

УДК 629.4.027:004.94

*М. Г. ГЕГЕДЕШ^{1,2}, Н. В. КОМАРОВСКИЙ¹, Р. В. РАХИМОВ³,
П. М. АФАНАСЬКОВ¹*

¹*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь*

²*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого,
Гомель, Беларусь*

³*Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент,
Узбекистан*

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БОКОВОЙ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА

Представлено сравнение данных, которые получены в ходе натурных испытаний боковой рамы тележки грузового вагона, с результатами расчета напряженно-деформированного состояния, проведенного средствами программных пакетов инженерного анализа SolidWorks и ANSYS Workbench (Static Structural). На основе анализа рассчитанных в среде ANSYS значений напряжений в боковой раме тележки определены зоны первичного разрушения при циклических нагрузках, а также коэффициенты запаса прочности для исследуемого конструктивного элемента железнодорожного подвижного состава.

Ключевые слова: железнодорожный подвижной состав, прочность несущих элементов, напряженно-деформированное состояние, компьютерное моделирование, коэффициент запаса прочности.

Прочность и надежность несущих элементов конструкции железнодорожного подвижного состава играют ключевую роль в обеспечении безопасности перевозок и определяют срок службы вагонов. Основным элементом ходовой части вагона является тележка, на которую опирается кузов. В свою очередь, одной из важнейших составных частей тележки является боковая рама, которая принимает нагрузки от кузова и передает их на буксовые узлы и далее на рельсовый путь. В процессе эксплуатации элементы рамы подвергаются действию значительных статических и динамических нагрузок, что приводит к усталостным повреждениям [1, 2].

При выполнении анализа прочности боковых рам руководствуются стандартом [3]. Для повышения точности расчета показателей надежности конструкции и минимизации объема испытаний на этапе проектирования активно применяется численное моделирование с использованием специализированных инженерных программных пакетов. Так, в работах [4, 5] предлагается междисциплинарный метод анализа для оценки усталостной долговечности и прочности конструкции кузова железнодорожного вагона при случай-

ных динамических нагрузках на основе мультифизического моделирования динамики подвижного состава и метода конечных элементов, которые позволили получить временные зависимости нагрузки для анализа долговечности и оценки остаточного срока службы.

Авторами [6] с использованием метода конечных элементов получены распределения напряжений в конструкции локомотива и сцепленного с ним вагона от действия сил в автосцепном устройстве при различных динамических нагрузках. На исследование влияния различных динамических нагрузок на напряженно-деформированное состояние отдельных конструктивных элементов пассажирского железнодорожного подвижного состава направлены работы [7, 8]. В исследовании [9] автор применяет метод конечных элементов для анализа прочности боковых стоек грузового вагона под действием перевозимого груза.

В работе [10] отмечается, что действующие нормативные документы, на основании которых осуществляется расчетная оценка прочности грузовых вагонов и их составных частей, учитывают не все результаты современных исследований (например, [11]), что может стать причиной недостаточной прочности новых конструкций соединительных балок вагонов повышенной вместимости. Авторами на основе расчета напряженно-деформированного состояния обсуждаемых конструкций в среде ANSYS установлено, что основным повреждающим воздействием, приводящим к их разрушению, является поперечная перевалка кузова вагона.

Цель настоящего исследования заключается в сопоставлении данных, которые получены при натурных испытаниях боковых рам тележек, с результатами расчетов, выполненных методом конечных элементов с использованием специализированных инженерных программных комплексов.

Результаты проведенных испытаний [12] показали, что основные повреждения боковой рамы тележки наблюдались в области сливного отверстия. Усталостные трещины зарождались в месте перехода закругления рамы к площадке под пружины. В отдельных случаях в изломе фиксировалось небольшое количество флокенов, аналогичные повреждения были замечены и на наклонном поясе.

С целью дальнейшего совершенствования методики проведения усталостных испытаний было проведено сравнение данных, полученных при испытаниях [12], с результатами расчетов параметров напряженно-деформированного состояния рассматриваемого конструктивного элемента при компьютерном моделировании в SolidWorks и ANSYS Workbench (модуль Static Structural).

