

12. Прочностной расчет каркаса низкопольного трамвая / Н. А. Суденко, В. А. Мендель, А. Л. Кисельков [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения. – 2024. – выпуск 13. – С. 28–37.

13. ANSYS в руках инженера: практическое руководство / ANSYS. – изд. 2-е, испр. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 272 с.

Представлено 13.10.2025

УДК 629.433

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ТРАМВАЯ

NUMERICAL MODEL FOR ASSESSING THE STRENGTH OF TRAM BODY FRAME STRUCTURES

**Мендель В. А.¹, Шмелев А. В.¹, канд. техн. наук, доц.,
Хитриков С. В.¹, Кисельков А. Л.¹, Литвинко И. В.²,**

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь:

²ОАО «БКМ Холдинг», г. Минск, Республика Беларусь.

V. Mendel¹, A. Shmaliou¹, Ph. D. in Eng., Ass. Prof.;
S. Khitrikov¹, A. Kiselkov¹, I. Litvinko²,

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of
Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus;

²BKM Holding OJSC, Minsk, Republic of Belarus.

Представлена численная модель тележки низкопольного трамвая, разработанная для оценки прочности и последующей валидации расчетных результатов. Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных, полученных методом электротензометрии при вывешивании тележки. Установлено, что расхождение между расчетными и измеренными значениями напряжений не превышает 5,4 МПа, что подтверждает адекватность предложенной модели. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации конструкций тележек рельсового подвижного состава.

This paper presents a numerical model of a low-floor tram bogie developed for strength assessment and subsequent validation of the calculated results. A comparison of calculated and experimental data obtained using electrical strain gauges during bogie suspension is conducted. It is found that the discrepancy between the calculated and measured stress values does not exceed 5.4 MPa, confirming the validity of the proposed model. The obtained results can be used in the design and optimization of bogie designs for rail rolling stock.

Ключевые слова: низкопольный трамвай, тележка, рама тележки, нагруженность, метод конечных элементов, расчетная модель, тензометрия, ходовые испытания, валидация.

Keywords: low-floor tram, bogie, bogie frame, loading, finite element method, calculation model, strain gauge, running tests, validation.

ВВЕДЕНИЕ

Современные низкопольные трамваи предъявляют повышенные требования к надежности и долговечности элементов ходовой части, особенно тележек, воспринимающих комплекс эксплуатационных нагрузок. В процессе движения тележка трамвая испытывает воздействия, возникающие в результате взаимодействия колес с рельсовым полотном, ускорений и торможений, а также боковых усилий при прохождении поворотов. Поэтому обеспечение прочности и ресурса конструкций тележки является одной из основных задач разработчиков, определяющей безопасность и долговечность эксплуатации подвижного состава.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения ресурса, надежности и технологичности тележек современных низкопольных трамваев при одновременном снижении их массы и стоимости обслуживания. Применение современных численных методов анализа, в частности метода конечных элементов (МКЭ), позволяет существенно сократить объем натурных испытаний, повысить точность прогнозирования нагруженности и оптимизировать конструкцию на ранних этапах проектирования.

Для оценки прочности рам тележек железнодорожных и трамвайных транспортных средств разработаны и применяются различные нормативные документы [1–5], регламентирующие методику расчета и проверки несущих конструкций. В ряде исследований [6–11] предложен комплексный подход, включающий сочетание расчетных

и экспериментальных методов анализа напряженно-деформированного состояния элементов тележек. Такие работы подтверждают эффективность численного моделирования и необходимость его экспериментальной валидации.

Настоящая работа направлена на разработку и проверку численной модели тележки низкопольного трамвая. Целью исследования является создание верифицированной модели, позволяющей оценивать нагруженность конструкций тележки в различных эксплуатационных режимах. Проведено сопоставление результатов расчетов и натурных тензометрических измерений, что позволило подтвердить адекватность модели и возможность ее применения для дальнейших расчетов прочности и оптимизации конструкции.

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Разработанная численная конечно-элементная модель тележки представлена на рис. 1.

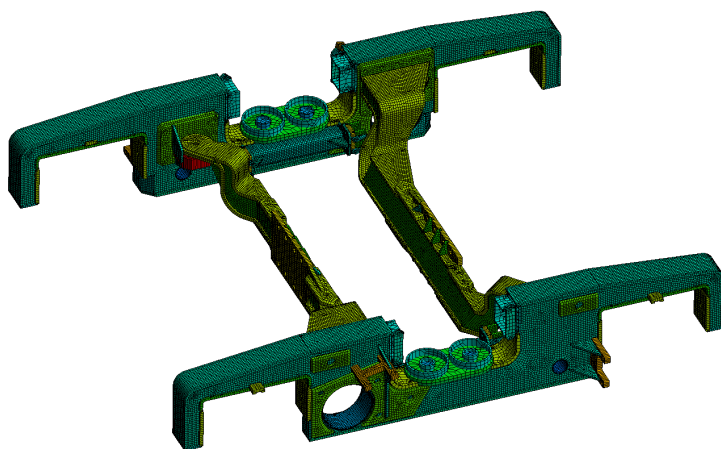


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель рамы тележки Т811

Продольные, моторные и шкворневая балки тележки разработаны с использованием оболочечных конечных элементов второго порядка. Оси, буксовые узлы, детали первичного подрессоривания (типа «Мэгги»), некоторые детали крепления подвески описаны объемными конечными элементами второго порядка. В общей совокупности модель

тележки состоит из: 744400 узлов, 455756 элементов. Конструкции балок описаны оболочечными элементами второго порядка.

