

УДК 629.4.027.5

DOI: 10.34029/2311-4061-2022-142-1-04-13

Доктор техн. наук Пуцято А. В.

ОЦЕНКА РЕСУРСА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА МОДЕЛЕЙ 81-717 И 81-714 ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ключевые слова: вагоны метрополитена, несущая конструкция, длительная эксплуатация, прочность, метод конечных элементов, испытания, тензометрирование, напряжения, остаточный ресурс.

Введение

Регулярное движение поездов Минского метрополитена было открыто 30 июня 1984 года. В настоящее время эксплуатационная длина трех линий в двухпутном исчислении составляет 40,8 км с 33 станциями. Инвентарный парк вагонов составляет 390 единиц, из которых сформированы 79 составов: 73 пятивагонных и 6 четырехвагонных. Следует отметить, что из указанного числа вагонов порядка 10% – вагоны производства компании Stadler, введенные в эксплуатацию в ноябре 2020 года, с открытием третьей линии метро.

Первые поезда состояли из вагонов моделей 81-717 (головной) и 81-714 (промежуточный), общий вид которых приведен на рисунке 1.



Рис. 1 – Головной и промежуточный вагоны моделей 81-717 и 81-714

Срок службы указанного подвижного состава, назначенный заводом-изготовителем, составляет 31 год и в последние годы интенсивно достигается эксплуатируемыми вагонами. В то же время, учитывая практику эксплуатации (вагоны курсируют по одному маршруту) и ремонта вагонов (обслуживаются в одном депо), а также отсутствие отказов металлоконструкций вагонов есть основания предполагать, что ресурс их несущих конструкций не исчерпан.

Процедура оценки остаточного ресурса несущих конструкций нашла широкое применение при обосновании безопасной эксплуатации железнодорожного подвижного состава, нормативный срок службы которых истек. Так, в процессе длительной эксплуатации подвижного состава возникают коррозионные повреждения несущих элементов кузовов, вследствие чего происходит изменение геометрических характеристик сечений, а, следовательно, и прочности кузова в целом. В этом случае для обоснования продления срока службы кузовов вагонов необходимо прогнозирование их остаточного ресурса. Исследованиями в этом направлении занимались

научные школы железнодорожников многих организаций стран содружества [11, 14, 15, 17]. Так достаточно широко вопросы продления срока службы вагонам аккумулированы в монографии Третьякова А.В. [15]. Автором предложен расчетно-экспертно-статистический метод (РЭС-метод) управления индивидуальным ресурсом вагона в эксплуатации.

Отметим, что расчетно-экспериментальный подход нашел весьма широкое применение при научном обосновании остаточного ресурса многих типов и моделей вагонов. В работе Воiko А. [16] на основании расчетов прочности, а также по критерию многоциклового усталости выполнена оценка остаточного ресурса и предложены конструктивные решения по усилению несущей конструкции рамы вагона-цистерны для перевозки нефтепродуктов. В работе Зимаковой М.В. [4] оценку остаточного ресурса вагонов-цистерн предлагается выполнять с учетом изменения ударной вязкости материала несущей конструкции. При этом учитывалась динамика изменения ударной вязкости в зависимости от времени и климатических условий эксплуатации вагона-цистерны, а также коррозионный износ.

В работе Кельриха М.Б., Брайковской Н.С., Прокопенко П.Н. [6] также применен расчетно-экспериментальный метод оценки ресурса, основанный на теории линейного суммирования повреждений по критерию многоциклового усталости материала, но с учетом различных конструктивных особенностей вагонов-цистерн, в частности, рамного и безрамного исполнения, наличия шпангоутов и т.п.