Конечно-элементные модели боковой рамы тележки были созданы на основе предварительно разработанной твердотельной трехмерной модели, описывающей геометрию реального объекта (рисунок 1, *a*). Принято, что конструкционная сталь обладает следующими характеристиками: модуль упругости $2 \cdot 10^{11}$ Па;

коэффициент Пуассона 0,3; предел текучести 241 МПа. При создании модели использованы объемные тетраэдральные конечные элементы.

Граничные условия включали закрепления в зонах сопряжения с наддресорной балкой и буксовыми узлами. Нагрузки имитировали действие веса кузова (вертикальная нагрузка, равная 230 кН в зоне установки пружин) и сил взаимодействия с рельсовым путем (боковая нагрузка, приложенная в зонах буксовых узлов и имитирующая воздействие горизонтальных сил от колесной пары, равная 80 кН) в соответствии с [3].

В ходе вычислений получено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу (рисунок 1, б и в). При этом расхождение в результатах компьютерных расчетов не превысило 0,1 %.

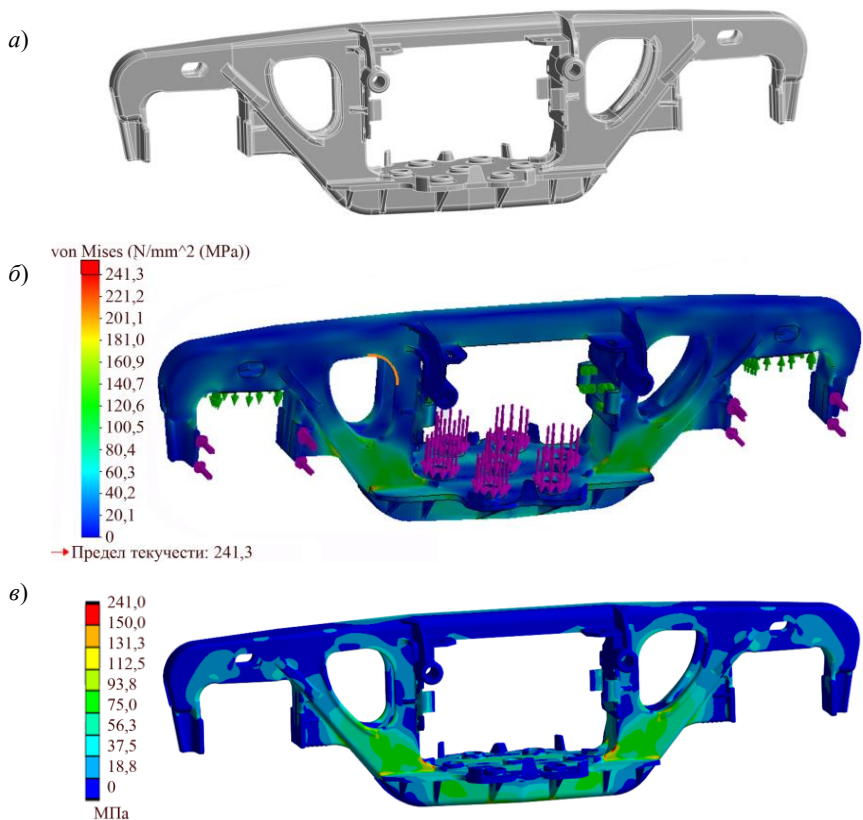


Рисунок 1 – Геометрическая модель (а) и результаты расчета эквивалентных по Мизесу напряжений в боковой раме тележки, полученные в SolidWorks Simulation (б) и ANSYS (в)

Установлено, что коэффициент запаса прочности для наиболее нагруженных областей боковой рамы составляет 0,273 (рисунок 2), следовательно, при подобных повторяющихся нагрузках конструктивный элемент не выдержит нормативный срок службы.

