



21-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos
TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,
vykusios 2018 m. gegužės 4-5 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 21th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'
TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 4-5 May 2018, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 21-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»
ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 4-5 мая 2018 г., Вильнюс, Литва

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Павел Афанаськов, Леонид Огородников, Артур Путьято

*Белорусский государственный университет транспорта,
Кафедра «Локомотивы», Гомель, Республика Беларусь
E-mail: putsyata.artur@gmail.com*

Аннотация. В рамках реализации процедуры оценки остаточного ресурса несущих конструкций вагонов метрополитена после выработки срока службы выполнено обследование их технического состояния и получены значения остаточных толщин конструктивных элементов. Установлено, что коррозионный износ не превышает 7% от номинальных значений. Разработаны конечно-элементные модели металлоконструкций вагонов моделей 81-717 (головной вагон) и 81-714 (промежуточный вагон). Выполнен комплекс расчетов напряженно-деформированного состояния конструкций головного и промежуточного вагона на нагрузки, регламентированные актуальной нормативной документацией. Установлены, что с учетом выявленных значений коррозионного износа несущие конструкции вагонов метрополитена соответствуют установленным требованиям прочности.

Ключевые слова: вагоны метрополитена, длительная эксплуатация, техническое состояние, прочность, метод конечных элементов, эквивалентные напряжения.

Введение

Регулярное движение поездов Минского метрополитена было открыто 30 июня 1984 года. В настоящее время эксплуатационная длина двух линий составляет 37,285 км. Инвентарный парк вагонов составляет 361 единицу, из которых сформировано 72 пятивагонных состава.

Первые поезда состояли из вагонов моделей 81-717 (головной) и 81-714 (промежуточный). Срок службы указанного подвижного состава, назначенный заводом-изготовителем, составляет 31 год. Таким образом, начиная с 2015 года назначенный срок службы вагонов указанных моделей истекает. В то же время, учитывая практику эксплуатации (курсируют по одному маршруту) и ремонта вагонов (обслуживаются в одном депо), а также отсутствие отказов металлоконструкций вагонов есть основания предполагать, что ресурс их несущих конструкции не исчерпан. Процедура оценки остаточного ресурса несущих конструкций нашла широкое применение для железнодорожного подвижного состава в целом (Voiko 2013; Бороненко *et al.* 2012; Сенько *et al.* 2016), а также и вагонов метрополитена (Борисов 2006). Одним из этапов такой работы является определение технического состояния металлоконструкций вагонов после длительной эксплу-

атации, а также установление соответствия их прочности требованиям актуальной нормативной документации, что и явилось целью настоящей работы.

Техническое состояние вагонов метрополитена

Контроль технического состояния выполнялся методами неразрушающего контроля (визуальный и ультразвуковой толщинометрия). С целью структуризации результатов обследования технического состояния разработано два комплекта диагностических карт (для головного вагона модели 81-717 и промежуточного модели 81-714), включающие основные конструктивные элементы металлоконструкции вагонов: рама, боковые стены, торцевые стены, крыша. Измерение остаточной толщины элементов выполнялось на ремонтных позициях после зачистки мест под контрольные точки. На рис. 1 приведены головной и промежуточный вагоны при проведении толщинометрии их кузовов.

В результате обследования технического состояния металлоконструкций 60 вагонов установлено, что коррозионный износ не превышает 7% от номинальных значений конструктивных элементов. Результаты визуального контроля несущих конструкций позволили выявить ряд конструктивных областей и элементов, для которых характерно появление трещин:



Рис. 1. Головной и промежуточный вагоны на ремонтных позициях

- зона крепления автосцепного устройства на хребтовой балке;
- вертикальные листы шкворневой балки по границам отверстий;
- кронштейны крепления подвески автосцепки;
- вертикальные стенки продольных балок, за шкворневой балкой.

Полученные при ультразвуковой толщинометрии данные легли в основу разработки конечно-элементных моделей исследуемых вагонов для оценки их прочности с учетом коррозионного износа.