Среди работ, связанных с оценкой остаточного ресурса кузовов пассажирских вагонов, следует также отметить работы Сенько В.И. и его учеников [14], где за основной критерий, определяющий ресурс, принимался коррозионный износ. В работе приведены исследования поэтапного влияния коррозионного износа материала на несущую способность кузовов пассажирских вагонов. В качестве объектов исследования были выбраны кузова пассажирских вагонов после истечения нормативного срока службы. В работе предложена дифференцированная оценка предельных значений толщины основных элементов кузовов. При этом в качестве предельного состояния элементов кузова предлагается считать потерю их несущей способности – прочности или устойчивости. Вопросы оценки ресурса и продления сроков службы различных моделей пассажирских вагонов рассмотрены также в работах [5, 13].

В работах [1, 7] для оценки и прогнозирования ресурса несущих конструкций вагонов предлагается использовать методы компьютерного моделирования, позволяющие смоделировать более широкий спектр динамических нагрузок на вагон. В тоже время в диссертационной работе [8] отмечено, что, несмотря на постоянное совершенствование методов прочностных расчетов, имеют место конструктивные области, где расчетную оценку остаточного ресурса выполнить затруднительно. Поэтому экспериментальные оценки подвижного состава являются единственным методом подтверждения конструкции подвижного состава нормативным требованиям. В работе проведен сравнительный анализ результатов прочностных расчетов с экспериментальными результатами комплексных нормативных испытаний кузовов пассажирских вагонов после ремонта. Достаточно большое число работ посвящено продлению срока службы тягового подвижного состава [3, 9, 12, 17], в том числе вагонов метрополитена [2].

Результаты приведенных выше исследований показывают, что простое продление срока службы реализуется только в случае неполного израсходования остаточного ресурса. Значительно чаще для продления срока службы требуется проведение дополнительных ремонтных или модернизационных работ, в том числе и в связи с моральным старением подвижного состава. Следует отметить, что выводы о необходимости усиления и восстановления металлоконструкций вагонов диктуются отсутствием или потребностью увеличения остаточного ресурса ввиду неудовлетворительного технического состояния несущих конструкций подвижного состава, наряду с высокой интенсивностью его эксплуатации.

Таким образом, анализ публикаций, посвященных проблеме оценки остаточного ресурса несущих конструкций железнодорожного подвижного состава, позволяет предложить следующие этапы работ для оценки ресурса несущих конструкций вагонов метрополитена:

- изучение технической документации, условий эксплуатации, анализ информации по проведению технических освидетельствований и ремонтов вагонов;
- разработка диагностических карт несущей конструкции вагона, выполнение визуального контроля, измерение толщин элементов конструкции, контроль сварных швов и основного

металла, отбраковка вагонов, а также отбор образца с худшим техническим состоянием для проведения испытаний;

– разработка компьютерных моделей и выполнение виртуальных испытаний вагона с учетом фактических значений толщин элементов конструкции для определения соответствия деградированной конструкции требованиям актуальной нормативной документации;

– проведение натуральных контрольных испытаний несущей конструкции вагона при характерных режимах нагружения;

– оценка остаточного ресурса несущей конструкции вагона.

Оценка технического состояния вагонов после длительной эксплуатации

На первом этапе обоснования возможности дальнейшей безопасной эксплуатации вагонов после выработки срока службы, установленного заводом-изготовителем, выполнена оценка технического состояния их несущих конструкций. Фактическое техническое состояние металлоконструкций вагонов было установлено специалистами отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Технические и технологические оценки ресурса единиц подвижного состава» БелГУТ методами неразрушающего контроля: визуальный и ультразвуковая 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.

По результатам обследования технического состояния металлоконструкций более чем 70 вагонов установлено, что коррозионный износ не превышает 7 % от номинальных значений конструктивных элементов. В тоже время визуальный контроль несущих конструкций позволил выявить ряд конструктивных областей и элементов, для которых характерно появление трещин в процессе эксплуатации:

- зона крепления сцепного устройства на хребтовой балке (рис. 2 а);
- вертикальные листы шкворневой балки по границам отверстий (рис. 2 б);
- кронштейны крепления подвески автосцепки (рис. 2 в);
- вертикальные стенки продольных балок, за шкворневой балкой.



