

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ТРАНСПОРТА

УДК 539.43

В. И. СЕНЬКО, доктор технических наук, С. В. МАКЕЕВ, кандидат технических наук, В. В. КОМИССАРОВ, кандидат технических наук, С. А. СКОРОХОДОВ, научный сотрудник, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПАСА СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Рассмотрены особенности определения характеристик сопротивления усталости конструкций вагонов в результате проведения ходовых прочностных и динамических испытаний, а также при реализации испытаний на соударение и «сбрасывание» с клиньев. Реализация ускоренного метода определения коэффициента сопротивления запаса произведена на примере испытаний вагона-цистерны. Показано, что только в зоне приварки лап рамы к котлу вагона наблюдаются коэффициенты запаса сопротивления усталости, близкие к допускаемой величине. В целом, установлено, что испытанная цистерна имеет требуемый запас по критерию сопротивления усталости на весь назначенный срок службы. Делается вывод, что постоянное совершенствование методик испытаний позволит получать более достоверные данные о запасе сопротивления усталости реальных конструкций подвижного состава и тем самым производить его проектирование более рационально и экономично, что позволит снижать металлоемкость таких изделий и риск их эксплуатации.

Введение. Наметившиеся тенденции в вагоностроении ведут к увеличению осевой погонной нагрузки, что, в свою очередь, приводит к дополнительному увеличению силового воздействия как на несущие конструкции подвижного состава, так и на элементы инфраструктуры. Одним из основных механизмов обеспечения безопасности и повышения качества производимой продукции на территории Таможенного союза является система технических регламентов, которые содержат обязательные для применения и исполнения требования к создаваемой (в том числе модернизируемой) продукции. Такая система, с учетом постоянно обновляемой нормативной базы и создаваемой инновационной продукции, требует постоянного совершенствования применяемых методик испытаний и подходов в практике подтверждения соответствия объектов железнодорожного транспорта.

Основной характеристикой работоспособности длительно работающих несущих конструкций железнодорожных вагонов является усталостная прочность, характеризующаяся соответствующим коэффициентом запаса сопротивления усталости. При его значениях, выше установленных норм (допускаемой величины), подразумевается, что в течение всего времени эксплуатации вагона возникновение усталостных трещин в металле принципиально невозможно.

При классическом подходе к определению коэффициента запаса сопротивления усталости получают данные об эксплуатационной нагруженности при движении вагонов в составе поезда по прямым и кривым участкам пути и стрелочным переводам с допускаемой скоростью вплоть до конструкционной при периодических служебных регулировочных торможениях, периодических умеренных рывках и толчках, штатной работе механизмов и узлов вагона (III расчетный режим по [3]). Данный метод испытаний связан с проведением длительных ходовых прочностных и динамических испытаний в указанных условиях и во всем диапазоне скоростей движения на специальных полигонах.

С другой стороны, в испытательном центре железнодорожного транспорта «СЕКО» БелГУТа отрабатывается ускоренный метод осуществления такого рода комплексных воздействий, проводя их моделирование отдельными видами воздействий на вагон: испытанием на соударение и «сбрасыванием» с клиньев. Ударные испытания проводятся с целью моделирования динамических напряжений и их распределения в элементах рамы и кузова вагона при его эксплуатации. При испытаниях по сбросу с клиньев моделируются соответствующие режимы вертикального динамического нагружения с измерением динамических напряжений, возникающих в конструкции, и определением коэффициентов вертикальной динамики.

В статье описываются основные особенности и результаты практической апробации ускоренного метода при определении коэффициента запаса сопротивления усталости, которые могут быть использованы при проведении испытаний натуральных образцов новых, модернизируемых и серийно выпускаемых грузовых вагонов, предназначенных для эксплуатации на сети железных дорог ОАО «РЖД» и БелЖД колеи 1520 мм на общих основаниях.

