УДК 620.178.3

Е.П. БЛОХИН, д-р техн. наук, профессор (ДИИТ)
Ю.М. ЧЕРКАШИН, канд. техн. наук (ВНИИЖТ)
Л.А. МАНАШКИН, Dr., Prof., Mechanical Engineering Department, Njit, США
М.Л. КОРОТЕНКО, д-р техн. наук, профессор (ДИИТ)
С.В. МЯМЛИН, д-р техн., наук, доцент (ДИИТ)
Р.Б. ГРАНОВСКИЙ, канд. техн. наук, ст. научн. сотр. (ДИИТ)
В.Л. ГОРОБЕЦ, канд. техн. наук, вед. научн. сотр. (ДИИТ)
Н.Я. ГАРКАВИ, ст. научн. сотр. (ДИИТ)
Е.Ф. ФЕДОРОВ, ст. научн. сотр. (ДИИТ)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ХОДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНОВ

Приведено алгоритми обробки результатів ходових випробувань залізничних вагонів з метою визначення запасу витривалості несучих конструктивних елементів.

Приведены алгоритмы обработки результатов ходовых испытаний железнодорожных вагонов с целью определения запаса выносливости несущих конструктивных элементов.

The algorithms of treatment of results of working tests of railway carriages with the target of decision of supply of endurance of bearing structural elements are resulted.

Как известно [1], под усталостью понимают процесс постепенного накопления повреждений материала при действии повторно-переменных (циклических) напряжений, не достигающих предела прочности. Усталость металлов проявляется в возникновении и развитии трещин. При этом задолго до появления трещин усталости в металле накапливаются необратимые изменения. Поскольку завершающий этап усталостного разрушения напоминает по внешнему виду хрупкое разрушение [1], то чаще всего считают, что усталость металла определяется только нормальными напряжениями. Согласно документам [2, 3] усталостная прочность несущих конструкций железнодорожных вагонов характеризуется коэффициентом запаса, чем подразумевается, что в течение всего времени эксплуатации вагона возникновение усталостных трещин в металле принципиально невозможно. Поэтому задача определения усталостной прочности несущей конструкции вагона может быть дополнена [4] определением расчетного напряжения, предопределяющего накопление в металле усталостных повреждений, и определением расположения площадки, в которой накапливаются наибольшие расчетные напряжения. Выводы об усталостной прочности несущих конструкций железнодорожных вагонов в соответствии с требованиями [2] должны формироваться по результатам ходовых испытаний. В настоящей работе приводится алгоритм обработки информации, зарегистрированной тензодатчи-ками во время ходовых испытаний.

Можно предположить [1], что свободная плоская поверхность несущей конструкции испытывает плоское напряженное и трехмерное деформированное состояние. Тензоры напряжений и деформаций в случае плоского напряженного состояния соответственно

$$T_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{x,y} & 0 \\ \tau_{x,y} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, T_\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{x,y}/2 & 0 \\ \gamma_{x,y}/2 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix}$$

Поскольку [1] напряжения σ_x, σ_y и $\tau_{x,y} = \tau$ от деформации ε_z не зависят, для регистрации плоского напряженного состояния используется розетка деформаций. Если до начала испытаний известно, что рассматриваемый элемент конструкции испытывает одноосное напряженное состояние, то для регистрации напряжений достаточно одного тензодатчика.

Во время ходовых испытаний железнодорожной техники правильно регистрируются только динамические добавки деформаций. Нулевые уровни деформаций медленно смещаются относительно своего первоначального положения (в том числе и вследствие дрейфа нулей тензоусилителей). Процесс, регистрируемый одним тензодатчиком в одноосном напряженном состоянии, назовем $x_0(t)$. Процессы, регистрируемые прямоугольной трехэлементной розеткой деформаций [1,4] в случае плоского напряженного состояния, назовем $x_1(t)$, $x_2(t)$ и $x_3(t)$. При этом положим, что $x_1(t)$ и $x_2(t)$ регистрируются датчиками, ориентированными во взаимно перпендикулярных направлениях, а $x_3(t)$ регистрируется датчиком, ориентированным вдоль биссектрисы угла между направлениями измерения $x_1(t)$ и $x_2(t)$. Для компенсации дрейфа нулей процессы $\overset{3}{\underset{i=0}{\forall}} x_i(t)$ необходимо центрировать. Для центрирования при прохождении испытательным поездом прямых участков пути определяются средние значения [5] процессов $\overset{3}{\underset{i=0}{\forall}} x_i(t)$

