

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАПАСА ВЫНОСЛИВОСТИ И ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПО РАЗРУШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

С целью уточненного определения коэффициентов запаса выносливости несущих конструкций подвижного состава и расчета амплитуд эквивалентных по разрушающей способности симметричных циклов их нагружения предлагается расчетная модель, которая учитывает распределение параметров циклов нагрузки несущей конструкции в эксплуатационных условиях.

З метою уточненого визначення коефіцієнтів запасу витривалості несучих конструкцій рухомого складу та розрахунку амплітуд еквівалентних за руйнівною здатністю симетричних циклів їх навантаження пропонується розрахункова модель, яка враховує розподіл параметрів циклів навантаження несучої конструкції в експлуатаційних умовах.

With the aim of precise definition of endurance margin factors of the rolling-stock carrying structures and calculation of amplitudes of symmetric cycles of their loading, equivalent in their destructibility, a calculation model has been offered, which takes into account the distribution of the loading cycle parameters of the carrying structure in operational conditions.

Аппарат коэффициентов запаса является основой инженерного расчета несущих конструкций железнодорожного подвижного состава [1–5]. Различные несущие элементы его конструкций работают при существенно различных соотношениях средних напряжений и амплитуд циклов нагружения. Поэтому методы определения коэффициентов запаса должны учитывать реальный характер их эксплуатационной нагруженности, по крайней мере в том случае, когда уже имеется соответствующий экспериментальный материал. С понятием коэффициента запаса тесно связано понятие эквивалентных напряжений, которые должны иметь одинаковый запас выносливости с асимметричными эксплуатационными напряжениями. По величинам эквивалентных напряжений оценивается ресурс несущих конструкций подвижного состава. В связи с этим методология определения эквивалентных напряжений также весьма важна.

Методы и подходы к определению коэффициентов запаса для асимметричных напряжений подробно обсуждены в работе [6]. На рис. 1. приведен один из аналогов диаграммы предельных циклов (линия предельных амплитуд), которая является геометрической интерпретацией вида циклического нагружения несущей конструкции. Характеристиками цикла нагружения считаются: амплитуда

$\sigma_a = 0,5 |(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})|$, σ_{\max} – максимальное алгебраическое значение напряжения цикла, σ_{\min} – минимальное алгебраическое значение напряжения цикла; размах напряжения цикла $\sigma_p = 2\sigma_a$ и среднее напряжение цикла $\sigma_m = 0,5(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$. Геометрическое построение выполняется на числовой плоскости, характеризующей параметры циклов нагружения (назовем ее условно *плоскостью параметров цикла нагружения*).

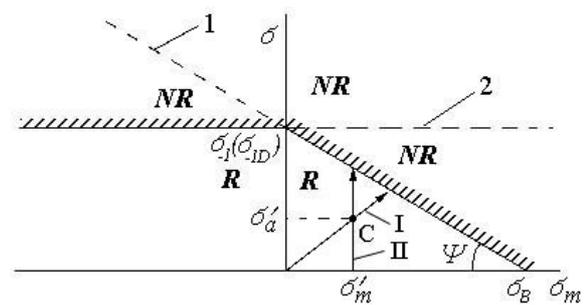


Рис. 1. Плоскость параметров цикла нагружения с характерными атрибутами

Полуплоскость при $\sigma > 0$ (положительная амплитуда цикла) может быть разделена на две области: R – область условно неограниченной долговечности материала или конструкции, когда отсутствуют амплитуды, превышающие предел выносливости σ_{-1} (для конструкции

σ_{-1D}); NR – область ограниченной долговечности.

Координаты цикла нагружения в осях $\sigma_m - \sigma$ (σ_m – среднее напряжение цикла, σ – амплитуда цикла) однозначно определяют параметры (σ'_a, σ'_m) цикла C нагружения и его принадлежность к соответствующей области (R, NR).