Результаты и их обсуждение. Выводы об усталостной прочности несущих конструкций железнодорожных вагонов в соответствии с предъявляемыми требованиями производятся с учетом вероятностного рассеивания характеристик сопротивления усталости элементов конструкций и случайного характера динамического нагружения, возникающего в условиях эксплуатации или соответствующих испытаний. В расчетной практике нормирован [3, 4] и широко применяется метод, основанный на условии суммирования повреждений и уравнения кривой усталости. При этом используется достаточно распространенная в расчетной практике гипотеза линейного суммирования повреждений Пальмгрена-Майнера, в соответствии с которой условие разрушения (повреждение $D_p = 1$) при дискретном и произвольном изменении нагрузки имеет вид

$$D_p = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \text{ или } D_p = \int_0^{\infty} \frac{dn_i}{N_i} = 1, \quad (1)$$

где n_i – число циклов нагружения при заданном напряжении σ_i (наработка); N_i – число циклов до разрушения образца при заданном напряжении σ_i (устанавливается по левой ветви кривой усталости); i – число уровней нагружения.

Таким образом, под усталостной поврежденностью в данном случае понимается относительная долговечность, т.е. отношение наработки n_i к циклической долговечности N_i при заданном уровне напряжений.

При известной функции $f(\sigma_i)$ плотности распределения амплитудных значений напряжений в детали число циклов повторения напряжений будет

$$dn_i = T_{np} f_3 f(\sigma_i) d\sigma_i, \quad (2)$$

где T_{np} – срок службы конструкции до разрушения при непрерывной работе (движении) вагона; f_3 – эффективная средняя частота изменения динамических напряжений; $f(\sigma_i)$ – функция плотности распределения амплитудных значений напряжений.

Принимая степенное уравнение кривой усталости

$$\sigma_i^m N_i = \sigma_{aN}^m N_0, \quad (3)$$

получают выражение амплитуды установившегося, эквивалентного эксплуатационному, режима нагружения детали

$$\sigma_{a,3} = \sqrt[m]{\sum_1^{k_{vi}} T_{np} p_{vi} f_{3vi} \int_0^{\infty} \frac{\sigma_i^m f(\sigma_i) d\sigma_i}{N_0}}, \quad (4)$$

или, в случае дискретного распределения амплитудных значений напряжений

$$\sigma_{a,3} = \sqrt[m]{\frac{T_{np}}{N_0} \sum_1^{k_{vi}} p_{vi} f_{3vi} \sum_1^{k_{\sigma i}} \sigma_i^m p_{\sigma i}}, \quad (5)$$

где σ_{aN} – предел выносливости (предельная амплитуда) конструкции (детали), соответствующий базовому числу циклов N_0 ; σ_i – амплитуда напряжений (данного разряда) от эксплуатационных нагрузок; $p_{\sigma i}$ и p_{vi} – соответственно частота (вероятность) появления напряжения с уровнем σ_i в данном интервале скоростей и доля времени, приходящаяся на эксплуатацию вагона со скоростью v_i ; $k_{\sigma i}$ и k_{vi} – число разрядов дискретизации соответственно амплитуд напряжений и диапазона скоростей движения; f_{3vi} – частота изменения динамических напряжений, характерная для данной скорости; m – показатель степени в уравнении кривой усталости.

Центральную (эффективную) частоту изменения динамических напряжений для каждого интервала скоростей определяют из осциллограмм напряжений по выражению

$$f_3 = \frac{x_i}{t_i}, \quad (6)$$

где x_i – количество измеренных амплитуд напряжений на i -й осциллограмме (с учетом «нулевых» значений); t_i – продолжительность записи на i -й осциллограмме (с); i – номер реализации (осциллограммы), или по формуле

$$f_3 = \sqrt{\int_0^{\infty} f^2 g(f) df}, \quad (7)$$

где $g(f)$ – нормированная функция спектральной плотности.

При отсутствии экспериментальных данных эффективную частоту процесса изменения динамических напряжений допускается определять по формуле

$$f_3 = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{f_{ст}}}, \quad (8)$$

где a – коэффициент, принимаемый в зависимости от типа подвижного состава; g – ускорение свободного падения; $f_{ст}$ – статический прогиб рессорного подвешивания грузового вагона, м.