$$m_i = \frac{1}{T}\int_0^T x_i(t)\,dt. \qquad (1)$$

Центрирование в прямых участках пути заключается в вычитании из $x_i(t)$ величины m_i, соответствующей данному участку, а центрирование в кривых участках пути и при прохождении стрелок – в вычитании величины m_i, зарегистрированной в ближайшей к данному участку прямой. В выражении (1) символом T обозначена длительность процесса $x_i(t)$. Значение деформации $\varepsilon_i(t)$ смещено относительно центрированного процесса $\left(x_i(t) - m_i\right)$ на статическую составляющую деформации $X_{\text{ст},i}$:

$$\overset{3}{\underset{i=0}{\forall}} \varepsilon_i(t) = x_i(t) - m_i + X_{\text{ст},i}. \qquad (2)$$

Обычно значение $X_{\text{ст},i}$ определяется расчетным путем. Иногда (например, в случае одноосного растяжения или сжатия) удается определить значение $X_{\text{ст},i}$ прямыми или косвенными измерениями.

Нормальные и касательные напряжения плоского напряженного состояния в плоскости розетки определяются согласно зависимостям [1, 4]:

$$\sigma_x(t) = A\cdot(\varepsilon_1(t) + \mu\cdot\varepsilon_2(t)), \qquad (3)$$

$$\sigma_y(t) = A\cdot(\varepsilon_2(t) + \mu\cdot\varepsilon_1(t)), \qquad (4)$$

$$\tau(t) = B\cdot(2\cdot\varepsilon_3(t) - \varepsilon_1(t) - \varepsilon_2(t)), \qquad (5)$$

где $A = E/(1-\mu^2)$; $B = 0{,}5\cdot E/(1+\mu)$; E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона.

Поскольку при плоском напряженном состоянии $\sigma_z(t) = \tau_{x,z}(t) = \tau_{y,z}(t) = 0$, нормальные (расчетные) напряжения в площадках, расположенных наклонно к плоскости розетки, определяются согласно [4]:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{р}}(t) &= \sigma_x(t)\cdot\cos^2(x,\upsilon) + \\ &+ \sigma_y(t)\cdot\cos^2(y,\upsilon) + \\ &+ 2\cdot\tau(t)\cdot\cos(x,\upsilon)\cdot\cos(y,\upsilon)\end{aligned} \qquad (6)$$

где (x,υ) и (y,υ) – углы между нормалью $\vec{\upsilon}$ к площадке и положительными направлениями осей датчиков, фиксирующих процессы $x_1(t)$ и $x_2(t)$;

$$(x,\upsilon) \in [0°, 30°, 45°, 60°, 90°],$$

$$(y,\upsilon) \in [0°, 30°, 45°, 60°, 90°]; \qquad (7)$$

при этом

$$\cos^2(x,\upsilon) + \cos^2(y,\upsilon) \le 1. \qquad (8)$$

Очевидно, при одноосном напряженном состоянии в соответствии с принятыми ранее обозначениями

$$\sigma_{\text{р}}(t) = E\cdot\varepsilon_0(t). \qquad (9)$$

Соответствующая выражениям (6) и (9) реализация расчетного $\sigma_{\text{р}}(t)$ напряжения для каждой площадки сначала подвергается "выделению экстремумов" [6], после чего в реализации остаются только экстремальные значения, причем, соседние экстремумы отличаются не менее, чем на ширину класса K. Ширина класса согласно [6] определяется как

$$K = \frac{\max(\sigma_{\text{р}}^{(0)}(t)) - \min(\sigma_{\text{р}}^{(0)}(t))}{(12 \div 30)}, \quad (10)$$

где $\sigma_{\text{р}}^{(0)}(t)$ - полный ансамбль реализаций, участвующих в обработке. Поскольку априори глобальные экстремумы напряжений в ансамбле не известны, можно положить $K \le \sigma_{\text{т}}/50$, где $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести для данного материала. Ширина класса должна быть не меньше двойной амплитуды шумов регистрирующей аппаратуры. Для стали 09Г2, например, обычно принимают $K \approx 4$ МПа.