Переход нагружения конструкции из области R в NR и наоборот может осуществляться в процессе длительной эксплуатации по причинам, не связанным с уровнем и характером внешних нагрузок, действующих на конструкцию, например:

- изменение моментов сопротивления конструкции и коэффициентов концентрации напряжений вследствие равномерной и местной коррозии;

- изменение механических свойств материала конструкции вследствие длительного нагружения и воздействия окружающей среды;

- релаксация уровней остаточных напряжений вследствие тренировки материала нагружением.

Кроме того, верхняя полуплоскость параметров цикла нагружения делится на два квадранта: $\sigma_m \geq 0$ – циклы нагружения с растягивающим средним напряжением цикла и $\sigma_m < 0$ – циклы нагружения со сжимающим средним напряжением цикла. Учет асимметрии циклов для этих областей принципиально различен.

При использовании идеализации Гудмана [6] область работоспособности R в квадранте положительных (растягивающих) средних напряжений цикла нагружения отделяется от области NR линией 1 (см. рис. 1), описываемой уравнением

$$\sigma_{-1m}^+ = \sigma_{-1} - \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_\sigma} \sigma_m, \quad \sigma_m \geq 0, \quad (1)$$

где σ_{-1m}^+ – предел выносливости при положительном среднем напряжении цикла; σ_{-1} – предел выносливости; σ_σ – предел прочности материала (конструкции); σ_m – положительное среднее напряжение цикла.

Наклон прямой Гудмана ψ (коэффициент чувствительности к асимметрии цикла) определяется как

$$\psi = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_\sigma}. \quad (2)$$

При сжимающем среднем напряжении цикла чувствительность к асимметрии цикла практически отсутствует [7], в этом случае области R и NR разделяются линией 2 (см. рис. 1), уравнение которой

$$\sigma_{-1m}^- = \sigma_{-1}, \quad \sigma_m < 0, \quad (3)$$

где σ_{-1m}^- – предел выносливости при отрицательном среднем напряжении цикла.

Граница области работоспособности R вне зависимости от знака среднего напряжения цикла может быть формально описана единым уравнением

$$\sigma_{-1m} = \min(\sigma_{-1m}^+, \sigma_{-1m}^-). \quad (4)$$

Для цикла C (см. рис. 1) с координатами (σ'_a, σ'_m) коэффициент запаса может быть определен двумя способами [6] в предположении различных путей перехода к границе области работоспособности конструкции (или материала):

- переход из точки C к прямой Гудмана осуществляется по лучу I , проведенному из начала координат (то есть при переходе к границе области R , σ'_a и σ'_m увеличиваются пропорционально, что называется запасом выносливости по подобному циклу). Данное предположение [6; 8] приводит к соотношению для коэффициента запаса n_D конструкции

$$n_D = \frac{\sigma_{-1D}}{\sigma + \frac{\psi}{K_k} \sigma_m}, \quad (5)$$

где K_k – коэффициент концентрации напряжений в конструкции;

- переход из точки C делается по лучу II (σ_m постоянно, изменяется только амплитуда σ – запас по амплитуде). Такое предположение дает такое расчетное соотношение [6] для коэффициента запаса по амплитуде n_{AD}

$$n_{AD} = \frac{\sigma_{-1D}}{\sigma / \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_\sigma}\right)}. \quad (6)$$

Эквивалентные симметричные напряжения определяются из условия, что вычисленные для них и для асимметричных напряжений коэффициенты запаса являются одинаковыми.

При определении эквивалентных напряжений по подобному циклу приходим к соотношению [6]

$$\sigma_{EP} = \sigma + \frac{\Psi}{K_k}(\sigma_m + \sigma_s), \quad (7)$$

где σ_{EP} – эквивалентное по нагрузочной способности напряжение в конструкции, рассчитанное по принципу подобного цикла; σ_s – напряжение от статической (весовой) нагрузки на элемент конструкции.

Таким же образом, исходя из одинакового коэффициента запаса по амплитуде, получим [6] значения эквивалентных напряжений, в которые не входит коэффициент чувствительности Ψ и коэффициент концентрации напряжений K_k

$$\sigma_{EA} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{(\sigma_m + \sigma_s)}{\sigma_s}}, \quad (8)$$

где σ_{EA} – эквивалентное напряжение в конструкции, рассчитанное по принципу запаса по амплитуде.

