

вия включали закрепления в зонах сопряжения с надрессорной балкой и буко́совыми узлами. Нагрузки имитировали действие веса кузова (вертикальная нагрузка, равная 230 кН в зоне установки пружин) и сил взаимодействия с рельсовым путём (боковая нагрузка, приложенная в зонах буко́совых узлов и имитирующая воздействие горизонтальных сил от колёсной пары, равная 80 кН) в соответствии с [2].

В результате численного анализа получено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу (см. рисунок 1, б, в). При этом расхождение в результатах компьютерных расчетов составило менее 0,1 %. А разница с результатами натурных испытаний составляет не более 3 %. Это свидетельствует о том, что применённые подходы компьютерного моделирования могут быть с достаточной точностью и достоверностью использованы при разработке методик усталостных испытаний конструктивных элементов железнодорожного подвижного состава.

#### Список литературы

- 1 **Комаровский, Н. В.** Усталостные испытания боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов / Н. В. Комаровский, А. Г. Отока, М. Г. Гегедеш // Транспортное машиностроение, 2018. – № 8. – С. 55–65.
- 2 ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Введ. 01.07.2017. – М. : Стандартинформ, 2016. – 58 с.

УДК 539.43:629.423

## ЕДИНЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭКИПАЖНОЙ ЧАСТИ

*Р. В. ГУЧИНСКИЙ*

*ООО «Троицкий крановый завод», Институт Проблем Машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*

При динамико-прочностных испытаниях в числе прочих показателей оцениваются коэффициенты запаса сопротивления усталости для металлоконструкций вагонов [1]. В нормах для несамоходных вагонов приведены формулы эквивалентного напряжения, позволяющие оценить усталость металлоконструкций в рамках вероятностного подхода. Для локомотивов и моторвагонного подвижного состава данный коэффициент обычно оценивается по более консервативному детерминистическому подходу. В таком подходе наличие напряжений выше предела усталости не предполагается [2]. В вероятностном подходе учитывается история нагружения в виде парциальных долей амплитуд напряжений разного уровня, что делает его более точным в сравнении с детерминистическим подходом. Тем не менее неопределенность в показателе степени кривой усталости и возможность принятия коэффициента запаса в широком диапазоне приводит к менее точным оценкам долговечности конструкций [3]. В соответствии с вероятностным подходом в расчетной оценке решается задача о вынужденных колебаниях металлоконструкций экипажной части, затем амплитуды напряжений группируются по степени частоты их возникновения и строится гистограмма значений напряжений. Для более удобного интегрирования иногда гистограмма описывается функцией распределения случайной величины [4].

В ГОСТ 34939–2023 и ГОСТ 33796–2016 приведена формула для расчета усталости по вероятностному подходу, основанная на принципе линейного суммирования повреждений. Она позволяет рассчитывать вероятность разрушения, ресурс для заданной вероятности или коэффициент запаса:

$$\frac{N_{\text{сумм}}}{N_G} = \frac{a_p}{n_p^{m_1} \cdot \sum_{\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a \max}} \geq \frac{1}{n_p}} t_i \sum \left( \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a \max}} \right)^{m_1} + n_p^{m_2} \cdot \sum_{\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a \max}} < \frac{1}{n_p}} t_i \cdot \left( \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a \max}} \right)^{m_2}},$$

где  $N_{\text{сумм}}$  – общее число циклов;  $t_i$  – доля числа циклов, соответствующая  $i$ -му уровню в блоке нагружения;  $N_G$  – число циклов при значении напряжений, равном пределу выносливости детали, соответствующее точке перелома кривой усталости;  $a_p$  – критическое значение повреждения;  $m_1$  и  $m_2$  – степенные показатели для двух участков кривой усталости;  $\sigma_{ai}$  и  $\sigma_{a \max}$  – амплитуда напряжений

для  $i$ -го уровня и наибольшая амплитуда в блоке нагружения, соответственно;  $n_p$  – предельный коэффициент нагруженности,  $n_p = \sigma_{a\max}^{\text{пред}} / \sigma_{-1\Delta}$ ;  $\sigma_{a\max}^{\text{пред}}$  – наибольшая амплитуда напряжений для предельного блока нагружения.