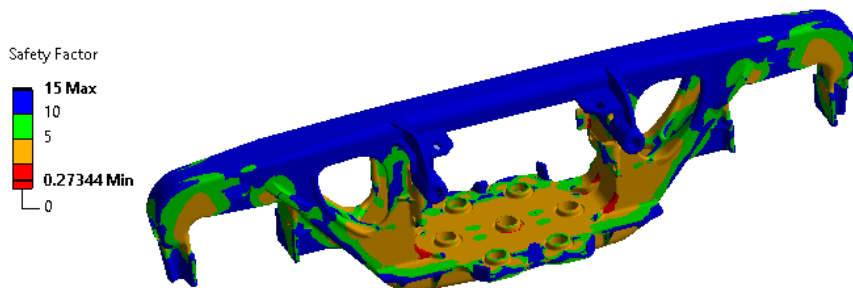


Рисунок 2 – Результаты расчета коэффициентов запаса прочности, полученные в ANSYS Workbench (модуль Static Structural)

Сравнение результатов натуральных испытаний и компьютерных экспериментов показывает, что разница в значениях напряжений составляет не более 3 %. Полученный результат свидетельствует о достаточной точности и достоверности примененных алгоритмов компьютерного моделирования, что позволяет использовать их для уточнения методик усталостных испытаний элементов конструкций железнодорожного подвижного состава, например, при выборе мест расположения датчиков напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Evaluation of fatigue crack growth behavior of bogie frames under operating load / J. W. Seo, H. M. Hur, S. J. Kwon, K. H. Moon // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2024. – Vol. 38, is. 6. – P. 2919–2929.

2 **Kraft, S.** Calibration and validation of fatigue design models for railway car bodies considering uncertainty / S. Kraft, H. L. Blum, C. Gomes Alves // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. – 2023. – Vol. 46, is. 12. – P. 4694–4711.

3 ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – М. : Стандартинформ, 2020. – 53 с.

4 Evaluation of railway vehicle car body fatigue life and durability using multi-disciplinary analysis method / B. Miao, W. Zhang, J. Zhang, D. Jin // *International Journal of Vehicle Structures & Systems*. – 2009. – Vol. 1, is. 4. – P. 85–92.

5 Analysis methods of the dynamic structural stress in a full-scale welded carbody for high-speed trains / Y. Lu, H. Zheng, C. Lu [et al.] // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 10, is. 10. – P. 1–16.

6 Numerical simulation of bearing capacity of carbody for high-speed train subjected to longitudinal impact / R. Qin, F. Gao, T. Wang, B. Chen // *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. – 2021. – Vol. 21, is. 6. – P. 209–224.

7 Исследование усталостной прочности пружин рессорного подвешивания скоростных грузовых вагонов / С. В. Чунин, Э. С. Оганьян, Г. И. Гаджиметов [и др.] // *Известия Транссиба*. – 2023. – № 2 (54). – С. 42–49.

8 **Очирхуу, Д.** Оценка остаточного ресурса и продление сроков службы пассажирских вагонов УБЖД / Д. Очирхуу // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2014. – № 3 (43). – С. 97–103.

9 **Антропова, Т. А.** Оценка характеристик сопротивления усталости с применением конечно-элементного анализа / Т. А. Антропова // *Вестник науки*. – 2025. – Т. 5, № 8 (89). – С. 299–305.

10 **Цыганская, Л. В.** Обеспечение усталостной прочности соединительных балок четырехосных тележек многоосных грузовых вагонов / Л. В. Цыганская, Д. Г. Бейн // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. – 2025. – Т. 84, № 2. – С. 104–112.

11 Анализ характеристик износа пятниковых зон надрессорных и соединительных балок / Ю. Н. Аксенов, А. Ю. Богачев, Н. В. Павлов [и др.] // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. – 2000. – № 3. – С. 40–45.

12 **Комаровский, Н. В.** Усталостные испытания боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов / Н. В. Комаровский, А. Г. Отока, М. Г. Гегедеш // *Транспортное машиностроение*. – 2025. – № 8. – С. 55–65.

M. G. GEGEDES^{1,2}, M. U. KAMAROUSKY¹, R. V. RAKHIMOV³, P. M. AFANASKOV¹

¹*Belarussian State University of Transport, Gomel, Belarus*

²*Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus*

³*Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan*

STRESS-STRAIN STATE MODELING FOR A FREIGHT CAR BODY SIDE FRAME

The data obtained during full-scale tests of a freight car bogie side frame is compared with the results of stress-strain state calculations performed using SolidWorks and ANSYS Workbench (Static Structural) engineering analysis software. Based on the analysis of ANSYS-calculated bogie side frame stress values, the primary failure zones under cyclic loads are determined, as well as the safety factors for this structural component of the rolling stock.

Keywords: rolling stock, load-bearing element strength, stress-strain state, computer modeling, safety factor.

Получено 30.10.2025