



Надежность рам тележек метровагонов



Виталий ПОПОВ

Vitaly B. POPOV

Анализ надежности рам тележек вагонов метрополитена по результатам их эксплуатации на подземных линиях российских городов. Специфика технических условий, степень динамических нагрузок, функции назначенного ресурса и другие факторы, влияющие на выбор инженерных решений, модернизационную политику конструкторских бюро и вагоностроителей.

Ключевые слова: вагон метрополитена, рама тележки, надежность, отказы, пути модернизации.

Попов Виталий Борисович – ведущий инженер-конструктор ОАО «Метровагонмаш» (г. Мытищи, Московская обл.).

В работе [1] отмечалась низкая надежность рам тележек парка Московского метрополитена. Продолжая эту тему и дополняя ранее выявленные проблемы, попробуем более детально проанализировать создавшуюся ситуацию и показать те направления инженерного поиска, которые призваны упрочить конструкцию отечественных метровагонов и улучшить их эксплуатационные характеристики.

СТРУКТУРНЫЙ СОСТАВ ПАРКА

Пять групп вагонов метрополитена, приведенные в таблице 1, имеют разные конструкции ходовых частей (тележек). Мы ограничимся анализом надежности рам тележек первых трех групп, то есть исключим вагоны новых моделей «Яуза» и «Русич». Это связано с тем, что надежность современных конструкций достаточно высока, да и эксплуатируются они в основном на Московском метрополитене, а в нашем анализе важно сравнить результаты эксплуатации техники в разных по своим условиям городах.

Итак, выделены следующие три группы: – рамы тележек вагонов модификации серии «Е»;

Таблица 1

Структура парка вагонов российских метрополитенов (по состоянию на 1.1.2011 г.)

Название метрополитена (по городу нахождения)	Количество вагонов инвентарного парка, шт.					
	модификации вагонов Е	81-717, 81-714	81-717.5, 81-714.5 и модификации	81-720, 81-721 и модификации («Яуза»)	81-740, 81-741 и модификации («Русич»)	Итого
Московский	627	1407	1856	85	537	4512
Санкт-Петербургский	695	362	383	-	-	1440
Нижегородский	-	68	12	-	-	80
Новосибирский	-	66	26	-	-	92
Самарский	-	32	14	-	-	46
Екатеринбургский	-	-	54	-	-	54
Казанский	-	-	20	-	3	23

Таблица 2

Группы серий вагонов с одинаковыми (близкими) конструкциями тележек и рам тележек

№№ п/п	Серии вагонов	Принимаемое рабочее название группы вагонов
1	Еж, Ем, Еж3, Еж6, Ем-501, Ем-502, Ем-508, Ем-508 Т, Ем-509	Модификации вагона серии Е
2	81-717, 81-714	Вагоны серий 81-717, 81-714
3	81-717.5, 81-714.5, 81-7175 М, 81-714.5 М, 81-717.5 Д, 81-714.5 Д, 8888881-717.6, 81-714.6, 81-540, 81-541, 81-553.3, 81-554.3, 81-555.3	Вагоны серий 81-717.5, 81-714.5 и их модификации

– рамы тележек вагонов серий 81-717, 81-714;

– рамы тележек серий 81-717.5, 81-714.5 и их модификаций.

Отметим, что это деление в известной мере условно. Оно исходит из конструктивного сходства объекта исследования – тележек и рам тележек. Сказанное поясняют данные, представленные в таблицах 2 и 3.

Хотя конструктивные особенности рам тележек выделенных групп вагонов были рассмотрены довольно подробно [1], целесообразно напомнить, что речь идет о сварных рамах Н-образной формы, состоящих из двух продольных балок (боковин) и двух поперечных балок; каждая балка представляет собой два сваренных встык штампованных швеллерообразных профиля толщиной 10 мм. Материал рамы – сталь 20 или сталь 3 сп5.

Основные различия рам определены техническими характеристиками тележек, приведенными в таблице 3. Выделим неко-

торые из них. Во-первых, это связь колесной пары с рамой тележки (поводковая или шпинтонная); во-вторых, мощность тяговых двигателей; в-третьих, годы выпуска вагонов.

Последнее обстоятельство, обычно игнорируемое специалистами по надежности, требует разъяснения. Срок службы вагона метрополитена (по техническим условиям – 31 год) не совпадает со сроком службы рам тележек. Рамы списываются из эксплуатации по техническому состоянию или назначенному ресурсу гораздо раньше вагона. Вместо списанных промышленностью поставляются отдельно на замену новые рамы тележек. Таким образом, парк уже невыпускаемых вагонов модификаций серии Е и 81-717/714 имеет только тележки ремонтного формирования, что несомненно влияет на параметры надежности рам.