Рис. 2 – Эксплуатационные повреждения элементов несущих конструкций вагонов моделей 81-717 и 81-714: а) – трещина в хребтовой балке в районе крепления сцепного устройства; б) – трещина в вертикальном листе шкворневой балки; в) – трещина кронштейна крепления подвески автосцепки

Разработка конечно-элементных моделей

На основе комплектов конструкторской документации на вагоны, а также с учетом результатов технического обследования их металлоконструкций были разработаны конечно-элементные модели кузовов вагонов. Использованы два типа конечных элементов: плоские пластинчатые 3-х и 4-х узловые. Для повышения точности получения результатов сетка конечных элементов строилась регулярной, тем самым, исключая появление в моделях элементов с критическими соотношениями линейных и угловых размеров конечных элементов. Таким образом, расчетная модель головного вагона представлена 192309 конечными элементами, промежуточного вагона – 192614.

Несущие элементы кузовов вагонов изготовлены из Ст3. Модуль Юнга принят равным 210 ГПа, коэффициент Пуассона - 0,3. Полученные конечно-элементные модели металлоконструкций головного и промежуточного вагонов моделей 81-717 и 81-714 приведены на рисунке 3.

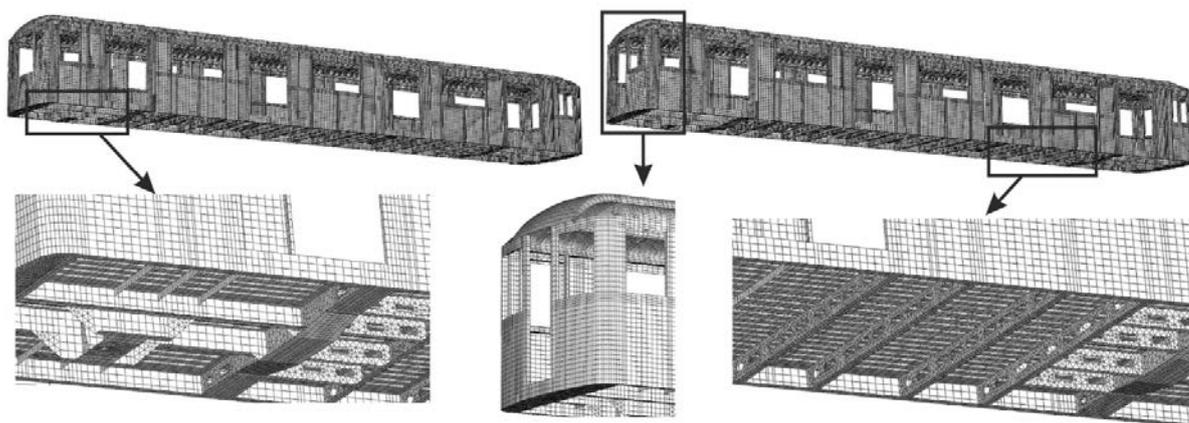


Рис. 3 – Конечно-элементные модели вагонов метрополитена модели 81-717/714

Кинематические граничные условия включают в себя ограничение степеней свободы в местах крепления в кузовах вагонов упоров сцепного устройства и пятников. При подготовке модели были учтены также места крепления подвагонного оборудования. Силовые граничные условия для оценки прочности приняты в соответствии с действующими Нормами [10] и представляют собой системы вертикальных, боковых и продольных сил.

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.

Центробежная сила для кузова определена, исходя из непогашенного ускорения, равного 0,7 м/с². Сила давления ветра получена из расчета удельного давления ветра на боковую проекцию кузова, равного 300 Н/м². Силы взаимодействия между вагонами приложены по оси сцепного устройства, по двум расчетным схемам: с обоих концов вагона, с одного конца. Последние уравновешены силами инерции вагона. Продольные силы, действующие на кузов: для I режима – усилие сжатия 0,4 МН (для консольной части 0,5 МН) и усилие растяжения 0,3 МН; для II режима – усилие сжатия 0,12 МН и усилие растяжения 0,12 МН.