По определенному эквивалентному $\sigma_{a,3}$ значению амплитуды напряжений в конструкции и предельной амплитуде $\sigma_{a,N}$ напряжений (пределу выносливости, соответствующему определенной вероятности неразрушения) проверяют усталостную прочность проектируемого узла или детали:

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,3}} \geq [n], \quad (9)$$

где $[n]$ – минимально допустимое значение коэффициента запаса сопротивления усталости, принимаемое в зависимости от исходных данных проводимого расчета.

При использовании надежных экспериментальных данных о режимах эксплуатационной нагруженности и прочностных характеристиках детали с учетом вероятностного рассеивания допустимые коэффициенты запаса принимаются в диапазоне от 1,3 до 1,7. Наличие приближенных данных о прочности детали или режимах ее нагруженности требует использования значений коэффициентов запаса от 1,5 до 1,9. Использование же приближенных данных о прочности детали и режимах ее нагруженности обязывает использовать повышенные значения коэффициентов запаса от 1,8 до 2,2 [3, 4].

Если проектируемое или сертифицируемое изделие является ответственной деталью подвижного состава, то для нее принимают большие значения коэффициентов запаса усталости. Так, например, при одних и тех же исходных данных для элементов кузова будет принят коэффициент запаса, равный 1,5, а для колесной пары – 1,9.

Величину среднего значения предельной амплитуды напряжений (предела выносливости) $\bar{\sigma}_{a,N}$ узлов и деталей устанавливают, проводя испытания на стендах динамического нагружения в условиях, близких к эксплуатационным (несимметричный цикл изменения напряжений, правильное приложение нагрузок и опорных реакций и т.п.). При отсутствии экспериментальных данных она может быть получена из выражения

$$\bar{\sigma}_{a,N} = \frac{\bar{\sigma}_{-1}}{(\bar{k}_{\sigma})_k}, \quad (10)$$

где $\bar{\sigma}_{-1}$ – среднее (медианное) значение предела выносливости гладкого стандартного образца из материала (по ГОСТ 25.502) при симметричном цикле изменения напряжений на базе N_0 ; $(\bar{k}_{\sigma})_k$ – среднее значение общего коэффициента снижения предела выносливости в выбранной контрольной зоне (или детали), определяемого по соответствующим экспериментальным и справочным данным.

Расчетное значение предела выносливости материала конструкции $\sigma_{a,N}$, соответствующее определенной вероятности безотказной работы, для контрольной зоны (детали) при симметричном цикле напряжений определяется по формуле

$$\sigma_{a,N} = \bar{\sigma}_{a,N} (1 - z_p v_{\sigma_{a,N}}), \quad (11)$$

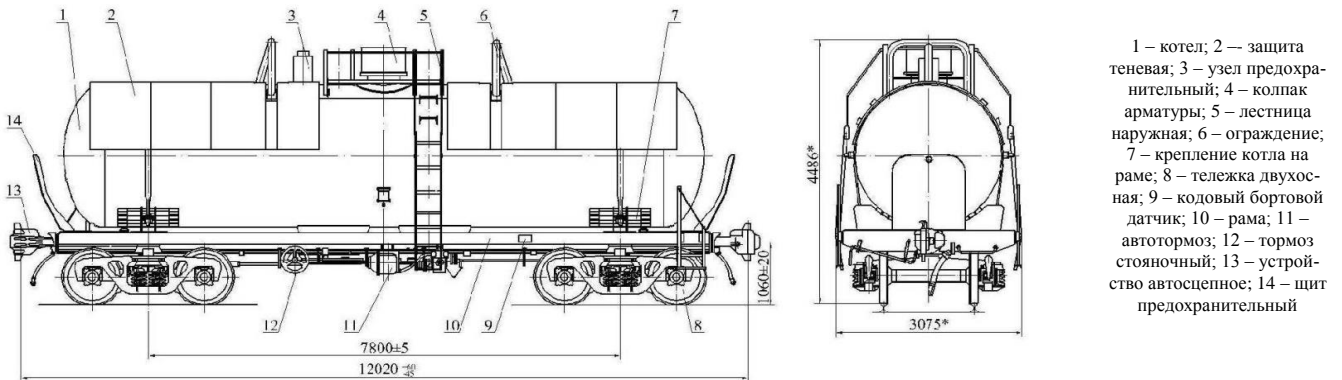
где z_p – квантиль распределения σ_a , N , соответствующий односторонней вероятности (например, при $P = 95\%$ $z_p = 1,645$); $v_{\sigma_{a,N}}$ – коэффициент вариации предела выносливости материала по [3].

