

УДК 629.351

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ТРАМВАЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОКАРКАСА С УЧЕТОМ ОБШИВКИ И ОСТЕКЛЕНИЯ

**CALCULATION MODEL OF A TRAM FOR RESEARCHING
THE STRENGTH OF A METAL FRAME, TAKING INTO ACCOUNT
THE CLADDING AND GLAZING**

**Литвинюк П. С.¹, Шмелев А. В.¹, канд. техн. наук, доц.,
Шукюров А. О.¹, Суденко Н. А.¹, Чирун С. И.²,**

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

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

P. Litvinuk¹, A. Shmialiou¹, Ph. D. in Eng., Ass. Prof.,

A. Shukiurov¹, N. Sudenko¹, S. Chirun²,

**¹The Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus,
Minsk, Belarus**

²JSC «BKM Holding», Minsk, Belarus

Рассмотрена методика расчета металлокаркаса трамвая с учетом обшивочного материала, стекол и клеевых соединений. Описаны особенности моделирования клеевого соединения. Представлены результаты конечно-элементного моделирования металлокаркасов с учетом обшивочного материала и без учета обшивочного материала. Сделаны выводы о целесообразности учета обшивочного материала и остекления при проведении прочностных расчетов на соответствие металлокаркаса ГОСТ 34809-2021 [1].

This article examines a calculation method for tram metal frames, taking into account cladding material, glass, and adhesive joints. The specifics of adhesive joint modeling are described. The results of finite element modeling of metal frames with and without cladding material are presented. Conclusions are drawn regarding the feasibility of including cladding material and glazing when conducting strength calculations for metal frame compliance with GOST 34809-2021 [1].

Ключевые слова: компьютерное моделирование, трамвай, конечно-элементное моделирование, прочностной расчет.

Keywords: *computer modeling, tram, finite element modeling, strength calculation.*

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии проектирования позволяют при разработке новых конструктивных решений учитывать все больше элементов конструкции, оказывающих положительное влияние на прочностные характеристики несущих конструкций [2]. В легком пассажирском рельсовом транспорте (далее – трамвай), каркас вагона является его основным несущим элементом и представляет собой сложную пространственную балочную систему, в которой при распределении нагрузки взаимодействует большое количество несущих и вспомогательных элементов. Оценка нагруженности и прочности каркаса, позволяет оценить его работоспособность и оптимизировать создаваемую конструкцию, тем самым исключить возможные причины поломки в процессе эксплуатации. При использовании низкопольной компоновки в силовой конструкции трамвая возникают зоны перехода от элементов конструкции высокой жесткости к элементам конструкции низкой жесткости. Данные переходы выступают концентраторами напряжений, что в свою очередь негативно сказывается на прочности и долговечности каркаса трамвая. Учет обшивок каркаса трамвая позволяет исключить необходимости в чрезмерном усилении зон концентрации напряжений и, в свою очередь, позволяет использовать низкопольную компоновку с обеспечением прочностных характеристик. Применение клеевых соединений [3–10] между металлокаркасами и обшивками распространено в области каркасно-панельного пассажирского транспорта (автобусах, троллейбусах, трамваях и т. д.).

ПОДГОТОВКА МОДЕЛИ К РАСЧЕТУ

Расчет металлокаркаса трамвая методом конечных элементов подразумевает предварительную подготовку рациональной компьютерной модели, используемой в расчетах [11, 12]. На данном этапе производится упрощение геометрической модели конструкции, которое заключается в удалении элементов конструкции, не оказывающих влияния на прочность и жесткость исследуемого объекта. При подготовке модели устраняются интерференции и зазоры, создаются топологические связи с последующим преобразованием некоторых

элементов конструкции из объемных твердотельных элементов в оболочечные или балочные элементы. Подготовленная модель металлокаркаса трамвая представлена на рис. 1.

В реальной конструкции обшивка трамвая и стекла крепятся к металлокаркасу с использованием специального клея-герметика (рис. 2).

Применение современных технологий проектирования при разработке новых конструктивных решений позволяет учитывать все больше элементов конструкции, которые оказывают положительное влияние на прочностные характеристики конструкций. Сделан акцент на возможность учета обшивок каркаса трамвая, которые дают снижение растягивающих напряжений в расчетных зонах до 73 %. Такой подход позволяет производителям легкого рельсового транспорта создавать конкурентный продукт, который соответствует современным тенденциям пассажирского транспорта по снижению уровня пола и увеличения пассажироместности.