Силы инерции, действующие на отдельные узлы и элементы вагона, приложены к центрам тяжести их масс. Инерционные силы для расчета узлов связи кузова с тележкой определялись исходя из ускорения массы тележки вдоль оси пути, равного 2 g для моторных и 4 g для немоторных тележек.

Результаты оценки прочности при фактическом состоянии вагонов

Комплекс расчетов металлоконструкций головного и промежуточного вагонов на прочность проводился для описанных режимов нагружения. Для примера, на рисунке 4 приведена полученная картина распределения эквивалентных напряжений по Мизесу для головного вагона при действии нагрузок, характерных для I режима нагружения при действии сжимающих продольных сил.

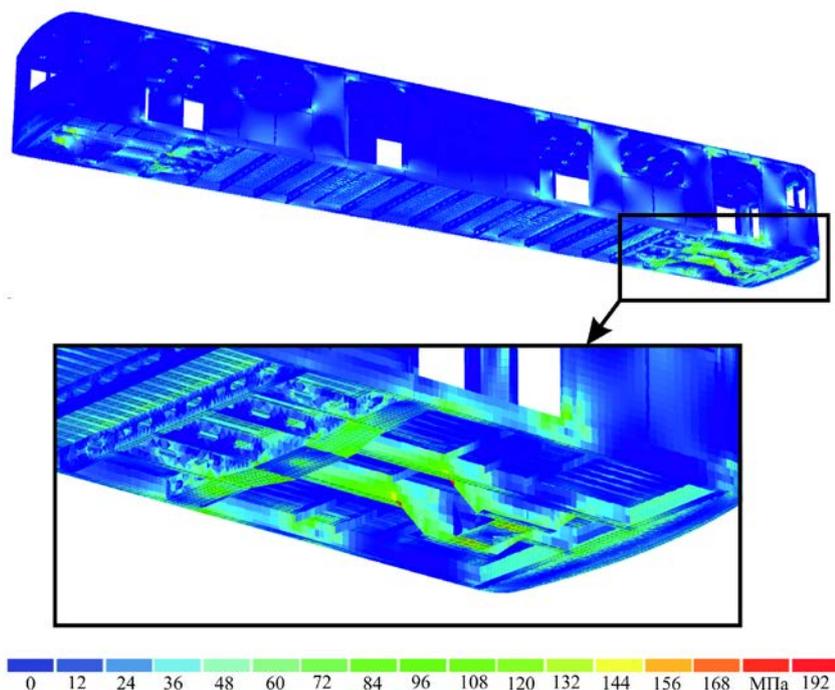


Рис. 4 – Распределение эквивалентных напряжений в кузове головного вагона при I режиме нагружения (сжатие)

Результаты расчетов на прочность головного вагона показали, что при первом режиме нагружения наибольшие напряжения возникают в хребтовой балке, причем при действии продольных сжимающих нагрузок 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. Наибольшие напряжения при втором режиме нагружения 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. Получено, 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 по 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. При нагружении по второму режиму установлено, 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 требованиям прочности, установленным в Нормах [10].

Результаты экспериментальных исследований

Выполненные расчеты прочности кузовов вагонов позволили разработать схемы установки тензометрических датчиков Т1...Т28 для натурных испытаний в наиболее нагруженных областях конструкции. Фрагменты расположения тензодатчиков на металлоконструкции вагона и их нумерация приведены на рисунке 5.

Динамические прочностные испытания проводились в составе опытного поезда, составленного из головного вагона модели 81-717, промежуточного вагона модели 81-714 и хвостового вагона метрополитена модели 81-717. Вагоны загружались балластом до полной грузоподъемности. Измерения динамических напряжений в элементах металлоконструкции вагона метрополитена проводились:

- на прямых участках пути со скоростями 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 км/ч;
- на кривых участках со скоростями 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 км/ч;
- при торможении до полной остановки со скоростями: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 км/ч.