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНЫХ НАГРУЗОЧНЫХ РЕЖИМОВ

С использованием разработанной модели тележки была проведена серия расчетов по оценке показателей напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций рамы при действии различных нагрузок с целью определения зон установки тензорезисторов с целью последующего экспериментального определения нагруженности конструкций тележки в условиях эксплуатации, а также выполнения валидации расчетной модели. Расчеты выполнялись для вывешивания тележки.

На рис. 2 представлена схема нагружения при вывешивании тележки: на конструкции рамы тележки действует сила тяжести и вес установленного оборудования (колесные пары и силовой электропривод с редуктором).

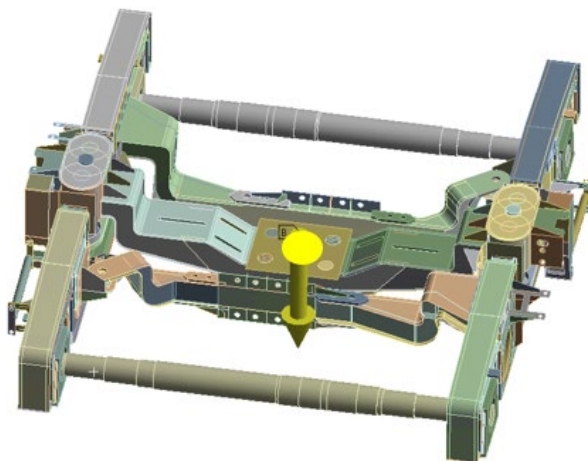


Рисунок 2 – Схема нагружения при вывешивании тележки

Тележка зафиксирована от вертикального перемещения относительно шкворневой балки, которая имеет ограничение перемещений по всем степеням свободы в зоне расположения шкворня. При вывешивании вес тележки на продольные балки передается через ограничители вертикального перемещения вторичного подрессоривания.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В качестве показателей нагруженности конструкций тележки рассматривались первые главные напряжения. На рис. 3 представлена картина распределения растягивающих напряжений.

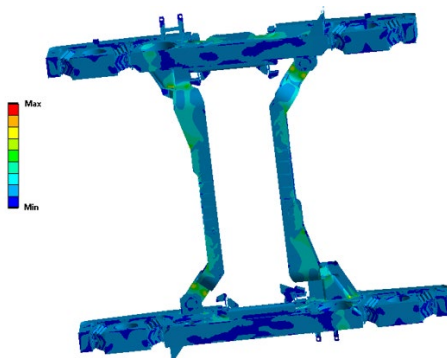


Рисунок 3 – Картина распределения растягивающих напряжений при вывешивании тележки, МПа

По результатам анализа карт распределения главных напряжений и векторов их действия, а также с учетом возможности физического доступа для установки датчиков, были определены 8 зон установки одноосных тензорезисторов для экспериментальных исследований нагруженности конструкций рамы тележки, показанные на рис. 4.

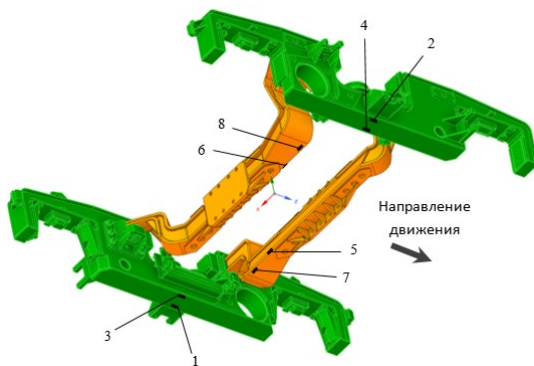


Рисунок 4 – Схема установки тензорезисторов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования конструкций рамы тележки одиночного трамвайного вагона модели Т811 проведены методом электротензометрии с применением многоканальной измерительной системы SIEMENS SCADAS Mobile. Для регистрации осевых напряжений применялись одноосевые тензорезисторы модели CF120-5AA(11)P003M с сопротивлением 120 Ом и измерительной базой 5 мм. Тензорезисторы устанавливались на конструкциях тележки согласно схеме, приведенной на рис. 4. Перед проведением каждого измерения выполнялось обнуление регистрируемых значений напряжений.

Приведенные ниже результаты испытаний получены для трамвайного вагона в снаряженном состоянии при вывешивании передней тележки (рис. 5).