После "выделения экстремумов" реализация схематизируется по методу "дождя" [6, 7]. При этом из реализации последовательно выделяются размахи полуциклов $2X_a$ и средние значения в полуциклах X_M, после чего асимметричные циклы нагружения приводятся к эквивалентным симметричным [6]:

$$X_{\text{пр}} = \begin{cases} X_a + \psi X_M \Leftarrow X_M > 0; \\ X_a \qquad\qquad \Leftarrow X_M \le 0. \end{cases} \quad (11)$$

Согласно [8] коэффициент асимметрии цикла нагружения определяется выражением $\psi = \left(0{,}02 + 2\cdot 10^{-4}\cdot\sigma_{\text{В}}\right)/K_K$. Здесь $\sigma_{\text{В}}$ – предел прочности, измеряемый в МПа. Коэффициент K_K, учитывающий влияние концентрации напряжений, нормируется в [3]. Если предел усталостной прочности детали $\left(\sigma_{-1}/K_K\right)$ известен, то для легированных сталей согласно [8] допускается определять коэффициент асимметрии цикла нагружения из выражения $\psi = \left(\sigma_{-1}/K_K\right)/\left(2\sigma_{\text{В}} - \left(\sigma_{-1}/K_K\right)\right)$. Здесь σ_{-1} - предел выносливости материала по нормальным напряжениям, измеряемый в МПа.

Если в реализации $\sigma_{\text{р}}(t)$ для площадки, идентифицированной углами (x,υ) и (y,υ), в соответствии с (11) было выделено N_p полуциклов с приведенными полуразмахами $\underset{J=1}{\overset{N_{\text{р}}}{\forall}} X_{\text{пр}}(J)$, то согласно гипотезе о линейном накоплении усталостных повреждений (несмотря на отсутствие повреждений, видимых глазом) критерий усталости определится из выражения

$$D((x,\upsilon),(y,\upsilon)) = 0{,}5\cdot\sum_{J=1}^{N_{\text{р}}} X_{\text{пр}}^m(J)\,. \quad (12)$$

Показатель степени m в [4] называется параметром циклической трещиностойкости металла. Согласно [3] величина m для сварных и литых рам и балок определяется из выражения

$$m \approx \begin{cases} \dfrac{16}{K_k} \text{ для малоуглеродистых сталей} \\ \dfrac{16}{K_k} \text{ для низколегированных сталй} \end{cases}$$

Согласно [6, 7] допускается определять значение критерия усталости из циклограммы:

$$D((x,\upsilon),(y,\upsilon)) == \sum_k X^m(k)\cdot n((x,\upsilon),(y,\upsilon),k)\,. \quad (13)$$

Здесь $X(k)$ – напряжение, соответствующее середине класса (интервала) с номером k, в который попали амплитуды $n((x,\upsilon),(y,\upsilon),k)$ полных циклов напряжений. Следует отметить, что $\inf_J (X_{\text{пр}}(J)) = K/2$, то есть приведенных полуразмахов, меньших, чем полуширина класса, не бывает. При построении циклограмм не обязательно, чтобы ширина интервала амплитуд (приведенных полуразмахов) напряжений равнялась ширине класса. Количество циклов нагружения с приведенным полуразмахом напряжений класса k (k-го интервала) для каждой площадки $n((x,\upsilon),(y,\upsilon),k)$ равно половине количества полуциклов, попавших в класс k. Здесь и далее для наглядности $X(0) = 0{,}75\cdot K$, то есть классу с номером 0 соответствует $K/2 \le X_{\text{пр}} < K$; для всех остальных классов $\underset{k\ge 1}{\forall} X(k) = (k+0{,}5)\cdot K$, а условие попадания амплитуды напряжений в класс с номером $k \ge 1$: $k\cdot K \le X_{\text{пр}} < (k+1)\cdot K$. Допускается при построении циклограмм принимать $\underset{k\ge 1}{\forall} X(k) = k\cdot K$, а условие попадания амплитуд в класс с номером k формулировать в виде

$$(k-0{,}5)\cdot K \le X_{\text{пр}} < (k+0{,}5)\cdot K\,.$$

При измерении напряжений с использованием розетки деформаций каждому фрагменту опытных поездок испытательного поезда со сквозным номером по ансамблю j поставим в соответствие величину критерия усталости

$$D_j = \max_{(x,\upsilon),(y,\upsilon)} D((x,\upsilon),(y,\upsilon)) \qquad (14)$$

и длину участка L_j. При одноосном напряженном состоянии, когда деформация $x_0(t)$ фиксировалась одним датчиком, а не розеткой деформаций, критерий усталости в реализации с номером j определяется аналогично (12) или (13):

$$D_j = 0{,}5 \cdot \sum_{J=1}^{N_\text{р}} X_\text{пр}^m(J)$$

или

$$D_j = \sum_k X^m(k) \cdot n(k) .$$

Здесь, как и в (13), $n(k)$ – количество циклов с приведенным полуразмахом напряжений класса k в реализации с номером j.

Отметим, что определение критерия усталости согласно (13) по сравнению с (12) в запас усталостной прочности испытуемого объекта идет не всегда.