Регистрация показателей в измеряемых процессах производилась кадрами различной длительности, в зависимости от длины опытного участка пути и скорости движения опытного состава. При обработке зарегистрированных процессов, для каждого из них по каждому кадру выделялся характерный участок пути: прямая, кривая и торможение до полной остановки. Доля времени измерений, приходящаяся на эксплуатацию в режиме «тяга» составила 0,325; в режиме «торможение» – 0,325; в режиме «движение в кривой» – 0,35.



Рис. 5 – Фрагменты расположения тензодатчиков на металлоконструкциях вагонов модели 81-717/714

Дополнительно были проведены испытания вагонов по их сбросу с клиньев, при которых регистрировался прогиб рессорного подвешивания, необходимый для определения коэффициента вертикальной динамики вагона и частоты колебания кузова.

В результате обработки экспериментальных данных получены массивы амплитудных значений напряжений для каждой контрольной точки кузова вагона, при различных режимах

эксплуатации и диапазонов скоростей движения. Фрагменты полученных результатов для головного вагона, на примере датчика Т6, установленного на нижней полке хребтовой балки вблизи сочленения со шкворневой, приведены в таблицах 1 и 2.

Табл. 1 – Промежуточные результаты напряжений в кузове головного вагона

Тензодатчик	σ_i , МПа	V_i , км/ч							
		10	20	30	40	50	60	70	80
Т6	режим «тяга»								
	σ_{\max}	31,05	37,25	44,05	38,55	38,35	49,25	54,05	53,75
	σ_{\min}	29,25	25,95	23,65	19,65	21,45	17,25	18,65	29,45
	$\sigma_a^{исп}$	0,90	5,65	10,20	9,45	8,45	16,00	17,70	12,15
	$\sigma_m^{исп}$	30,15	31,60	33,85	29,10	29,90	33,25	36,35	41,60
	σ_a	9,945	15,13	20,355	18,18	17,42	25,975	28,605	24,63
	режим «кривая»								
	σ_{\max}	30,25	33,45	34,25	45,05	40,45	41,95	34,45	44,85
	σ_{\min}	21,55	27,65	33,25	29,45	20,75	22,95	20,15	20,35
	$\sigma_a^{исп}$	4,35	2,90	0,50	7,80	9,85	9,50	7,15	12,25
	$\sigma_m^{исп}$	25,90	30,55	33,75	37,25	30,60	32,45	27,30	32,6
	σ_a	12,12	12,065	10,625	18,975	19,03	19,235	15,34	22,03
	режим «торможение»								
	σ_{\max}	34,85	37,75	31,15	58,15	60,65	39,35	41,85	29,85
	σ_{\min}	18,25	30,45	15,55	33,55	34,25	24,55	11,85	13,75
	$\sigma_a^{исп}$	8,30	3,65	7,8	12,30	13,20	7,40	15,00	8,05
	$\sigma_m^{исп}$	26,55	34,10	23,35	45,85	47,45	31,95	26,85	21,80
	σ_a	16,265	13,88	14,805	26,055	27,435	16,985	23,055	14,59

Табл. 2 – Плотность распределения амплитуд динамических напряжений в кузове головного вагона

	Диапазоны напряжений, МПа							
	от 0 до 5	от 5 до 10	от 10 до 15	от 15 до 20	от 20 до 25	от 25 до 30	от 30 до 35	от 35 до 40
Т6	режим «тяга»							
		0,125		0,375	0,25	0,25		
	режим «кривая»							
			0,375	0,5	0,125			
	режим «торможение»							
			0,375	0,25	0,125	0,25		

В таблице 1 приведены: σ_{\max} , σ_{\min} – значения максимальных и минимальных динамических напряжений в контрольной точке; $\sigma_a^{исп}$ – амплитуда динамического напряжения, полученная по результатам испытаний при несимметричном цикле нагружения; $\sigma_m^{исп}$ – среднее напряжение цикла; σ_a – амплитуда динамического напряжения, приведенная к эквивалентному симметричному циклу.