Разработка конечно-элементных моделей

Для расчета на прочность несущих металлоконструкций вагонов разработаны конечно-элементные модели на основе использования комплектов конструкторской документации на вагоны, а также результатов технического обследования. Применены два типа конечных элементов: плоские пластинчатые 3-х и 4-х узловые. Параметры расчетных моделей следующие:

- для головного вагона: узлов – 201942, конечных элементов – 192309;
- для промежуточного вагона: узлов – 201526, конечных элементов – 192614.

На рис. 2 и рис. 3 приведены конечно-элементные модели металлоконструкций головного и промежуточного вагонов.

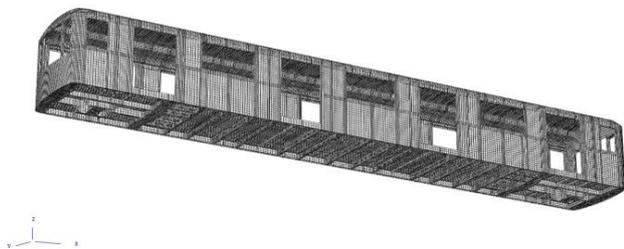


Рис. 2. Конечно-элементная модель головного вагона

Кинематические граничные условия включают в себя ограничение степеней свободы в местах крепления упоров автосцепного устройства и пятников. При

подготовке модели учтены также места крепления подвагонного оборудования.

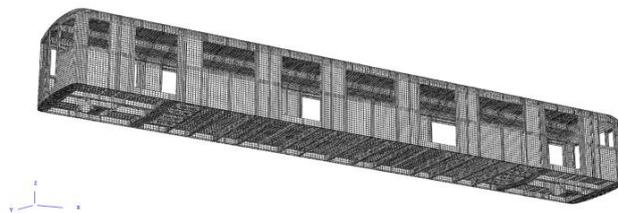


Рис. 3. Конечно-элементная модель промежуточного вагона

В общем случае оценку прочности конструкции и узлов вагонов на стадии проектирования выполняют (Нормы для проектирования, расчета и оценки прочности и динамики механической части вагонов метрополитена колеи 1520 мм): для I режима (режим чрезвычайных нагрузок) по допускаемым напряжениям; для II режима (режим эксплуатационных нагрузок) по допускаемым напряжениям и коэффициентам запаса сопротивления усталости. Силовые граничные условия, учитываемые при расчете приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Силовые граничные условия, учитываемые при расчете на прочность

Расчетные нагрузки	I режим	II режим
Вертикальные		
Сила тяжести брутто	+	+
Динамические силы	–	+
Вертикальная составляющая продольной силы инерции кузова	–	+
Боковые		
Центробежная сила	–	+
Сила давления ветра	–	+
Продольные		
Силы взаимодействия между единицами подвижного состава	+	+
Продольные силы инерции	+	+

Вертикальные силы состоят из собственной силы тяжести полностью оборудованного вагона и силы тяжести пассажиров при максимальной населенности. Расчетная масса пассажира с багажом принималась равной 70 кг. Максимальное количество пассажиров в вагоне, определяется количеством сидящих пассажиров, а также стоящих пассажиров из расчета 10 человек на 1 м² свободной от сидений площади, за исключением участков шириной 100 мм от края сидения.

Динамические составляющие вертикальной силы от колебаний кузова на рессорном подвешивании определялись умножением силы тяжести кузова на расчетное значение показателя отношения динамической составляющей вертикальной силы к максимальной статической нагрузке во второй ступени рессорного подвешивания, который равен 0,2.

Вертикальная составляющая (добавка) на кузов от продольной силы инерции кузова определена по формуле:

$$\Delta P = P_{ик} \frac{h_k}{2L} \quad (1)$$

где: $P_{ик}$ – сила инерции массы брутто кузова; h_k – расстояние от центра тяжести кузова до плоскости опор на тележку; $2L$ – база кузова.

Центробежная сила для кузова определена, исходя из непогашенного ускорения равного $0,7 \text{ м/с}^2$.

Сила давления ветра получена из расчета удельного давления ветра на боковую проекцию кузова равного 300 Н/м^2 .

Силы взаимодействия между вагонами прикладываются по оси сцепления устройства по двум расчетным схемам: с обоих концов вагона, с одного конца. Последние уравновешена силами инерции вагона.

