased.

В последнее время рынок диктует заводам-производителям необходимость быстрого реагирования на запросы потребителя, создания и освоение производства новых машин с оптимальными массо-габаритными характеристиками и требуемой надежностью. В связи с этим необходимы методы расчетной проектной оценки в вероятностной постановке нагруженности их несущих систем и элементов, а также характеристик сопротивления усталости и ресурса опасных по усталости зон. Реализация этих задач успешно может быть решена с использованием системного