Гистограмма действующих напряжений в ряде стандартов (ГОСТ 34939–2023, ГОСТ 34093–2017, Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) от 1983 и 1996 г. (далее – Нормы)) применяется для расчета значения эквивалентного напряжения в блоке  $\sigma_{a\Delta}$ . Отношение эквивалентного напряжения к пределу выносливости детали позволяет вычислить коэффициент запаса сопротивления усталости:

$$\tilde{n} = \frac{\sigma_{-1\Delta}}{\sqrt[m]{\frac{N_{\text{сумм}}}{N_G} \sum_{\sigma_{ai} \geq \frac{\sigma_{-1\Delta}}{\tilde{n}}} t_i \sigma_{ai}^m}} = \frac{\sigma_{-1\Delta}}{\sigma_{a\Delta}}. \quad (2)$$

В формуле (2) используется единственное значение показателя степени  $m$ , соответствующее аппроксимации кривой усталости с одним участком наклона. Величина  $\sigma_{a\Delta}$  может рассматриваться в качестве амплитуды постоянно действующего напряжения, действие которого в пределах числа циклов  $N_G$  приводит к такому же повреждению, как и весь блок напряжения длительностью  $N_{\text{сумм}}$ . Также  $\sigma_{a\Delta}$  является величиной напряжения, при достижении которой значения предела усталости общее повреждение, накопленное за  $N_{\text{сумм}}$  циклов нагружения, равно единице.

В стандартах по оценке динамико-прочностных показателей вероятностный подход для расчета усталости несамоходных вагонов, локомотивов и моторвагонного подвижного состава описан неодинаково. Однако процесс накопления повреждений для разных типов подвижного состава в целом происходит похожим образом, т. к. прежде всего является следствием примерно идентичного спектра нагрузок от пути. Цель данного исследования заключается в разработке единого подхода расчета усталости металлоконструкций всех видов подвижного состава.

По аналогии с уравнением (1) в целях унификации подхода также возможно использование следующей зависимости [5]:

$$\frac{N_{\text{сумм}}}{N_G} = \frac{a_p}{\tilde{n}^{m_1} \cdot \sum_{\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-1\Delta}} \geq \frac{1}{\tilde{n}}} t_i \left( \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-1\Delta}} \right)^{m_1}} \tilde{n}^{m_2} \cdot \sum_{\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-1\Delta}} < \frac{1}{\tilde{n}}} t_i \left( \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-1\Delta}} \right)^{m_2}. \quad (3)$$

Зависимость (3) является общей для оценки усталости в рамках вероятностного подхода. Повреждения от различных значений амплитуд напряжений могут суммироваться при имеющемся общем блоке нагружения или отдельно для каждого режима движения, например движения в прямых, кривых участках пути и стрелочных переводах.

В Нормах эквивалентное напряжение и затем коэффициент запаса определяются для кривой усталости с одним наклоном, что соответствует вычислению относительного коэффициента запаса  $\tilde{n}$  по уравнению (3). Однако уравнение (3) является более общим, т. к. позволяет оценивать усталость и для билинейной кривой усталости. Также по уравнению (3) можно определить вероятность разрушения для заданного ресурса, или ресурс, соответствующий заданной вероятности разрушения, что отражено в ГОСТ 31846–2012, ГОСТ 33796–2016 и ГОСТ 34939–2023. Расчет ресурса при этом упрощается, т. к. в рамках данного подхода не определяются коэффициент  $n_p$  действительный коэффициент нагруженности  $n = \sigma_{a\max} / \sigma_{-1\Delta}$ . Из-за того, что исключается необходимость определения величины  $\sigma_{a\max}$  и не требуется анализ всех данных динамико-прочностных испытаний для его нахождения, расчет становится более удобным.

Критерий вида (3) исключает необходимость расчета эквивалентного напряжения, позволяет выполнять расчеты для билинейной аппроксимации кривой усталости, а также использовать произвольное значение критического повреждения  $a_p$  для вагонов локомотивной тяги, а не только равное единице, как в случае расчета эквивалентного напряжения.