Интересно отметить, что в достаточно широких пределах от ширины класса K значение критерия усталости D почти не зависит. В табл. 1 в качестве примера приведены циклограммы и значения критериев усталости, полученные согласно (2, 11, 13) по реализации $x_0(t)$ при K =4 МПа и K =2 МПа (в обоих случаях $E \cdot X_\text{ст}$=25,3 МПа; ψ =0,02; m =4). Реализация $x_0(t)$ была зафиксирована на нижней поверхности неконсольной части хребтовой балки вблизи пятникового узла во время ходовых испытаний полувагона на прямом участке стыкового пути длиной 1,898 км при скорости 80 км/ч.

Таблица 1.

Зависимость значения критерия усталости D от ширины класса K

<table>
<tr><td>K, Мпа</td><td>D, (МПа)^4</td><td colspan="11"></td></tr>
<tr><td rowspan="4">4</td><td rowspan="4">0,26·10^7</td><td>k</td><td colspan="2">0</td><td colspan="2">1</td><td colspan="2">2</td><td colspan="2">3</td><td colspan="2">4</td></tr>
<tr><td>Интервал, МПа</td><td colspan="2">[2,4)</td><td colspan="2">[4,8)</td><td colspan="2">[8,12)</td><td colspan="2">[12,16)</td><td colspan="2">[16,20)</td></tr>
<tr><td>$X(k)$, МПа</td><td colspan="2">3</td><td colspan="2">6</td><td colspan="2">10</td><td colspan="2">14</td><td colspan="2">18</td></tr>
<tr><td>2·$n(k)$</td><td colspan="2">292</td><td colspan="2">419</td><td colspan="2">137</td><td colspan="2">61</td><td colspan="2">10</td></tr>
<tr><td rowspan="4">2</td><td rowspan="4">0,28·10^7</td><td>k</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr>
<tr><td>Интервал, МПа</td><td>[1,2)</td><td>[2,4)</td><td>[4,6)</td><td>[6,8)</td><td>[8,10)</td><td>[10,12)</td><td>[12,14)</td><td>[14,16)</td><td>[16,18)</td><td>[18,20)</td></tr>
<tr><td>$X(k)$, МПа</td><td>1,5</td><td>3</td><td>5</td><td>7</td><td>9</td><td>11</td><td>13</td><td>15</td><td>17</td><td>19</td></tr>
<tr><td>2·$n(k)$</td><td>426</td><td>292</td><td>264</td><td>155</td><td>95</td><td>42</td><td>40</td><td>21</td><td>5</td><td>5</td></tr>
</table>

В дальнейшем будем пользоваться удельным критерием усталости $G_j = D_j / L_j$, где j – сквозной по ансамблю номер фрагмента испытательной поездки. Поставим в соответствие [9] каждому фрагменту испытательной поездки комбинацию параметров П, Ф, У, V и рассортируем значения G_j по этим параметрам. Ниже перечислены возможные значения параметров П, Ф, У, V.

Значение параметра $П = ж$ определяет порожний пробег испытуемого вагона в данном фрагменте испытательной поездки, $П = г$ – пробег с полной загрузкой. Допускается оценивать усталостную прочность только по результатам испытаний вагона с полной загрузкой. Погрешность такой оценки обычно идет в запас усталостной прочности объекта испытаний.

Параметр Ф определяет план пути. $\text{Ф} = пр$ – следование по прямому участку пути, $\text{Ф} = к$ – в кривой, $\text{Ф} = с$ – по стрелкам; иногда целесообразно вместо $\text{Ф} = к$ ввести следующие градации: $\text{Ф} = мал$ – следование в кривых малого радиуса $R \le R_{\text{с}}$ (обычно принимается $R_{\text{с}}$=350 м); $\text{Ф} = ср$ – следование в кривых среднего радиуса $R_{\text{с}} < R \le R_{\text{б}}$ (обычно принимается $R_{\text{б}}$=650 м), $\text{Ф} = бол$ – следование в кривых большого радиуса $R > R_{\text{б}}$. Каждая реализация, соответствующая следованию испытательного поезда в кривых, должна содержать информацию о прохождении с постоянной скоростью либо S-образной кривой, либо участка, содержащего, как правую, так и левую кривые примерно одинакового радиуса.

В зависимости от технологии укладки пути обычно достаточно двух градаций для сортировки по параметру $У$: $У = ст$ – стыковой путь, $У = бст$ – бесстыковой путь. Для бесстыкового пути каждая обработанная реализация напряжений должна соответствовать прохождению участка, содержащего стыковые вставки.