Оценка остаточного ресурса кузова вагона метрополитена

Расчеты остаточного ресурса кузовов вагонов моделей 81-717 и 81-714 выполнены с учетом следующих допущений:

- усталостное повреждение или разрушение материала вагона в основном происходит при упругом деформировании;
- параметром, определяющим циклическую прочность, являлся коэффициент запаса сопротивления усталости;
- справедлива линейная гипотеза суммирования усталостных повреждений;

– для неустановившегося режима нагружения амплитудные значения динамических напряжений приводятся к эквивалентному симметричному циклу.

Коэффициент запаса сопротивления усталости определяется по формуле

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,\varepsilon}} \geq [n], \quad (1)$$

где: $\sigma_{a,N}$ – предел выносливости (по амплитуде) для контрольной зоны при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения при базовом числе циклов $N_0 = 10^7$;

$\sigma_{a,\varepsilon}$ – величина амплитуды динамического напряжения условного симметричного цикла, приведенная к базовому числу циклов N_0 , эквивалентная повреждающему воздействию реального режима эксплуатационных напряжений за расчетный срок службы;

$[n]$ – минимально допустимый коэффициент запаса сопротивления усталости за выбранный срок службы, принимается в соответствии с данными проведенных исследований [1].

Расчетное значение $\sigma_{a,N}$ определяется с учетом снижения предела выносливости в выбранной контрольной зоне по отношению к пределу выносливости гладкого стандартного образца согласно [10]. Таким образом, $\sigma_{a,\varepsilon}$ – параметр, включающий в себя срок службы металлоконструкции вагона. Для его определения при k режимах нагружения воспользуемся формулой

$$\sigma_{a,\varepsilon} = m \sqrt[k]{\sum_i \left[\frac{N_c^k}{N_0} \sum_i (\sigma_{ai}^k)^m \cdot p_i^k \right]}, \quad (2)$$

где: m – показатель степени в уравнении кривой усталости, в амплитудах;

N_c^k – суммарное число циклов динамических напряжений за расчетный срок службы кузова для k -го режима нагружения;

N_0 – базовое число циклов;

σ_{ai}^k – уровень амплитуд напряжений в i -ом интервале k -го режима нагружения;

p_i^k – вероятность (частота) действия уровня амплитуд $\sigma_{a,\varepsilon}$ в i -ом интервале k -го режима нагружения.

Суммарное число циклов для k -го режима представим в виде

$$N_c^k = K_k T_p, \quad (3)$$

где: K_k – коэффициент, связывающий суммарное число циклов динамических напряжений с расчетным суммарным сроком службы для k -го режима нагружения;

T_p – суммарный расчетный срок службы.

Амплитудные значения динамических напряжений для неустановившегося режима нагружения, полученные по результатам натурных испытаний продлеваемого вагона, приводятся к эквивалентному симметричному циклу по формуле

$$\sigma_a = \sigma_a^{ucn} + \psi \sigma_m^{ucn}, \quad (4)$$

где: σ_a^{ucn} – амплитуда динамического напряжения, полученная по результатам испытаний при несимметричном цикле нагружения;

ψ – коэффициент чувствительности асимметрии цикла нагружения;

σ_m^{ucn} – среднее напряжение цикла, полученное по результатам испытаний.

Таким образом:

$$\left(\frac{\sigma_{a,N}}{[n]} \right)^m = \sum_k \left[\frac{K_k T_p}{N_0} \sum_i (\sigma_{ai}^k)^m \cdot p_i^k \right]; \quad (5)$$

$$T_p = N_0 \frac{\left(\frac{\sigma_{a,N}}{[n]} \right)^m}{\sum_k \left[K_k \sum_i (\sigma_{ai}^k)^m \cdot p_i^k \right]}. \quad (6)$$

По результатам экспериментальных исследований получены значения остаточного ресурса

металлоконструкций кузовов вагонов в контрольных областях, которые сведены в таблицу 3. Результаты для конструктивных зон, в которых значения остаточного ресурса оказались равными более 100 лет в таблице не приведены.