Существующие методики расчета усталости по вероятностному подходу с учетом нерегулярности нагружения в стандартах для разных типов подвижного состава изложены неодинаково. Между тем методика предельного блока и подход эквивалентного напряжения используют одно и то же правило линейного суммирования повреждений.

В работе предложена версия единого критерия, который может быть использован при расчетах усталости по вероятностному подходу для всех типов подвижного состава при расчете срока службы, вероятности разрушения или коэффициента запаса сопротивления усталости. Представлен упрощенный вид критерия, полученный с помощью нормирования действующих амплитуд не по максимальному значению напряжений из блока нерегулярного нагружения, а по значению предела выносливости.

#### Список литературы

- 1 Пути повышения прочности несущих конструкций экипажей несамоходных пассажирских вагонов / В. В. Кочергин, А. А. Буханцев, О. А. Русанов, К. В. Колесников // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2020. – № 1 (49). – С. 44–49. – EDN: <https://www.elibrary.ru/cvbyzi>.
- 2 Гучинский, Р. В. Сопоставление детерминистических подходов к оценке усталости сварных соединений экипажной части / Р. В. Гучинский // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2022. – № 3 (59). – С. 50–57. – EDN: <https://www.elibrary.ru/awnniv>.
- 3 Guchinsky, R. V. Uncertainties in fatigue assessment of structures in design and in service / R. V Guchinsky, S. V. Petinov // Herald of the Ural State University of Railway Transport. – 2021. – Vol. 4. – P. 35–44. – EDN: <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2021-4-35-44>.
- 4 Гучинский, Р. В. Разработка узла конструкции судна по условию усталостной долговечности / Р. В. Гучинский, С. В. Петинов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2012. – № 4 (159). – С. 177–186. – EDN: <https://www.elibrary.ru/plukcv>.
- 5 Когаев, В. П. Прочность и износостойкость деталей машин : учеб. пособие для машиностр. спец. вузов / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. – М. : Выш. шк., 1991. – 319 с.

УДК 533.6.011:004.94

## ОБТЕКАНИЕ ПОТОКОМ ВОЗДУХА ВАГОНА-ПЛАТФОРМЫ

О. В. ДЕМЬЯНЧУК

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Аэродинамическое сопротивление составляет значительную долю в общем сопротивлении движению железнодорожного подвижного состава. Развитие цифровизации процессов при эксплуатации транспортных средств требует наличия уточненной информации об аэродинамических силах, действующих на железнодорожный подвижной состав.

В настоящее время неоспоримые преимущества контейнерных перевозок (универсальность использования контейнеров, высокая степень сохранности груза, отсутствие необходимости перегрузки груза) способствовали росту рынка таких перевозок. Для Республике Беларусь также характерна тенденция роста контейнерных перевозок [1].

Увеличение объемов железнодорожных контейнерных перевозок, а также наличие различных вариантов размещения контейнеров на вагонах-платформах вызывают необходимость исследования аэродинамики вагонов-платформ, загруженных контейнерами. Авторами [2] приводится случай, при котором на мосту в результате действия сильного бокового ветра произошло опрокидывание вагонов, загруженных контейнерами, поэтому существует необходимость проведения исследований подобных случаев для предотвращения их возникновения. Оценка по результатам натурных испытаний аэродинамических характеристик погруженных на платформы контейнеров, приведенная в работе [3], позволила установить, что распределение давления на переднюю и заднюю поверхности контейнеров хорошо согласуется с результатами выполненного компьютерного моделирования, которое позволяет выполнять исследования аэродинамики транспортных средств с достаточной точностью при сравнительно невысокой стоимости.

Моделирование обтекания воздушным потоком порожней платформы и платформы, загруженной 40-футовым контейнером, выполнено с использованием программного комплекса ANSYS Fluent при параметрах, установленных в работе [4].

Численное моделирование выполнялось на основе решения уравнения неразрывности и осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса, для замыкания которых была использована модель турбулентности  $k-\epsilon$ .

Одним из параметров качества конечно-элементной сетки является безразмерное расстояние от стенки  $y^+$ . Параметр  $y^+$  отвечает за использование пристеночных функций в моделях турбулентности и рассчитывается по формуле