Отметим, что сортировки в зависимости от технологии укладки пути $У \in \{ст, бст\}$ и разделение кривых в зависимости от их радиуса в [2] не предусматривается.

Очевидно, перечисленные условия сортировок можно формально записать в виде множеств допустимых значений параметров $П$, Ф, $У$: $П \in \{(ж,г) \vee г\}$, $\text{Ф} \in \{пр, с, (к \vee (мал, ср, бол)\}$, $У \in \{(ст, бст) \vee 0\}$. Здесь $У = 0$ подразумевает отсутствие сортировок реализаций по признаку следования по стыковому или бесстыковому пути.

Параметр V – интервальная оценка скорости испытательного поезда.

В общем случае элемент $G(П, \text{Ф}, У, V)$ должен содержать суммарные за все испытания сведения для всех j, удовлетворяющих требованиям к каждому конкретному сочетанию $П$, Ф, $У$ и V:

$$\underset{П\,\text{Ф}\,У\,V}{\forall\forall\forall\forall} G(П, \text{Ф}, У, V) = \left. \frac{\sum\limits_j G_j \cdot L_j}{\sum\limits_j L_j} \right|_{j:[П, \text{Ф}, У, V]} \qquad (15)$$

Допускается (в запас усталостной прочности) определять $G(П, \text{Ф}, У, V)$ как наибольшее (наихудшее) значение G_j среди всех j, удовлетворяющих требованиям к каждому конкретному сочетанию $П$, Ф, $У$ и V:

$$\underset{П\text{Ф}УV}{\forall\forall\forall\forall} G(П, \text{Ф}, У, V) = \max_{j:[П, \text{Ф}, У, V]} G_j \qquad (16)$$

Согласно нормативным документам [2, 3] коэффициент запаса усталостной прочности конструкции (n) определяется выражением

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{K_к \cdot \sigma_{экв}} \ge [n], \qquad (17)$$

где $[n]$ – табулированное в [2,3] минимальное допустимое значение коэффициента n,

$$\sigma_{экв} = \sqrt[m]{\frac{Г \cdot S_c \cdot G_{ВЗВ}}{N_0}}, \qquad (17)$$

$$G_{ВЗВ} = \sum_У P_У^{(\text{м})}(У) \sum_П P_П^{(\text{м})}(П) \sum_{\text{Ф}} P_{\text{Ф}}^{(\text{м})}(У, \text{Ф}) \sum_V P_V^{(\text{м})}(П, \text{Ф}, У, V) \cdot G(П, \text{Ф}, У, V), \qquad (19)$$

– S_c – срок службы (количество лет) испытуемого вагона, N_0 – базовое число циклов до разрушения образца данного материала при циклическом нагружении симметричным циклом напряжений амплитудой σ_{-1} (величина N_0 нормирована в [2]), $Г$ – нормативный годовой пробег (км) испытуемого вагона (среднестатистический грузовой полувагон, к примеру, проходит $Г \approx$76800 км/год; полувагон, курсирующий в маршруте, - $Г \approx$130000 км/год), $P_У^{(\text{м})}(У)$, $P_П^{(\text{м})}(П)$, $P_{\text{Ф}}^{(\text{м})}(У, \text{Ф})$, $P_V^{(\text{м})}(П, \text{Ф}, У, V)$ - модифицированные распределения вероятностей;

– $P_У(У)$ - распределение вероятностей (в долях пути) эксплуатации испытуемого вагона на стыковом ($У = ст$) и бесстыковом ($У = бст$) пути. Очевидно $P_У(0) = 1$. Для Приднепровской железной дороги, например, на 2001 год можно было принять $P_У(ст) = P_У(бст) = 0{,}5$. В табл. 2 приведены циклограммы и значения критериев G, полученные согласно [2, 11, 13, 15], по всем реализациям, зарегистрированным тем же самым датчиком, находящимся на хребтовой балке, при испытаниях полувагона в прямых участках пути со скоростями 30≤ v <45 (км/ч) на стыковом и бесстыковом пути ($E \cdot X_{\text{ст}}$=25,3 МПа; ψ =0,02; m =4; K =2 МПа).