Для типичных значений коэффициента чувствительности к асимметрии цикла $\Psi = 0,3$ и коэффициента концентрации напряжений $K_k = 4,0 \dots 4,1$ значение множителя при среднем значении напряжения цикла σ_m формулы (7) составляет $0,073 \dots 0,075$.

Это позволяет в ряде случаев не принимать во внимание величины средних напряжений циклов, а учитывать только их амплитуды [3], что тоже можно считать самостоятельным подходом к учету асимметрии циклов нагружения.

В работе [6] сопоставлены способы определения эквивалентных напряжений (уравнения (7), (8)) в тех случаях, когда уровень эксплуатационных напряжений близок к пределу выносливости конструкции. Там же сделан вывод о том, что при этом получаются взаимно близкие результаты такого приведения. Однако для напряжений, значительно превышающих предел выносливости (при проведении форсированных стендовых вибрационных испытаний), или редких, но существенных перегрузок несущих элементов, погрешность по наработке может быть достаточно существенной, причем не в сторону её завышения.

Оценим приближенно максимальные взаимные отклонения при разных способах приведения асимметричных циклов нагружения к эквивалентным симметричным напряжениям. Результаты этих оценок сведены в табл. 1. В таблице методы приведения пронумерованы следующим образом: 1 – приведение по принципу подобного цикла; 2 – приведение по принципу запаса по амплитуде; 3 – учет только амплитуд циклов нагружения.

Таблица 1

Оценочное сравнение способов приведения асимметричных циклов напряжений к эквивалентным симметричным (за эталон принят метод приведения по подобному циклу, установленный Нормами расчета)

| № метода приведения | Статическая нагрузка | Коэффициент динамики | Расчетная формула | Безразмерное значение эквивалентного напряжения | Относительная погрешность, % | Погрешность по наработке, % |
|---------------------|----------------------|----------------------|---|---|------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 1,0 | 0,3 | $\sigma = 0,3 + \frac{\Psi}{K_k} 1,0^*$ | 0,375 | 0 | 0*** |
| 2 | | | $\sigma = \frac{0,3}{1 - \frac{1,0}{2,5}}^{**}$ | 0,500 | 33 | 313 |
| 3 | | | $\sigma = 0,3$ | 0,300 | -20 | -207 |

Примечания:

* – приняты значения $\Psi = 0,3$ и $K_k = 4,0$;

** – в расчетной формуле принято соотношение $\sigma_{-1}/\sigma_g = 195/450 = 0,43$, которое обеспечивает близкое к максимальному значение вычитаемого в знаменателе формулы;

*** – наработка определяется по формуле $D = \sum \sigma^m$, σ – безразмерное напряжение цикла, $m = 4$ – показатель степени кривой выносливости.

Как видно из приведенных оценок, погрешности оценок наработок несущих элементов могут достигать больших величин (200–300 %), что особенно влияет на результаты расчета в случае реализации больших значений напряжений.

По данным динамических ходовых и прочностных испытаний поведение динамических напряжений в элементах конструкции экипажа

не подчиняется исключительно ни одной из гипотез, представленных уравнениями (7), (8).

На рис. 2 представлены последовательности параметров циклов нагружений консоли продольной балки рамы тележки пассажирского вагона КВЗ-ЦНИИ, представленные в координатах плоскости параметров циклов нагружения.