Очевидно и то, что модификации вагона серии Е выработали свой ресурс и подлежат списанию. Однако их количество





Таблица 3

Технические характеристики тележек

Характеристика	Группа серий вагонов		
	Модификации серии Е	81–717, 81–714	81–717.5, 81–714.5 и модификации
Годы серийного выпуска вагонов	1970–1978	1978–1989*	с 1989 по настоящее время
Осевая формула вагона	20–20	20–20	20–20
Максимальная нагрузка от оси на рельс, кН (тс)	130,39 (13,3)	133,3 (13,6)	133,3 (13,6)
Масса тележки, кг	7500	7600	7500
База тележки, мм	2100	2100	2100
Диаметр нового колеса по кругу катания, мм	780	780	780
Связь колесной пары с рамой тележки	поводковая	поводковая	шпинтонная
Связь кузова с моторной тележкой	пятниковый узел	пятниковый узел	пятниковый узел
Мощность тягового электродвигателя, кВт	72	115	115
Вид тока тягового двигателя	постоянный	постоянный	постоянный
Класс подвешивания тягового привода	2	2	2
Рессорное подвешивание	двухступенчатое пружинное	двухступенчатое пружинное	двухступенчатое пружинное

* В более позднее время имели место случаи изготовления разовых партий вагонов этих серий.

Таблица 4

Статистические данные по отказам рам тележек инвентарного парка Московского метрополитена за 2010 год

Группа рам тележек	Инвентарный парк рам тележек, шт.	Кол-во ремонтов	Кол-во списаний по техническому состоянию	Общее количество отказов
Модификации вагонов серии Е	1254 1254	303	272	575
Вагоны серий 81–717/714	1976	352 352	83	435
Вагоны серий 81–717.5/714.5 и их модификации	3700	608 608	118	726
Итого	6930	1263	473	1736

Примечание: приведенные цифры несколько превышают статистику Московского метрополитена, поскольку автором учтены данные по заводским ремонтам.

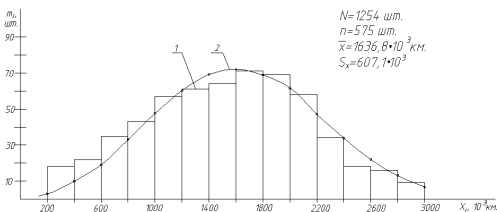


Рис. 1. Распределение наработки до отказа поводковых рам тележек вагонов модификаций серии Е:
1 – эмпирическое распределение (гистограмма);
2 – расчетное распределение (закон Вейбулла – Гнеденко).

(см. таблицу 1) говорит о том, что эксплуатация этих вагонов будет продолжаться и в ближайшем будущем, а следовательно, и анализ их надежности по-прежнему актуален.

СИТУАЦИЯ НА СТОЛИЧНЫХ ЛИНИЯХ

Теперь мы можем перейти собственно к вопросам надежности. В качестве базовых будем считать статистические данные по Московскому метрополитену как наиболее нагруженному и имеющему самый большой парк вагонов.

Наблюдению подвергся весь инвентарный парк рам тележек в течение 2010 года путем фиксирования и изучения каждого случая отказа. Под отказом подразумевается нарушение работоспособного состояния рамы. Как правило, это трещинообразование (любое) или деформация выше допустимого нормативного значения. Отказы принуждают к ремонту или списанию рамы из эксплуатации. Статистические данные сведены в таблицу 4.

Данные наблюдений о наработках до отказа рам тележек модификаций вагона Е приведены на рис. 1 в виде упорядоченного по интервалам ряда эмпирического распределения (гистограммы). Методами математической статистики определен вид закона распределения наработки до отказа. Выполненные расчеты с вероятностью до 0,95 показывают, что эмпирическое распределение аппроксимируется теоретическим законом распределения Вейбулла-Гнеденко. Функция плотности вероятности распределения наработки до отказа рам тележек модификаций серии Е имеет вид

$$\phi(x) = 2,95 \cdot 0,545 \cdot 10^{-6} x^{1,95} \exp(-0,545 \cdot 10^{-6} x)^{1,95}.$$

Среднее значение наработки до отказа этих рам составляет $1636,8 \cdot 10^3$ км при назначенном ресурсе $3000 \cdot 10^3$ км пробега. Оценка количества отказов в зависимости от места их возникновения приведена в диаграмме Парето на рис. 2. Из нее следует, что почти половина отказов (49,1%) приходится на два узла (наличники центрального подвешивания и поводковые кронштейны).