Осредненные по трем измерениям значения осевых напряжений для режима вывешивания тележки приведены в табл. 1. В таблице также приведены расчетные значения осевых напряжений. С учетом особенностей процесса нагружения в эксперименте расчетные значения осевых напряжений для режима вывешивания тележки использовались с обратным знаком. Это связано с тем, что в расчете моделировалось нагружение конструкции от нулевых значений, тогда как в эксперименте происходила разгрузка (обратный процесс) при начальных нулевых напряжениях.

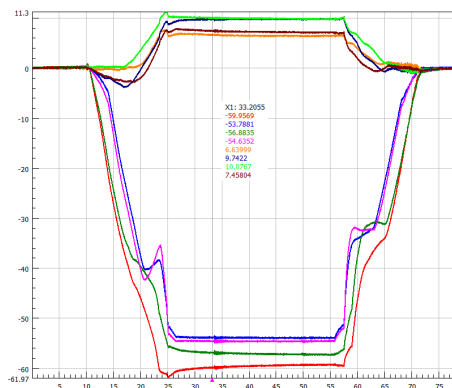


Рисунок 5 – График напряжений при вывешивании тележки

Таблица 1 – Значения осевых напряжений при вывешивании тележки снаряженного трамвая

№ датчика	Измеренное осевое напряжение, МПа	Расчетное осевое напряжение, МПа	Разница, МПа
1	–59,3	–57,3	2,0
2	–54,1		3,2
3	–57,4	–59,3	1,9
4	–55,0		4,3
5	6,9	4,3	2,6
6	9,7		5,4
7	9,6	8,9	0,7
8	7,6		1,3

Результаты, приведенные в табл. 1, показывают хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Отличие не превысило 5,4 МПа, что говорит об адекватности разработанной расчетной модели тележки. Наибольшее отличие расчетных и экспериментальных напряжений зафиксировано для датчика, расположенного на моторной балке, что может быть вызвано особенностями поведения карданного соединения силового привода, расположенного на этой балке, при разгрузке и вывешивании тележки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и верифицирована численная модель тележки трамвая, позволяющая выполнять оценку прочности и нагруженности ее элементов при различных режимах работы. Сопоставление расчетных данных с результатами тензометрических измерений показало хорошее соответствие – расхождение не превысило 5,4 МПа. Это подтверждает достоверность выбранного подхода к моделированию и возможность его использования при проектировании и модернизации рам тележек.

Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований, направленных на оптимизацию конструкций тележек, повышение их ресурса и снижение массы. Использование численного моделирования совместно с экспериментальной валидацией обеспечивает надежный инструмент для повышения эффективности разработки подвижного состава современного городского электро-транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rules for the strength calculation of railway vehicle frames : UIC 615-4. UIC Code 615-4. – Paris : UIC, 2003. – 121 p.
2. Guidelines for bogie design and testing : UIC 515-4. UIC Code 515-4. – Paris : UIC, 1993. – 78 p.
3. Rolling stock – Bogie – General rules for design of bogie frame strength : JIS E 4207:2019. – Tokyo : JSA, 2019. – 93 p.
4. Experimental methods for bogie frame strength : JIS E 4208-1:2021. – Part 1. – Tokyo : JSA, 2021. – 74 p.
5. Experimental methods for bogie frame strength : JIS E 4208-2:2021. – Part 2. – Tokyo: JSA, 2021. – 52 p.
6. Mancini, M. C. Investigational therapies in the treatment of obesity / M. C. Mancini, A. Halpern // Expert Opinion on Investigational Drugs. – 2006. – № 15(8). – pp. 897–915. – <https://doi.org/10.1517/13543784.15.8.897>.
7. Kraus, V. Strength analysis of tramway bogie frame / V. Kraus, M. Kepka, D. Doubrava // In Mechanical Fatigue of Metals. – 2019. – Springer. – pp. 327–334. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-13980-3_42.
8. Chen, D. Strength evaluation of a bogie frame by different methods / D. Chen, S. Sun, Q. Li // Mechanical Engineering Science. – 2019. – № 1(1). – Article 662. – <https://doi.org/10.33142/me.v1i1.662>.
9. Measuring scheme for determination of loads acting on the side frame of the bogie from a wheelset / R. Rahimov, A. Nekrasova, L. Ogorodnikova [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2021. – P. 264, 05035. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126405035>.
10. Bogie frame structure evaluation for light-rail transit (LRT) train: A static testing / D. W. Karmiadji, B. Haryanto, O. Ivano, [et al.] // Automotive Experiences. – 2021. – № 4 (1). – pp. 36–43. – <https://doi.org/10.31603/ae.4252>.
11. Jędrzejewski, P. Stress analysis of suspended rail vehicle bogie / P. Jędrzejewski, M. Kuczyk, P. Załuski // Materials Testing. – 2018. – № 60 (2). – pp. 248–254. – <https://doi.org/10.21062/ujep/86.2018/a/1213-2489/MT/18/2/248>.

Представлено 13.10.2025