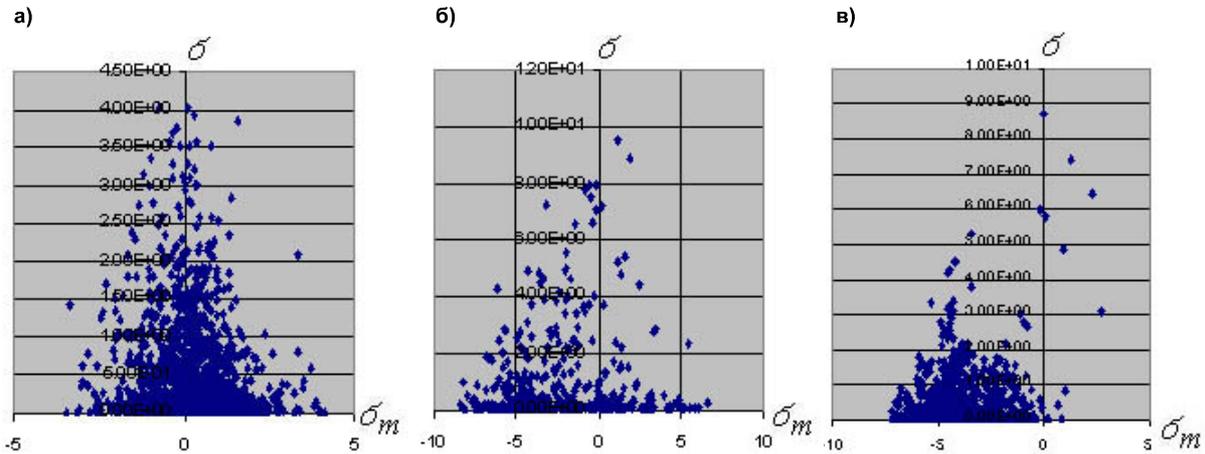


Рис. 2. Последовательности циклов нагружения рамы тележки пассажирского вагона: а – скорость 20–40 км/ч, прямая; б – скорость 80–100 км/ч, прямая; в – скорость 60–80 км/ч, кривая радиуса $R > 650$ м

Характер расположения последовательности циклов на плоскости их параметров показывает, что желательно использовать специальные методы приведения процессов нагружения к последовательности эквивалентных симметричных циклов с учетом их эксплуатационного распределения.

Для определения коэффициента запаса выносливости и эквивалентных напряжений с учетом эксплуатационного распределения параметров циклов нагружения несущей конструкции рассмотрим чертеж, приведенный на рис. 3.

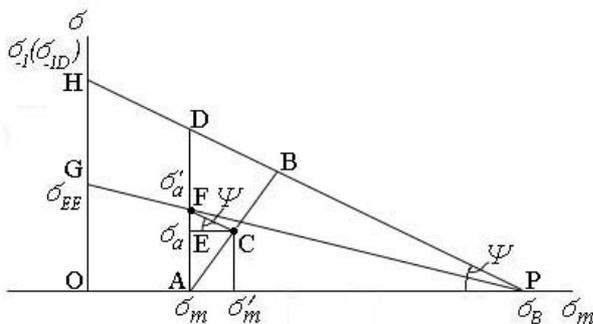


Рис. 3. Определение эквивалентных напряжений с учетом их эксплуатационного распределения

Пусть в состоянии покоя элемент несущей конструкции находится в состоянии, которое

характеризуется координатами $(0, \sigma_m)$, $\sigma_m > 0$ и относится к правому верхнему квадранту плоскости параметров циклов нагружения. Напряжение σ_m характеризует статическую нагрузку на несущую конструкцию в её равновесном состоянии.

При выведении несущей конструкции из состояния равновесия, например, в точку C с координатами (σ_a, σ'_m) , коэффициент запаса будем находить вдоль траектории отклонения от равновесного состояния, то есть вдоль линии ACB .

Тогда из геометрических соображений коэффициент запаса

$$n_{ED} = AB / AC, \quad (9)$$

где n_{ED} – коэффициент запаса, определенный на направлении выхода элемента несущей конструкции из состояния равновесия.