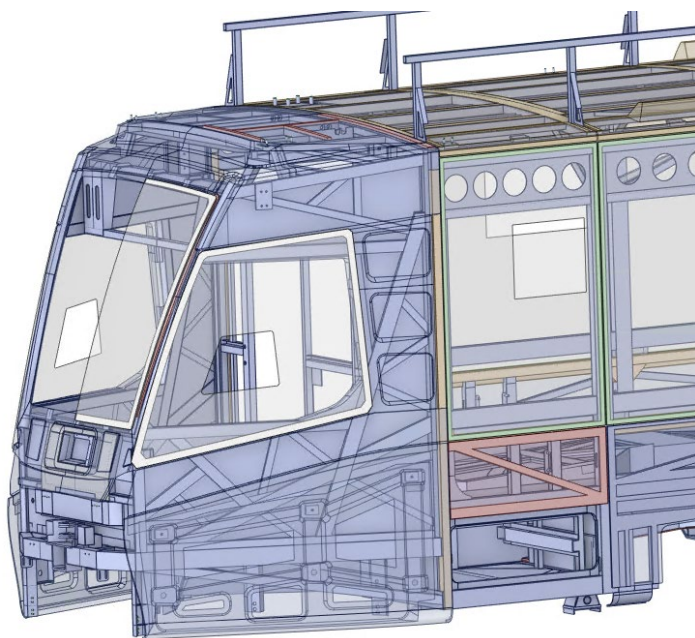


Рисунок 1 – Пример модели металлокаркаса с обшивкой



Рисунок 2 – Крепление обшивки трамвая на металлокаркасу

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В среде программного комплекса ANSYS Workbench [13], на основе предварительно подготовленной твердотельной геометрической модели, создаются расчетные конечно-элементные модели металлокаркаса, включая моделирование клеевого соединения и обшивки трамвая (рис. 3). Клеевой слой между металлокаркасом и внешней обшивкой моделируется контактным взаимодействием типа Bonded.

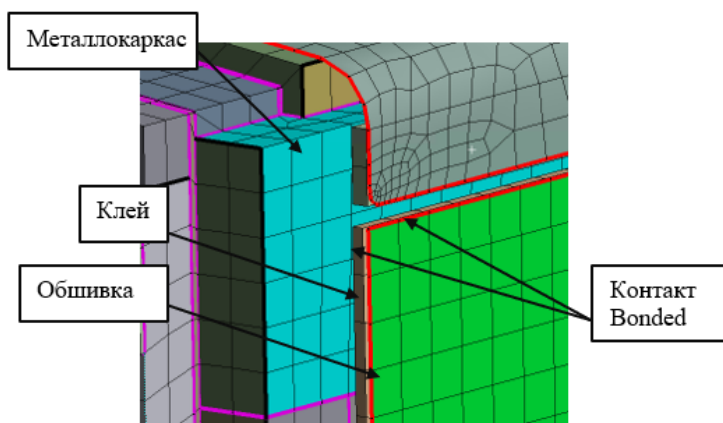


Рисунок 3 – Фрагмент конечно-элементной модели металлокаркаса трамвая с клеевым соединением и обшивкой

НАГРУЗОЧНЫЙ РЕЖИМ МЕТАЛЛОКАРКАСА ТРАМВАЯ

Для проверки работоспособности модели с учетом обшивки и остекления принят режим нагружения диагонального вешивания. В качестве внешних сил, действующих на конструкцию, задавались: вертикальные нагрузки от веса кузова и оборудования; вертикальные силы от массы тележек; ускорение свободного падения, которое составляет $9,806 \text{ м/с}^2$. Ограничения степеней свободы: в точке *A* – ограничено перемещение по осям *X*, *Y*, *Z*; в точке *B* – ограничено перемещение по осям *X*, *Y*. Граничные условия модели трамвая для расчета представлены на рис. 4.

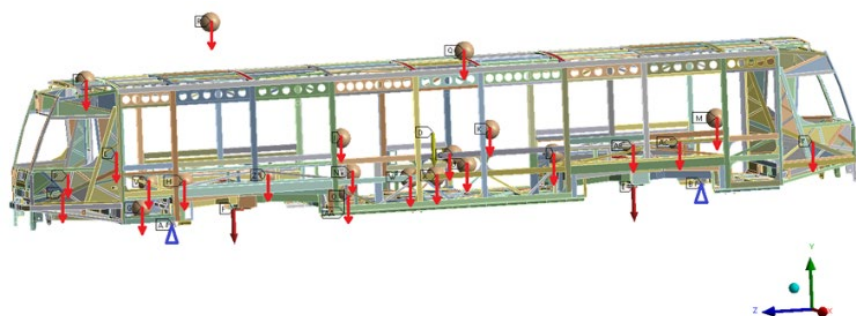


Рисунок 4 – Схема нагружения (обшивки металлокаркаса, стекла и клеевые соединения скрыты)

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛОКАРКАСА ТРАМВАЯ

Результат компьютерного моделирования нагружения металлокаркаса трамвая при диагональном вешивании представлен на рис. 5 в виде картины распределения растягивающих напряжений. При анализе напряженно-деформируемого состояния металлокаркаса особое внимание уделяется растягивающим напряжениям ввиду того, что они наиболее часто оказывают критическое влияние на прочность и устойчивость конструкций. Растягивающие напряжения, особенно при близком к предельной прочности значениям, могут приводить к необратимым деформациям и разрушению элементов металлокаркаса.