Продольные силы, действующие на кузов:

- для I режима: усилие сжатия $0,4 \text{ МН}$ (для консольной части $0,5 \text{ МН}$); усилие растяжения $0,3 \text{ МН}$.
- для II режима: усилие сжатия $0,12 \text{ МН}$; усилие растяжения $0,12 \text{ МН}$.

Силы инерции, действующие на отдельные узлы и элементы вагона, приложены к центрам тяжести их масс и определены для II режима по формуле:

$$P_{ui} = F_A \frac{m_i}{m_k}, \quad (2)$$

где: F_A – продольное усилие, обусловленное силами тяги или торможения, кН; m_i – масса узла; m_k – масса вагона, кг.

Инерционные силы для расчета узлов связи кузова с тележкой определялись исходя из ускорения массы тележки вдоль оси пути равного $2g$ для моторных и $4g$ – для немоторных тележек.

Результаты расчетов

Выполнен комплекс расчетов металлоконструкций головного и промежуточного вагонов для описанных режимов нагрузки. На рис. 4 приведена картины распределения эквивалентных напряжений по Мизесу для головного вагона при действии нагрузок, характерных для I режима нагрузки при действии растягивающих продольных сил. На рис. 5 приведены фрагменты распределения эквивалентных напряжений при II режиме нагрузки при сжатии.

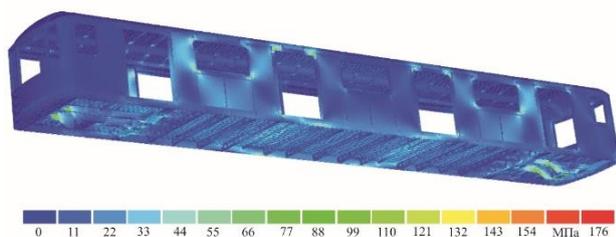


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений при I режиме нагрузки (растяжение) для головного вагона

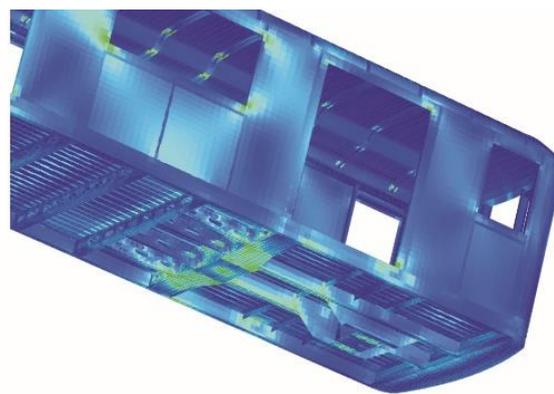


Рис. 5. Фрагмент распределения эквивалентных напряжений при II режиме нагрузки (сжатие) для головного вагона

Рис. 5. Фрагмент распределения эквивалентных напряжений при II режиме нагрузки (сжатие) для головного вагона

На рис. 6 и рис. 7 приведены диаграммы с результатами максимальных эквивалентных напряжений по конструктивным элементам головного вагона для обоих режимов нагрузки.

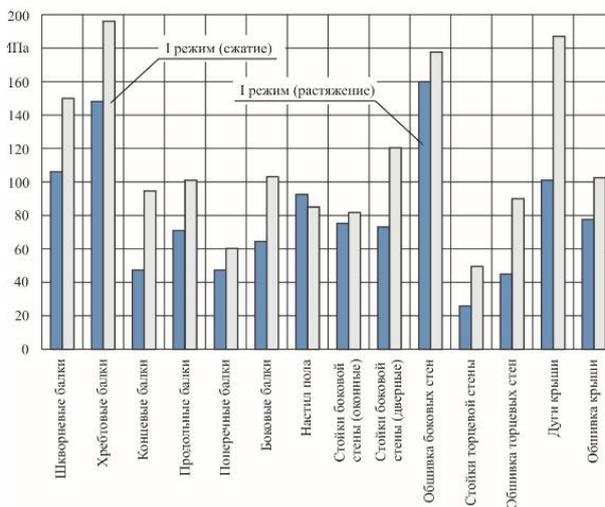


Рис. 6. Диаграмма максимальных напряжений по конструктивным элементам головного вагона (I режим)