Таблица 2

Значения критериев усталости, полученные на стыковом и бесстыковом пути

У	G_j, (МПа)^4/км	L_j, км	Интервал, МПа	[1,4)	[4,6)	[6,8)	[8,10)	[10,12)	[12,14)	[14,16)	[16,18)	[18,20)	[20,22)
			$X(k)$, МПа	2,5	5	7	9	11	13	15	17	19	21
ст	$0{,}96{\cdot}10^6$	9,725	$2{\cdot}n(k)$	5652	1724	931	463	250	118	42	18	2	5
			$2{\cdot}n(k)/L_j$	581,2	177,3	95,7	47,6	25,7	12,1	4,3	1,9	0,2	0,5
бст	$0{,}68{\cdot}10^6$	1,126	$2{\cdot}n(k)$	620	184	74	37	31	12	1	1		
			$2{\cdot}n(k)/L_j$	550,6	163,4	65,7	32,9	27,5	10,7	0,9	0,9		

Из табл. 2 видно, что при одинаковых скоростях значение критерия G на стыковом пути несколько выше, чем на бесстыковом. Поскольку на стыковом пути обычно не реализуются скорости, близкие к конструкционной, то при $У$ =0 высоким скоростям приходится ставить в соответствие информацию, зарегистрированную на бесстыковом пути, а таким скоростям, которые реализуются и на стыковом, и на бесстыковом пути, – информацию об испытаниях на стыковом пути;

– $P_П(П)$ – распределение вероятностей (в долях пути) эксплуатации испытуемого вагона в порожнем ($П = ж$) и загруженном ($П = г$) состоянии. Очевидно, $P_П(ж) + P_П(г) = 1$. Согласно [2] для универсальных полувагонов $P_П(ж)$=0,25; $P_П(г)$=0,75;

– $P_Ф(У,Ф)$ - распределение вероятностей (в долях пути) эксплуатации испытуемого вагона на прямых участках пути ($Ф = пр$), в кривых малого радиуса ($Ф = мал$), в кривых среднего радиуса ($Ф = ср$), в кривых большого радиуса ($Ф = бол$) и при следовании по стрелкам ($Ф = с$). Допускается [2] не сортировать результаты испытаний в зависимости от радиуса кривых. Выражение $Ф = к$ соответствует эксплуатации вагона в кривых вне зависимости от радиуса. Очевидно:

$$\forall_{У} \begin{cases} P_Ф(У,пр) + P_Ф(У,к) + P_Ф(У,с) = 1 \\ \qquad \Leftarrow\ Ф \in [пр,к,с], \\ P_Ф(У,пр) + P_Ф(У,мал) + \\ P_Ф(У,ср) + P_Ф(У,бол) + P_Ф(У,с) = 1 \\ \qquad \Leftarrow\ Ф \in [пр,мал,ср,бол,с]. \end{cases}$$

Распределение $P_Ф(У,Ф)$ для $Ф \in [пр,к,с]$ нормируется в [2, 3], распределение $P_Ф(У,Ф)$ для $Ф \in [пр,мал,ср,бол,с]$ в зависимости от $R_с$ и $R_б$ можно построить на основании [10]. При этом отметим, что на бесстыковом пути обычно нет кривых радиусом меньше 350 м, т.е. для $R_с$=350 м выполняется условие $P_Ф(бст,мал)$=0. Интересно отметить, что согласно [2] $P_Ф(У,пр)$=0,7, а согласно [3] $P_Ф(У,пр)$=0,75.

– $P_V(П,Ф,У,V)$ – распределения по скоростям вероятностей (в долях пути) эксплуатации испытуемого вагона при заданных $П$, $Ф$, $У$. Так $P_V(П,Ф,У,V_Д)$ – это вероятность эксплуатации экипажа при заданных $П$, $Ф$, $У$ и скоростях v испытуемого экипажа, соответствующих зависимости

$$V_Д - \Delta V/2 \le v < V_Д + \Delta V .$$

Здесь ΔV – интервал скоростей, принятый согласно требованиям [2]. Очевидно,

$$\underset{П}{\forall}\underset{У}{\forall}\underset{Ф}{\forall} \sum_{Д=1}^{\partial_{\max}} P_V(П,Ф,У,V_Д) = 1 .$$

В [2] табулировано распределение вероятностей $P_\upsilon(V)$ – долей времени эксплуатации вагона в заданных интервалах скоростей. P_V и P_υ связаны зависимостью

$$\underset{j \ge 1}{\forall} P_{V,j} = \frac{V_j \cdot P_{\upsilon,j}}{\sum_i V_i \cdot P_{\upsilon,i}}, \tag{20}$$

где j, i – номера интервалов скоростей; V_j, V_i – центральные для j-го и i-го интервала скорости (например, $V_j = (j - 1/2)\cdot \Delta V$); $P_{\upsilon,j}$ – доля времени, а $P_{V,j}$ – доля пути при движении испытуемого вагона со скоростями v, соответствующими зависимости

$$V_j - \Delta V/2 \le v < V_j + \Delta V/2 .$$

При обработке результатов испытаний может оказаться, что для какого-то сочетания параметров значения $G(П,Ф,У,V)$ не определялись. Тогда распределения $P_У(У)$, $P_П(П)$, $P_Ф(У,Ф)$, $P_V(П,Ф,У,V)$ должны быть модифицированы согласно следующих правил.