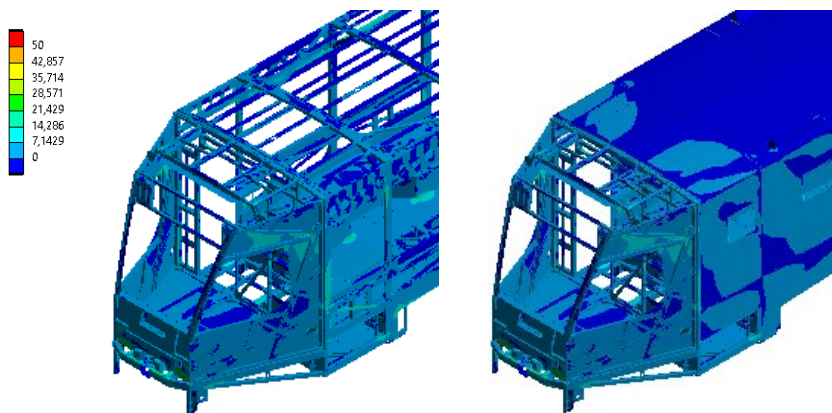


Рисунок 5 – Распределение растягивающих напряжений в трамвае

Учет обшивки трамвайного транспорта позволяет снизить пиковые напряжения до 73,46 % для расчетного режимов нагружения в соответствии с ГОСТ 34809-2021. Среднее значение напряжения в 25 зонах измерения снижаются на 41,16 % при учете обшивки легко-рельсового пассажирского транспорта. Наиболее выраженное снижение уровня напряжений наблюдается в областях оконных проемов, в которых при диагональном вывешивании формируется диагональные смещения, воспринимаемые элементами обшивки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена актуальная научно-техническая задача расчетного исследования силовых конструкций трамвая на соответствие требованиям ГОСТ 34809-2021 с применением компьютерного моделирования. Применение современных технологий проектирования при разработке новых конструктивных решений позволяет учитывать все больше элементов конструкции, которые оказывают положительное влияние на прочностные характеристики конструкций. Сделан акцент на возможность учета обшивок каркаса трамвая, которые дают снижение растягивающих напряжений в расчетных зонах до 73 %. Такой подход позволяет производителям легкого рельсового транспорта создавать конкурентный продукт, который соответствует современным тенденциям пассажирского транспорта по снижению уровня пола и увеличения пассажироместности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Легкорельсовые транспортные средства. Общие технические требования. Методы проверки : ГОСТ 34809-2021. – М. : Российский институт стандартизации, 2022. – 45 с.
2. Failure criteria for adhesively bonded joints / R. Q. Rodríguez, W. P. Paiva, P. Sollero // *International Journal of Adhesion & Adhesives*. – 2012. – № 37. – p. 26–36.
3. Шакиров, А. А. Повышение весовой эффективности гибридных каркасно-панельных кузовов за счет соединений с управляемой сдвиговой жесткостью / А. А. Шакиров // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 5–14.
4. Шакиров, А. А. Повышение жесткости нахлесточных клеомеханических соединений, армированных самонарезающими винтами / А. А. Шакиров, Р. Г. Халилова, С. Б. Сапожников // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 33–36.
5. Шакиров, А. А. Работоспособность нахлесточных клеомеханических соединений при циклическом растяжении – сжатии / А. А. Шакиров, Р. Г. Халилова, С. Б. Сапожников // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 70–79.
6. Gautam, A. Transverse Loading of Joints in Carbon/Epoxy Composites / A. Gautam, U. K. Vaidya // *14th International Conference on Composite Materials (ICCM-14), CD-ROM Proceedings, Edited by H. T. Hahn and M. Martin*. – San Diego, 2003. – pp. 181–193.
7. Kowal, M. Effect of Adhesive Joint End Shapes on the Ultimate Load-Bearing Capacity of Carbon Fibre-Reinforced Polymer/Steel Bonded Joints / M. Kowal // *Advances in Science and Technology Research Journal*. – 2021. – pp. 299–310.
8. Hartsmith, L. J., Adhesive-bonded double-lap joints / L. J. Hartsmith. – National aeronautics and space administration. – 1973. – 111 p.
9. Methods of Analysis and Failure Predictions for Adhesively Bonded Joints of Uniform and Variable Bondline Thickness // U. S. Department of Transportation Federal Aviation Administration. – 2005. – 61 p.
10. Dean, G. The Use of Finite Element Methods for Design with Adhesives / G. Dean, L. Crocker. – National Physical Laboratory. – 2022. – 72 p.
11. Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя / К. А. Басов. – М. : ДМК Пресс, 2005. – 640 с.

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.