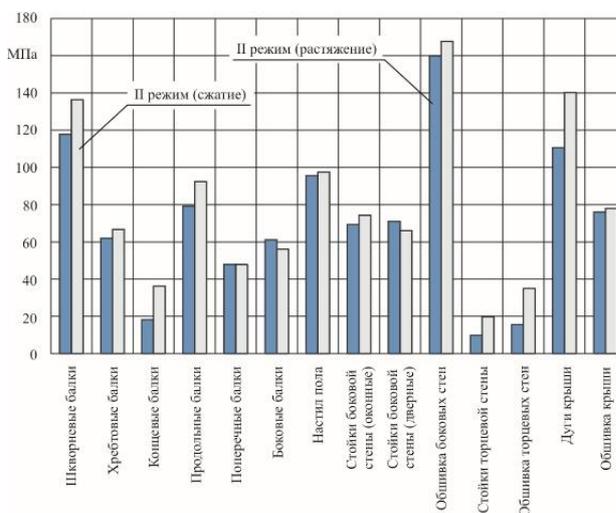


Рис. 7. Диаграмма максимальных напряжений по конструктивным элементам головного вагона (II режим)

Из рис. 6 видно, что наибольшие напряжения возникают в хребтовой балке, причем при действии продольных сжимающих нагрузок при I режиме нагрузки они близки к допускаемым. Наибольшие напряжения в элементах шкворневой балки не превышают 150 МПа, причем наблюдается их концентрация вблизи границ отверстий на обоих вертикальных листах. В элементах боковых балок напряжения не превышают 48% от допускаемых значений. В обшивке боковой стены максимальные напряжения составляют 177,5 МПа. Уровень напряжений в дугах крыши не превышает 87% от допускаемого значения.

Анализ диаграмм рис. 7 показал, что наибольшие напряжения возникают в шкворневой балке, где их значения составили 88% от допускаемых. Следует отметить, что напряжения концентрируются на внутреннем листе в зоне сочленения с продольными балками и местах расположения отверстий. Наибольшие напряжения в элементах хребтовой балки не превышают 66,65 МПа. В элементах продольных балок напряжения не превышают 50% от допускаемых значений. В элементах каркаса боковой стены максимальные напряжения возникают в дверных стойках и составляют 70,95 МПа. Уровень напряжений в обшивке крыши не превышает 39% от допускаемого значения. Уровень напряжений в дугах крыши не превышает 85% от допускаемого.

Аналогичный комплекс расчетов выполнен для промежуточного вагона. На рис. 8 и рис. 9 приведены сводные диаграммы с результатами максимальных эквивалентных напряжений по конструктивным элементам промежуточного вагона для обоих режимов нагрузки.

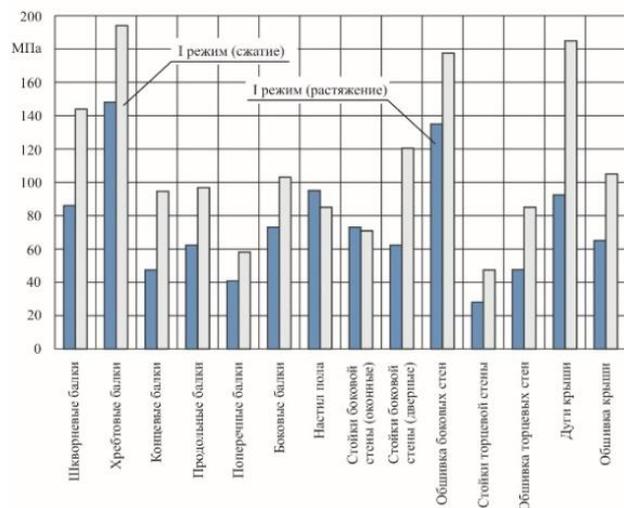


Рис. 8. Диаграмма максимальных напряжений по конструктивным элементам промежуточного вагона (I режим)

Из диаграмм рис. 8 видно, что наибольшие напряжения при первом режиме возникают в хребтовой балке, где расчетные напряжения составили 97% от допускаемого значения. Наибольшие напряжения в элементах шкворневой балки не превышают 144 МПа и, также как и в головном вагоне, сконцентрированы границам отверстий на обоих вертикальных листах. В элементах боковых балок напряжения не превышают

48% от допускаемых значений. В элементах обшивки боковой стены максимальные напряжения составляют 177,5 МПа. Уровень напряжений в дугах крыши не превышает 86% от допускаемого значения.