Перейдем к рамам тележек вагонов серий 81–717/714. С вероятностью до 0,95 эмпирическое распределение аппроксимировано логарифмически-нормальным законом. Расчетom получен следующий вид функции плотности вероятности распределения наработки до отказа:

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,209x} \exp\left[-\frac{(\lg x - 2,998)^2}{2 \cdot 0,209^2}\right].$$

Среднее значение наработки до отказа рам тележек вагонов серий 81–717/714 составляет $1102,5 \cdot 10^3$ км при назначенном ресурсе $2500 \cdot 10^3$ км пробега. Наибольшее количество отказов (64,7%) приходится на поводковые кронштейны и наличники центрального подвешивания.

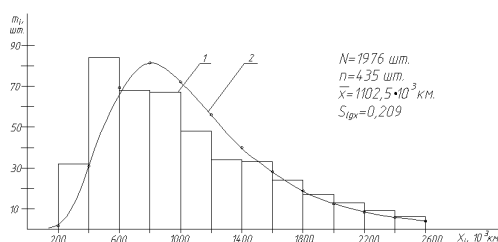


Рис. 2. Диаграмма Парето. Распределение отказов рам тележек модификаций серии Е по месту возникновения:

- 1 – наличники центрального подвешивания;
- 2 – поводковый кронштейн; 3 – верхний моторный кронштейн; 4 – деформации рам; 5 – нижний моторный кронштейн; 6 – кронштейн редуктора;
- 7 – прочие отказы.

Шпинтонные рамы тележек вагонов серий 81–717.5/714.5 и модификаций являются самой многочисленной группой рам – 53% от инвентарного парка рассматриваемых серий и 38% от всего инвентарного парка рам тележек Мосметрополитена. Среднее значение наработки до отказа составляет $740,9 \cdot 10^3$ км при назначенном ресурсе $1500 \cdot 10^3$ км пробега. С вероятностью до 0,95 эмпирическое распределение согласуется с логарифмически-нормальным законом. Определен вид функции плотности вероятности распределения наработки до отказа

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,156x} \exp\left[-\frac{(\lg x - 2,843)^2}{2 \cdot 0,156^2}\right].$$

Наибольшее количество отказов (65,7%) шпинтонных рам тележек приходится на кронштейны предохранительных скоб центрального подвешивания и наличники центрального подвешивания. Характерные места трещинообразования иллюстрирует рис. 3.

Построенные статистические модели позволяют прогнозировать показатели надежности рам тележек, прежде всего вероятность их безотказной работы в зависимости от наработки. Кроме того, есть возможность несколько изменить сложившееся у специалистов представление о ненадежных узлах рам. Считалось, что это прежде всего шпинтонные втулки у шпинтонных рам, поводковые кронштейны у поводковых рам, а также моторные кронштейны и кронштейны редуктора. Однако, как следует из диаграмм



Таблица 5

Статистические данные по метрополитенам России за 2010 год

Название метрополитена	Инвентарный парк рам тележек, шт.	Общее кол-во отказов	Средне-годовой пробег, км	Максимально достигнутые пробеги, 103 км	Средняя заселенность вагона в «час-пик», человек	Оценка (средняя) состояния рельсового пути, балл/км	Минимальный интервал между поездами, сек.
Московский	6930	1736	160 000	В соответствии с назначенным ресурсом от 1500 до 3000	222	10,7	95
Санкт-Петербургский	3101	374	135 000	2 170 (вагоны 81–717); 3 900 (вагоны модификаций Е)	173	7,0	105
Новосибирский	184	10	110 000	2 488,673	53	0	180
Нижегородский	160	5	100 000	2 489,993	42	7,6	360
Екатеринбургский	110	-	80 000	1 720	61	6,0	240
Самарский	92	-	92 000	1 742,126	25	3,7	420

Примечания: 1) Данные получены от управлений метрополитенов через международную ассоциацию «Метро»; 2) Представлен инвентарный парк рам только вагонов старых серий; 3) Из анализа исключен Казанский метрополитен из-за недавнего начала работы и малого парка вагонов.

Парето (рис. 2, 4, 6), существенную долю отказов составляют элементы рам, связанные с центральным рессорным подвешиванием — наличники и окна центрального подвешивания, кронштейны предохранительных скоб.

СТАТИСТИКА РОССИЙСКИХ МЕТРОПОЛИТЕНОВ

Параметры надежности рам тележек связаны с условиями эксплуатации. Поэтому требуется изучить статистические данные по другим метрополитенам страны (таблица 5).

Анализ информации показывает, что одинаковые конструкции рам тележек имеют разные показатели надежности на разных метрополитенах. Наименее надежны рамы Московского и Санкт-Петербургского метропарков, и причины этого нужно искать в условиях эксплуатации.

1. Напряженное состояние рамы тележки в значительной степени обусловлено вертикальной статической и динамической нагрузками, связанными

с величиной средней заселенности вагона. В «час-пик» она на Московском метрополитене в 3,6 раза выше того же показателя в Екатеринбурге и почти в 9 раз — в Самаре.