Величины амплитуд динамических напряжений, полученные в результате натурного эксперимента при несимметричном цикле нагружения, приводятся к эквивалентному симметричному циклу:

$$\sigma_a = \sigma_a^{\text{эксп}} + \sigma_m \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_B}, \quad (12)$$

где σ_a – амплитуда динамического напряжения, приведенная к симметричному циклу и эквивалентная экспериментально полученному несимметричному; $\sigma_a^{\text{эксп}}$ – амплитуда экспериментально полученного несимметричного цикла; σ_m – среднее напряжение цикла в контрольной зоне экспериментально полученного несимметричного цикла; σ_B – значение временного сопротивления материала в контрольной зоне.

Рассмотрим методику реализации ускоренного метода определения коэффициента сопротивления запаса на примере испытаний вагона-цистерны (рисунок 1).



- 1 – котел; 2 – защита теневая; 3 – узел предохранительный; 4 – колпак арматуры; 5 – лестница наружная; 6 – ограждение; 7 – крепление котла на раме; 8 – тележка двухосная; 9 – кодовый бортовой датчик; 10 – рама; 11 – автотормоз; 12 – тормоз стояночный; 13 – устройство автосцепное; 14 – щит предохранительный

Рисунок 1 – Общий вид вагона-цистерны

Основные элементы котла и лапы рамы изготовлены из проката низколегированной стали марки 09Г2С категории 14 по ГОСТ 5520 ($\sigma_{-1} = 200$ МПа). Зеты хребтовой балки – из низколегированной стали марки 09Г2С категории 14, класса прочности не ниже 345 по ГОСТ 19281 ($\bar{\sigma}_{-1} = 220$ МПа). Шкворневая и концевые балки рамы, горловина люка-лаза – из низколегированной стали марки 09Г2С категории 14, класса прочности не ниже 325 по ГОСТ 19281 ($\sigma_{-1} = 210$ МПа).

Испытания проводились на полигоне Испытательного центра железнодорожного транспорта «СЕКО» БелГУТа.

Регистрация процессов изменения показаний тензометрирования и прогиба рессорного подвешивания осуществлялась с использованием аппаратно-программного комплекса проведения динамических испытаний на основе аналого-цифрового преобразователя MGC Plus. До начала испытаний осуществлялась наклейка тензорезисторов на раму и котел вагона-цистерны в наиболее напряженных и ответственных узлах вагона, на основе соответствующего конечно-элементного расчета и опыта эксплуатации. Места расположения тензорезисторов обозначены на рисунках 2 и 3.

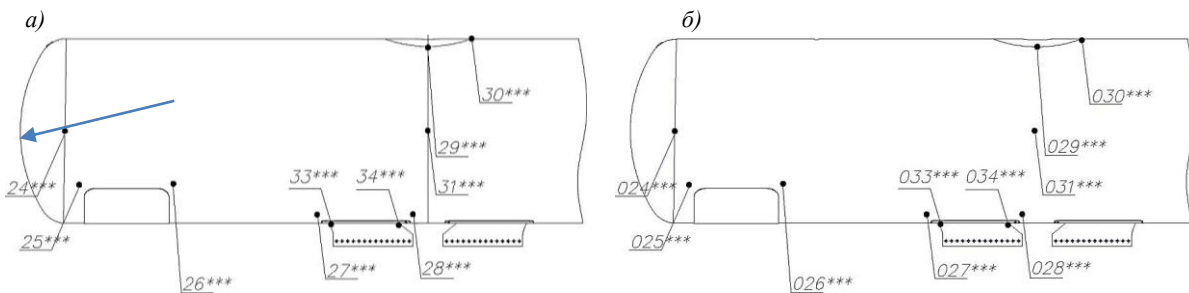


Рисунок 2 – Схема расположения тензорезисторов на котле и на фасонных лапах вагона: а – вид слева; б – вид справа