Проведем вспомогательную линию $FC \parallel HP$. Из подобия треугольников AFC и ADB и равенства углов ECF и OPH , получим

$$\sigma'_a = \sigma_a + \psi (\sigma'_m - \sigma_m). \quad (10)$$

Далее, определяя из (1) ординату точки D , а также с учетом (9), (10) и парного подобия тре-

угольников OGP , AFP и OHP , ADP аналогично [6] имеем:

$$n_{ED} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a + \psi(\sigma'_m - \sigma_m)},$$

$$\sigma_{EE} = \frac{\sigma_a + \psi(\sigma'_m - \sigma_m)}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_e}}, \quad (11)$$

где σ_{EE} – эквивалентное напряжение, определенное на направлении выхода элемента несущей конструкции из состояния равновесия.

Рассмотрим теперь случай, когда направление отклонения параметров цикла нагружения от равновесного положения таково, что соответствующая линия пересекается с линией 2 (см. рис. 1). Данная ситуация отражена на рис. 4.

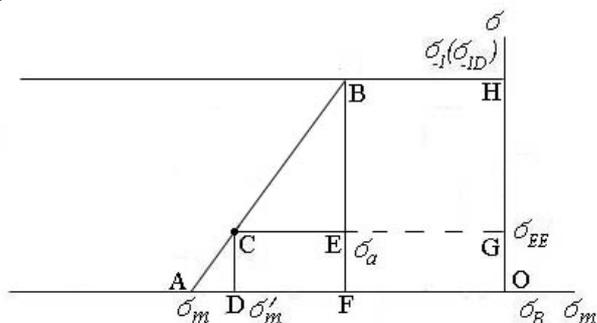


Рис. 4. Иллюстрация к определению эквивалентных напряжений при отрицательной асимметрии цикла нагружения

Учитывая подобие треугольников ACD и ABF , а также равенство отрезков $EF = OG$, $FB = OH$, получим выражения для коэффициента запаса выносливости и эквивалентного напряжения в виде

$$n_{ED} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a},$$

$$\sigma_{EE} = \sigma_a. \quad (12)$$

С учетом случайного характера отклонений параметров циклов нагружения от равновесного положения, нельзя без соответствующей логической проверки предполагать, какую из формул (11) или (12) необходимо применить для расчета коэффициента запаса и амплитуды эквивалентного напряжения. Однако с учетом соотношения (4) можно предложить простейшее выражение для выбора соответствующих соотношений, удобное для реализации автоматизированной обработки данных натурных испытаний.

$$n_{ED} = \min \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a + \psi(\sigma'_m - \sigma_m)}, \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} \right),$$

$$\sigma_{EE} = \max \left(\frac{\sigma_a + \psi(\sigma'_m - \sigma_m)}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_e}}, \sigma_a \right). \quad (13)$$

Результаты сравнительной обработки напряжений в консольной части продольной балки рамы тележки пассажирского вагона КВЗ-ЦНИИ, показанные ранее на рис. 2, приведены в табл. 2. В качестве критерия, влияющего на дальнейшие оценки ресурса несущей конструкции, принята её наработка.

Таблица 2

Результаты сравнительного расчета наработок несущей конструкции при разных способах приведения напряжений к амплитудам эквивалентных симметричных циклов нагружения

| Условия движения | | Наработка при использовании способа приведения, МПа ⁴ ·10 ⁴ | | | |
|--------------------------|--|---|---------------------|-------------------------|------------------|
| Диапазон скоростей, км/ч | План пути: П – прямая; К – кривая R > 650 м | по подобному циклу | по запасу амплитуды | учет амплитуд колебаний | по формулам (13) |
| 20–40 | П | 8,90 | 0,76 | 0,59 | 0,77 |
| 80–100 | П | 15,10 | 6,90 | 5,40 | 6,80 |
| 60–80 | К | 8,10 | 3,10 | 2,40 | 3,00 |

Для определения наработок здесь используется выражение [3], основанное на степенной кривой выносливости, в котором принимаются во внимание все амплитуды циклов нагружения:

$$D = \sum_{i=1}^N \sigma_{Ei}^m, \quad (14)$$

где D – мера наработки; σ_{Ei} – эквивалентное напряжение i -го цикла; N – суммарное число циклов нагружения конструкции; $m = 4$ – показатель степени кривой выносливости.