2. Интенсивность эксплуатации рам тележек подтверждается такими показателями, как среднегодовой пробег и минимальный интервал между поездами. И здесь наиболее тяжелые условия в Москве и Санкт-Петербурге. С точки зрения прочностного состояния рамы это означает, что метрополитены мегаполисов работают при несколько больших ускорениях поездов при разгоне и торможении и более высоких средних скоростях движения, что отражается на режимах нагружения рамы тележки от тягового привода.

3. Значительная доля динамических нагрузок на рамы тележек зависит от состояния рельсового пути. На Московском на 1.7.2011 года лучшую оценку имела Люблинско-Дмитровская линия — 3,81 балл/км; худшую — Замоскворецкая и Каховская линии — 21,05 балл/км.

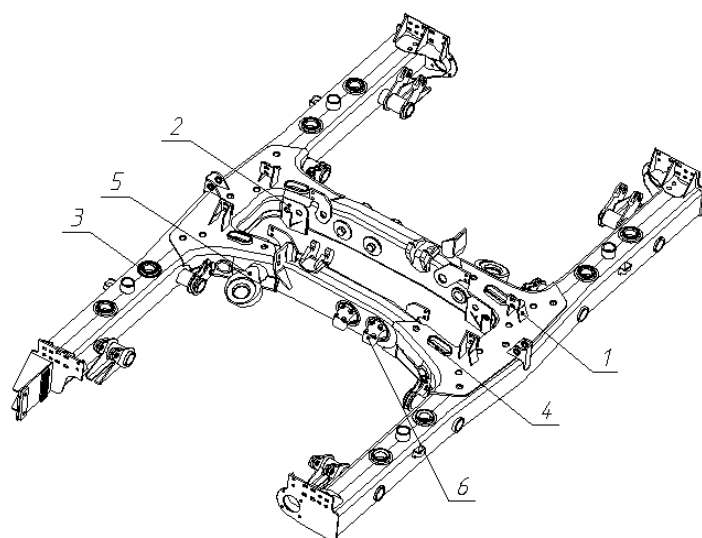


Рис. 3. Характерные места трещинообразований рам тележек вагонов серии 81-717.5/714.5 и модификаций (показана нижняя часть рамы):
 1 – кронштейн предохранительных скоб центрального подвешивания; 2 – наличник центрального подвешивания; 3 – шпинтонная втулка; 4 – окно центрального подвешивания; 5 – кронштейн редуктора; 6 – верхний моторный кронштейн.

Таким образом, и по этим показателям метрополитены крупнейших мегаполисов демонстрируют наиболее сложные условия эксплуатации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Итак, фактом остается недостаточная надежность эксплуатируемых рам тележек Московского и Санкт-Петербургского метрополитенов. В то же время надежность таких же рам на «малых» метрополитенах вполне приемлема. Поэтому объекты с гораздо более тяжелыми условиями эксплуатации требуют дополнительного внимания.

В стратегическом плане результаты анализа, изложенные в статье, подтверждают два принципиальных положения.

1. Необходимость разработки для тяжело нагруженных метрополитенов новой конструкции вагонов и соответственно новой конструкции тележек. Такая конструкция подготовлена ОАО «Метровагонмаш», прошла осенью

2011 года ходовые динамические испытания на Московском метрополитене. Началось изготовление опытно-промышленной партии модернизированных вагонов моделей вагонов 81–760 (головной вагон) и 81–761 (промежуточный вагон).

2. Эксплуатация и дальнейшее производство конструкций сварноштампованных рам тележек вагонов старых серий оправданы с технической и технико-экономической точек зрения для «малых» метрополитенов. Этот вывод крайне важен. Он означает сохранение производственных мощностей и технологий, продолжение работ по модернизации конструкций и совершенствованию процессов их изготовления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пузанков А. Д., Попов В. Б. Экипаж перспективных вагонов метрополитена // Мир транспорта. – 2011. – № 1.
2. Четвергов В. А., Пузанков А. Д. Надежность локомотивов. – М.: Маршрут, 2003.

RELIABILITY OF THE BOGIE FRAMES OF METRO CARS

Popov, Vitaly B. – leading designer engineer of JSC Metrovagonmash (Mytishchi, Moscow region).

The author analyzes reliability of bogie frames of metro cars see their operation in subways of different Russian cities. He studies specific operation conditions, dynamic loads, functions of assigned life cycle, other factors, and their influence on the choice of engineer decisions, modernization policy of designing offices and car manufacturers.

Key words: metro car, bogie frame, reliability, failure.

Координаты автора (contact information): Попов В. Б. – popov.w1980@mail.ru.