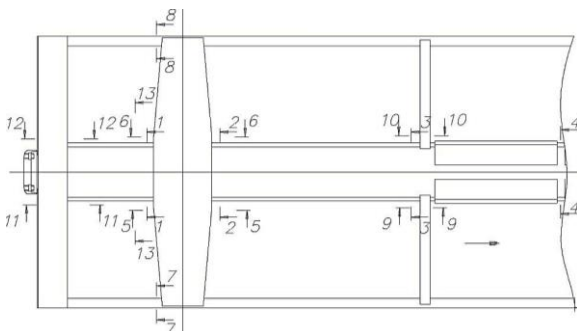


Рисунок 3 – Схема расположения тензорезисторов на раме вагона

Испытания на соударения проводились при полной загрузке вагона-цистерны, подпертого вагонами прикрытия, путем соударения с вагоном-бойком на специализированном механизированном стенде-горке.

Испытания по сбросу с клиньев проводились путем сбрасывания груженого вагона с клиньев (при укладке клиньев высотой 28 мм под все колеса исследуемого вагона) с измерением динамических напряжений, возникающих в конструкции, и коэффициента вертикальной динамики (измерение прогиба рессорного подвешивания).

Значения напряжений от веса груза определяются на основании полученных данных в результате испытаний вагона на статическую прочность.

По результатам измерений определяется наибольшая амплитуда напряжений, соответствующая реализованному диапазону силы удара и моменту сброса с клина. На основе полученных данных эквивалентную амплитуду динамического напряжения [см. формулы (3) и (4)] можно определить по формуле

$$\sigma_{a,\varepsilon} = m \sqrt{\frac{T_{\text{пр}}}{N_0} (D_{\text{прод}}^{\text{сум}} + D_{\text{верт}}^{\text{сум}})}, \quad (13)$$

где $D_{\text{прод}}^{\text{сум}}$ – суммарное повреждение от продольных нагрузок; $D_{\text{верт}}^{\text{сум}}$ – суммарное повреждение от вертикальной динамики.

Суммарное повреждающее воздействие от продольных нагрузок

$$D_{\text{прод}}^{\text{сум}} = N_{c1} \sum_{i=1}^{k_{\text{уд}}} (\sigma_{a,i}^I)^m P_i^I, \quad (14)$$

где N_{c1} – нормативное количество циклов динамических напряжений от продольных сил, действующих на вагон через автосцепку за 1 год эксплуатации (принимают согласно [4]); $k_{\text{уд}}$ – принятое число диапазонов усилий; P_i^I – частота повторения усилий в рассматриваемом диапазоне; $\sigma_{a,i}^I$ – амплитуда динамического напряжения для i -го диапазона сил, МПа,

$$\sigma_{a,i}^I = \frac{\overline{\sigma_{ai}^I} F_i}{F_{\text{max}}}; \quad (15)$$

$\overline{\sigma_{ai}^I}$ – амплитуда напряжения несимметричного цикла при динамической нагрузке от соударения, полученная при силе соударения 3,5 МН, МПа; F_i – среднее значение продольного усилия, для i -го диапазона, МН; F_{max} – максимальное значение продольного усилия, МН.

Нормативную функцию распределения частот повторения продольных усилий, действующих на грузовой вагон через автосцепку, принимают согласно [4] (рисунок 4).

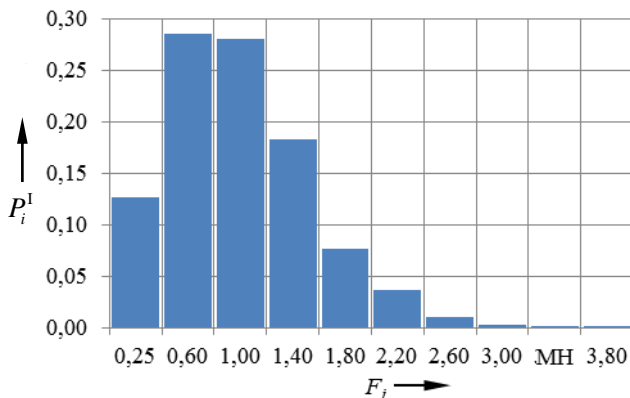


Рисунок 4 – Нормативная функция распределения частот повторения продольных усилий, действующих на грузовой вагон через автосцепку