Как видно из результатов расчета, оценки наработок несущей конструкции по запасу ам-

плитуды и эксплуатационному распределению наиболее близки друг другу.

Они ниже наработки по подобным циклам, но выше наработки с учетом только амплитуд циклов нагружения.

Однако данные оценки для напряжений малых величин недостаточно показательны и можно ожидать большего их отличия при иных соотношениях параметров циклов. Анализ расчетных соотношений (5)–(8) и (13) позволяет сделать выводы о соотношении уровней эквивалентных напряжений, возникающих при различных ситуациях движения. Результаты анализа приведены в табл. 3.

Таблица 3

Возможные соотношения расчетных величин эквивалентных напряжений

| Метод приведения | Характер циклического нагружения конструкции | Ситуации, приводящие к появлению наибольших для данного метода напряжений |
|------------------------------------|--|---|
| По подобному циклу | Нагружение в области малых амплитуд напряжений с асимметричными циклами нагружения | Движение по прямому участку пути хорошего качества |
| По запасу по амплитуде | Нагружение в области больших амплитуд напряжений | Движение в кривой и в прямой для элементов с превалирующей статической составляющей циклов нагружения |
| По эксплуатационному распределению | Нагружение в области больших амплитуд напряжений с асимметричными циклами нагружения | Движение в кривой и в прямой для элементов с превалирующей статической составляющей циклов нагружения и неудовлетворительным качеством пути |
| Учет амплитуд циклов нагружения | Большие амплитуды циклов нагружения | Неудовлетворительные показатели динамики подвижного состава |

В соответствии с расчетными соотношениями, запас по амплитуде и эксплуатационное распределение параметров циклов нагружения дают наиболее близкие оценки значений эквивалентных напряжений и наработки конструкции в эксплуатации.

Таким образом, в работе идет речь об уточнении оценок наработки, коэффициентов запаса и амплитуд эквивалентных напряжений с учетом эксплуатационного распределения параметров циклов нагружения конструкций.

Выводы

1. При оценке коэффициентов запаса выносливости и определении симметричных напряжений, эквивалентных эксплуатационным, целесообразно учитывать реальное распределение параметров циклов нагружения конструкции.

2. Предложен способ оценки коэффициентов запаса выносливости и определения эквивалентных напряжений, основанный на учете направления выхода координаты цикла нагружения из равновесного положения.

3. Разработаны расчетные соотношения для определения запаса выносливости и вычисления симметричных эквивалентных напряжений с учетом характера распределения параметров циклов нагружения несущих конструкций подвижного состава.

4. Учет эксплуатационного распределения параметров циклов нагружения наиболее близок к методу их оценки по запасу амплитуды. На этапе проектирования подвижного состава целесообразно использовать соотношения запаса по амплитуде для оценки коэффициентов запаса и эквивалентных напряжений в конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технические требования к проектируемым локомотивам по условиям прочности, динамики и воздействия на путь. – М.: МПС, ВНИИЖТ, 1964. – 13 с.
2. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ВНИИВ-ВНИИЖТ, 1983. – 260 с.
3. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ РФ, 1996. – 319 с.
4. Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств экипажной части моторвагонного подвижного состава железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. – М.: МПС РФ, ВНИИЖТ, 1997.
5. Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. – М.: МПС РФ, ВНИИЖТ, 1998. – 145 с.
6. О модели сопротивления усталости несущих конструкций тягового подвижного состава для оценки их остаточного ресурса / Блохин Е. П., Горобец В. Л., Кулешов В. П., Саввин Ю. И // Вісник СУДУ, 2002. – № 2. – С. 276–289.
7. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
8. Гаркави Я. Н., Демин Ю. В., Стукалов А. И., Филиппюк С. И. К вопросу о продлении долговечности сварных узлов путевых машин по результатам испытаний. В сб. «Переходные режимы движения и колебания подвижного состава». Вып. 114. – Д., ДИИТ, 1970. – С. 144–150.

Поступила в редколлегию 20.10.03.