1. Если при каком-то сочетании $П$, $Ф$, $У$ для скоростей $V_{\partial 1} - \Delta V/2 \le v < V_{\partial 2} + \Delta V/2$ при $\partial 2 - \partial 1 + 1 < \partial_{\max}$ значения критериев $G(П,Ф,У,V)$ не определялись, то есть $\underset{Д=\partial 1}{\overset{\partial 2}{\forall}} G(П,Ф,У,V_Д) = 0$, то распределение $P_V(П,Ф,У,V)$ модифицируется:

$$\begin{cases} \underset{Д=\partial 1}{\overset{\partial 2}{\forall}} P_V^{(м)}(П,Ф,У,V_Д) = 0, \\ P_V^{(м)}(П,Ф,У,V_{\partial 1-1}) = \sum_{Д=\partial 1-1}^{\partial 2} P_V(П,Ф,У,V_Д) \\ \Leftarrow \lambda_1 \vee \lambda_2 , \\ P_V^{(м)}(П,Ф,У,V_{\partial 2+1}) = \sum_{Д=\partial 1}^{\partial 2+1} P_V(П,Ф,У,V_Д) , \\ \Leftarrow \lambda_3 \vee \lambda_4 \\ P_V^{(м)}(П,Ф,У,V_Д) = P_V(П,Ф,У,V_Д) \\ \text{для прочих значений } Д . \end{cases}$$

Здесь

$$\lambda_1 = (\partial 1 > 1) \wedge (\partial 2 \le \partial_{\max}) \wedge$$
$$\wedge (G(П,Ф,У,V_{\partial 1-1}) > G(П,Ф,У,V_{\partial 2+1})),$$
$$\lambda_2 = (\partial 1 > 1) \wedge (\partial 2 = \partial_{\max}) ,$$
$$\lambda_3 = (\partial 1 \ge 2) \wedge (\partial 2 < \partial_{\max}) \wedge$$
$$\wedge (G(П,Ф,У,V_{\partial 1-1}) \le G(П,Ф,У,V_{\partial 2+1})),$$
$$\lambda_4 = (\partial 1 = 1) \wedge (\partial 2 < \partial_{\max}) .$$

2. Если на участках стыкового $У = ст$ или бесстыкового $У = бст$ пути данного плана $Ф = ф1$ значения критериев $G(П,Ф,У,V_Д)$ не определялись, то есть $\underset{Д=1}{\overset{\partial_{\max}}{\forall}} G(П,Ф,У,V_Д) = 0$, то модифицируется распределение $P_Ф(У,Ф)$:

$$\begin{cases} P_Ф^{(м)}(У,ф1) = 0 , \\ P_Ф^{(м)}(У,ф2) = P_Ф(У,ф1) + P_Ф(У,ф2) . \end{cases}$$

Правило выбора значения $ф2$ следующее:

$$\begin{cases} ф2 = пр & \Leftarrow ф1 = с\ , \\ ф2 = ср & \Leftarrow ф1 = мал\ , \\ ф2 = бол & \Leftarrow ф1 = ср\ , \\ ф2 = пр & \Leftarrow ф1 = бол\ . \end{cases}$$

Для прочих значений $Ф$ принимается $P_{Ф}^{(м)}(У,Ф) = P_{Ф}(У,Ф)$.

3. Если измерения на бесстыковом пути ($У = бст$) не проводились, то есть

$$\overset{\partial_{\max}}{\underset{Д=1}{\forall}} G(П,\ Ф,\ У = бст,\ V_{Д}) = 0,$$

то $P_{У}^{(м)}(бст) = 0$; $P_{У}^{(м)}(ст) = 1$. Если измерения на стыковом пути ($У = ст$) не проводились $\overset{\partial_{\max}}{\underset{Д=1}{\forall}} G(П,\ Ф,\ У = ст,\ V_{Д}) = 0$, то $P_{У}^{(м)}(ст) = 0$, а $P_{У}^{(м)}(бст) = P_{У}(бст) + 2 \cdot P_{У}(ст)$. Здесь в запас усталостной прочности испытуемого вагона подразумевается, что значения критерия G, определенные на стыковом пути, не более, чем в 2 раза, превышают значения этого же критерия G, определенные на бесстыковом пути.