Повреждающее воздействие за 1 год эксплуатации от вертикальной динамики определяют по формуле

$$\sigma_{\text{верт}}^{\text{сум}} = N_{c2} \sum_{j=1}^3 K_j \sum_{i=1}^{k_{ai}} (\sigma_{a,i}^{\text{II}})^m P_i^{\text{II}}, \quad (16)$$

где K_j – доля протяженности характерных участков пути [прямых ($j = 1$), кривых ($j = 2$) и стрелочных переводов ($j = 3$)]; P_i^{II} – частота появления амплитуд с уровнем $\sigma_{a,i}^{\text{II}}$; k_{ai} – принятое число диапазонов амплитуд для j -го характерного участка; $\sigma_{a,i}^{\text{II}}$ – амплитуда динамического напряжения для i -го диапазона скорости j -го характерного участка, МПа,

$$\sigma_{a,i}^{\text{II}} = \frac{\overline{\sigma_{ai}^{\text{II}}} \overline{k_{di}}}{k_d}; \quad (17)$$

$\overline{\sigma_{ai}^{\text{II}}}$ – амплитуда напряжения при вертикальной динамической нагрузке, полученная при коэффициенте вертикальной динамики при максимальной скорости, МПа; $\overline{k_{di}}$ – среднее вероятное значение коэффициента динамики для i -го диапазона скоростей; k_d – максимальное значение коэффициента динамики при максимальной скорости.

Нормативная функция распределения частот повторения коэффициентов динамики принимается равной нормативной функции распределения скоростей движения вагона согласно «Нормам...» [3] (рисунок 5).

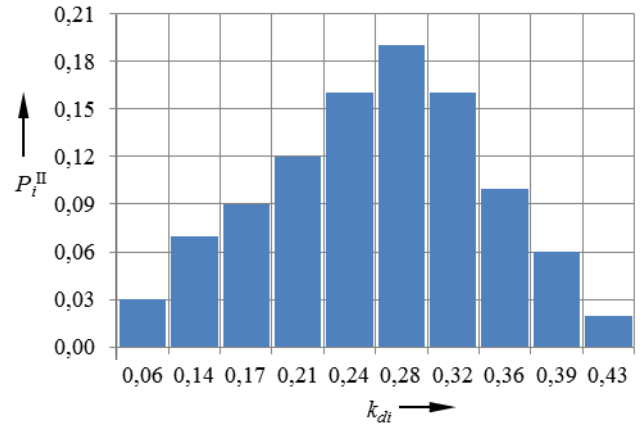


Рисунок 5 – Нормативная функция распределения частот повторения коэффициентов динамики

Нормативное количество циклов динамических напряжений от вертикальной динамики кузова при движении вагона за 1 год эксплуатации согласно «Нормам...»

$$N_{c2} = f_{\text{э}} T_{\text{пр}}. \quad (18)$$

Суммарное время действия динамических напряжений, вызванных колебаниями и вибрациями вагона при движении в груженом состоянии за 1 год эксплуатации, определяют по формуле

$$T_{\text{пр}} = 365 \cdot \frac{10^3 \overline{L}_c}{\overline{v}}, \quad (19)$$

где \overline{L}_c – среднесуточный груженный пробег вагона, км/сут; \overline{v} – средняя техническая скорость движения вагона, м/с.

По результатам выполненной экспериментальной и расчетной оценки вагона-цистерны получены коэффициенты запаса сопротивления усталости для всех контрольных точек. Данные результаты удобно представить в виде лепестковой диаграммы в логарифмических

координатах с указанием предельного (нормированного) значения коэффициента запаса сопротивления усталости (рисунок 6).