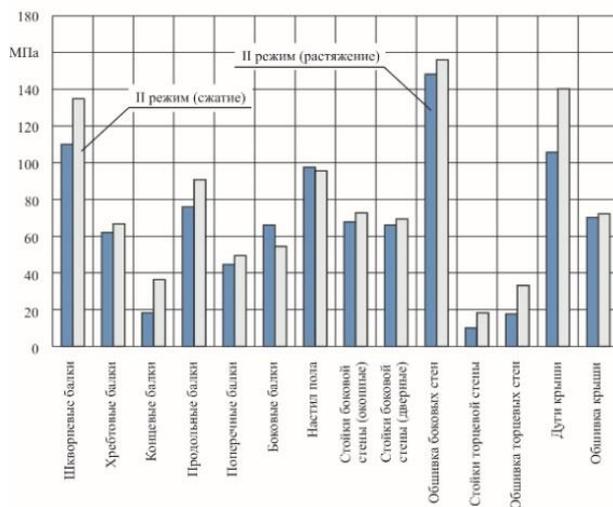


Рис. 9. Диаграмма максимальных напряжений по конструктивным элементам промежуточного вагона (II режим)

Анализ диаграмм рис. 9 показал, что наибольшие напряжения возникают в шкворневой балке, где их значения составили 87% от допускаемых. Напряжения концентрируются на внутреннем листе в зоне сочленения с продольными балками и местах расположения отверстий. Напряженное состояние хребтовой балки промежуточного вагона практически не отличается от напряженного состояния балки головного вагона. В элементах продольных балок напряжения не превышают 46% от допускаемых значений. В элементах каркаса боковой стены максимальные напряжения возникают в дверных стойках и составляют 68 МПа. Уровень напряжений в обшивке крыши не превышает 36% от допускаемого значения.

В целом можно отметить, что несущие конструкции вагонов моделей 81-717 (головной вагон) и 81-714 (промежуточный вагон) после их длительной эксплуатации соответствуют установленным требованиям прочности.

Выводы

В рамках реализации процедуры оценки остаточного ресурса несущих конструкций вагонов метрополитена после выработки срока службы выполнено обследование их технического состояния и получены значения остаточных толщин конструктивных элементов. Установлено, что коррозионный износ несущих конструкций вагонов не превышает 7% от номинальных значений.

Разработаны конечно-элементные модели металлоконструкций вагонов моделей 81-717 и 81-714, позволяющие выполнять оценку их прочности при дифференцированном учете степени коррозионного износа несущих конструкций после длительной эксплуатации.

Выполнив комплекс расчетов напряженно-деформированного состояния конструкций головного

и промежуточного вагона, установлено, что с учетом выявленных значений коррозионного износа несущие конструкции вагонов метрополитена после выработки срока службы соответствуют установленным требованиям прочности.

Литература

- Boiko, A. 2013. Assessment of remaining resource of tank wagons with expired life time. *Summary of Doctoral Dissertation: Engineering sciences*. Riga: Riga Technical University. 39 p.
- Борисов, С. В. 2006. Прогнозирование остаточного ресурса и продление срока службы вагонов метрополитена. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук (05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация). Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения. 168 с.
- Бороненко, Ю.П. и др. 2012. О корректировке «Положения о продлении срока службы грузовых вагонов, курсирующих в международном сообщении», *Евразия Вести* X: 13–14.
- Senko, V.; Putsiata, A.; Kanavalau Y. 2016. Definition of residual resource of a bearing structure of the railway car hopper-batcher after long-term service, in *Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, 2016, Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, Paper 239, 16 p.
- Нормы для проектирования, расчета и оценки прочности и динамики механической части вагонов метрополитена колеи 1520 мм, 2010, СТО СДС ОПЖТ, 120 p.