4. Если измерения в груженом режиме вагона не проводились $\overset{\partial_{\max}}{\underset{Д=1}{\forall}} G(П = г, Ф, У, V_{Д}) = 0$, а нагружение вагона по условиям эксплуатации в груженом и порожнем режимах значительно отличаются, то делать выводы об усталостной прочности вагона по данной методике нельзя. Если нагружение вагона в груженом и порожнем режимах мало отличаются (например, у купейного пассажирского вагона), то правомерно делать заключение об усталостной прочности несущих конструкций вагона по результатам испытаний в каком-то одном режиме:

$$\begin{cases} \left.\begin{matrix} P_{П}^{(м)}(г) = 1 \\ P_{П}^{(м)}(ж) = 0 \end{matrix}\right\} \Leftarrow \underset{Ф}{\forall} \overset{\partial_{\max}}{\underset{Д=1}{\forall}} G(П = ж, Ф, У, V_{Д}) = \\ \qquad\qquad\qquad = 0\ , \\ \left.\begin{matrix} P_{П}^{(м)}(г) = 0 \\ P_{П}^{(м)}(ж) = 1 \end{matrix}\right\} \Leftarrow \underset{Ф}{\forall} \overset{\partial_{\max}}{\underset{Д=1}{\forall}} G(П = г, Ф, У, V_{Д}) = \\ \qquad\qquad\qquad = 0\ . \end{cases}$$

Допускается определять $\sigma_{экв}$ из выражения:

$$\sigma_{экв} = \sqrt[m]{\frac{Г \cdot S_c}{N_0} \cdot G_{\max}}\ , \qquad (21)$$

где $G_{\max} = \max\limits_{П,Ф,У,V} G(П,Ф,У,V)$. Если при этом окажется, что $n > [n]$, то загрубление расчетов идет в запас усталостной прочности конструкции.

В некоторых [6, 7] источниках приводится пессимистический прогноз долговечности конструкции по формуле

$$S_c \geq \frac{\sigma_{-1}^{m} \cdot N_0}{K_K^m \cdot \widetilde{G}_{\max} \cdot Г}\ , \qquad (22)$$

где

$$\widetilde{G}_{\max} = \max_{j}(G_j : [X_{пр} \geq \sigma_{-1}/K_K]) \quad (22)$$

определяется только теми циклами нагружения, при которых приведенные полуразмахи напряжений превышали величину σ_{-1}/K_K. Следует отметить, что этот прогноз противоречит требованиям [2], так как условие (16) может оказаться не выполненным, даже если $\underset{j}{\forall} X_{пр} < \sigma_{-1}/K_K$.

При компьютерной обработке результатов испытаний частота квантования $f_{кв}$ определяется [11] выражением

$$f_{кв} = (10 \ldots 20) \cdot f_{m},$$

где f_{m} определяется из выражения

$$f_{m} = \max_{f_0 > 0}(f_0 : [A(f_0) \geq 0{,}05 \cdot \max_{0 < f < \infty} A(f)]) \quad (23)$$

Здесь $A(f)$ – модуль преобразования Фурье от самой высокочастотной реализации регистрируемых процессов $\overset{3}{\underset{i=0}{\forall}} x_i(t)$. Для обработки результатов ходовых испытаний самоходных железнодорожных вагонов обычно достаточно $f_{кв}$=600 Гц, а для несамоходных железнодорожных вагонов - даже $f_{кв}$=100 Гц.

Изложенный в данной статье алгоритм компьютерной обработки результатов ходовых испытаний железнодорожных вагонов может также рассматриваться как основа программы и методики тестирования для дальнейшей аттестации и поверки компьютерной системы измерений усталостной прочности несущих конструкций подвижного состава.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. Справочное пособие / Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов и др. – К.: Наукова думка, 1981. - 584 с.

2. РД 24.050.37-95. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. - 101 с.

3. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). - М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. - 319 с.

4. Гусев А.С. Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках. - М.: Машиностроение, 1989. - 248 с.

5. Корн Г., Корн Т.. Справочник по математике для научных работников и инженеров. - М.: Наука, 1968. - 720 с.

6. ГОСТ 25.101-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов.

7. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. - М.: Машиностроение, 1985. – 223 с.

8. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости.

9. Фор Р., Кофман А., Дени-Папен М. Современная математика. - М.: Мир, 1966. - 272 с.

10. Иоанесян А.И. Улучшение трассы существующего железнодорожного транспорта. - М.: Транспорт, 1972. - 171 с.

11. Гаркави Н.Я., Добров И.В. О способах имитации вибрационного состояния объектов // Вестник машиностроения. – 1999. – № 4. - С. 52-54.