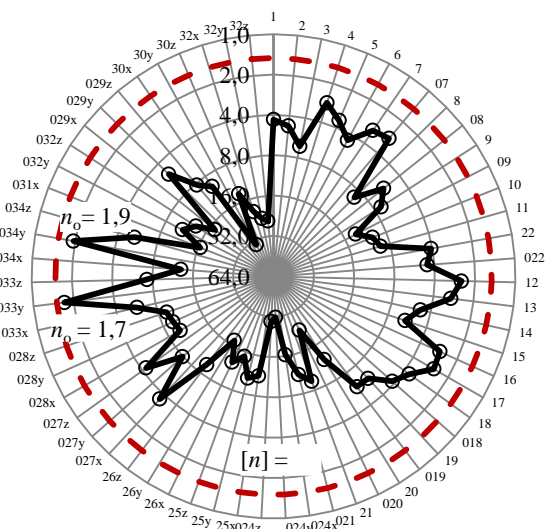


Рисунок 6 – Расчетно-экспериментальные коэффициенты запаса усталостной прочности

Проводя анализ рисунка 6, можно установить, что только для контрольных точек 033у и 034у (место приварки лап рамы к котлу вагона) наблюдаются коэффициенты запаса, близкие к допустимой величине (1,7 и 1,9 соответственно). В целом же можно констатировать, что испытанная цистерна имеет запас по критерию сопротивления усталости на весь назначенный срок службы.

Заключение. В статье сформулированы особенности определения коэффициента запаса сопротивления усталости конструкций подвижного состава ускоренным методом на примере испытаний вагона-цистерны. Для некоторых специальных типов вагонов при обработке

данных ходовых испытаний, а также при реализации испытаний путем сброса с клиньев, для более точного моделирования реальных условий эксплуатации, могут быть учтены повреждения, накапливаемые при погрузке-разгрузке, а также оценена поврежденность, возникающая при порожнем пробеге вагонов. В этой связи в дополнение к изложенному подходу требуется реализация соответствующих испытаний на порожнем подвижном составе и при погрузке-разгрузке, а также учет накапливаемых при этом повреждений.

В целом для более достоверной оценки характеристик сопротивления усталости конструкций подвижного состава существующие методики испытаний и обработки полученных результатов необходимо постоянно совершенствовать. В конечном итоге это позволит получать более достоверные данные о запасе сопротивления усталости реальных конструкций подвижного состава и тем самым производить его проектирование более рационально и экономично, что позволит снижать металлоемкость таких изделий и риск их эксплуатации.

Список литературы

- 1 Ксендзов, В. Н. Прогнозирование остаточного ресурса деталей приводов машин / В. Н. Ксендзов, Г. А. Дыко, С. П. Мурашко // Надежность и контроль качества. – 1988. – № 10. – С. 18 – 24.
- 2 ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения. – Введ. 1990-07-06. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 38 с.
- 3 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 352 с.
- 4 Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества : РД 24.050.37.95. – М. : ГосНИИВ, 1995. – 102 с.
- 5 Долматов, А. А. Динамика и прочность четырехосных железнодорожных цистерн : сб. науч. тр. / А. А. Долматов, Н. Н. Кудрявцев. – М. : Трансжелдориздат, 1963. – 124 с.

Получено 01.01.2017

V. I. Senko, S. V. Makeev, V. V. Komissarov, S. A. Skorokhodov. Features of determination of coefficient of the stock resistance of fatigue of designs of the rolling stock.

In the work features of determination of resistance of fatigue of designs of cars as a result of carrying out trial strength and dynamic runs have been examined and also at realization of tests for impact and "dropping" from wedges. Realization of the accelerated method of determination of coefficient of resistance of a stock has been made on the example of tests of the tank car. It has been shown that only in a zone of welding of paws of a frame to a copper of the car fatigue resistance stock coefficients close to the allowed size are observed. In general it has been established that the tested tank has the required stock by criterion of resistance of fatigue on all appointed service life. The conclusion is drawn that constant improvement of techniques of tests will allow to obtain more reliable data about a stock of resistance of fatigue of real designs of the rolling stock and by that it is more rational to make his design and is economic that will allow to reduce metal consumption of such products and risk of their operation.