Табл. 3 – Результаты оценки остаточного ресурса вагонов метрополитена моделей 81-717 и 81-714

№ точки	Долговечность, лет		№ точки	Долговечность, лет	
	вагон 81-717	вагон 81-714		вагон 81-717	вагон 81-714
T3	–	79,34	T8	–	47,34
T4	–	63,34	T12	98,51	–
T5	13,04	5,99	T13	39,84	82,32
T6	15,74	–	T16	–	45,97
T7	55,88	93,89	T18		82,65

Таким образом, по результатам расчетно-экспериментальной оценки долговечности по критерию усталостной прочности металлоконструкция вагона метрополитена, с учетом специфики его эксплуатации, обладает остаточным ресурсом не менее 5 лет.

Выводы

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

2. Разработаны параметрические конечно-элементные модели металлоконструкций кузовов вагонов моделей 81-717 (головной вагон) и 81-714 (промежуточный вагон), имеющие возможность дифференцированного учета утонения их конструктивных элементов.

3. Выполнен комплекс расчетов напряженно-деформированного состояния конструкций кузовов головного и промежуточного вагона, при их фактическом техническом состоянии, на нагрузки регламентированные актуальной нормативной документацией. Установлено, что с учетом выявленных значений коррозионного износа несущие конструкции вагонов метрополитена соответствуют требованиям прочности.

4. Выполнены экспериментальные исследования напряженного состояния кузовов головного и промежуточного вагонов метрополитена после длительной эксплуатации и получены массивы динамических напряжений в конструктивных элементах кузовов вагонов при различных режимах эксплуатации. Полученные значения амплитудных напряжений не превышают допустимого уровня установленного нормативной документацией.

5. Расчетно-экспериментальная оценка остаточного ресурса металлоконструкций кузовов вагонов метрополитена моделей 81-714 и 81-717 после их длительной эксплуатации показала, что после выработки вагонами нормативного срока службы, их несущие конструкции, исходя из критерия усталостной прочности, могут эксплуатироваться 5 лет.

Литература

1. Антипин Д. Я. Прогнозирование ресурса рамы универсального вагона-платформы с использованием современных элементов САПР / Д. Я Антипин, А. М. Высоцкий, Е. В. Колчина // САПР и моделирование в современной электронике : II Междунар. науч.-практ. конф. Брянск, 24-25 октября 2018 г. : сб. тр. / Брянский гос. техн. ун-т ; под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. – Брянск, 2018. – С. 3–6.

2. Борисов С.В. Прогнозирование остаточного ресурса и продление срока службы вагонов метрополитена: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / С.В. Борисов; ПГУПС. – СПб., 2006. – 168 с.

3. Григорьев П.С. Прогнозирование остаточного ресурса рам промышленных тепловозов: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / П.С. Григорьев; МГУПС. – М., 2016. – 150 с.

4. Зимакова М.В. Продление срока службы вагонов-цистерн с учетом изменения физико-

механических свойств металлоконструкций базовых узлов: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / М.В. Зимакова; ПГУПС. – СПб., 2012. – 144 с.

5. Дэмбэрэлсурен О. Оценка остаточного ресурса и продление сроков службы пассажирских вагонов УБЖД / О. Дэмбэрэлсурен // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 3 (43). – С. 97–103.

6. Кельрих М. Б. Особенности проведения исследований по продлению назначенного срока службы вагонов-цистерн для перевозки легких порошкообразных грузов / М. Б. Кельрих, Н. С. Брайковская, П. Н. Прокопенко // Проблемы безопасности на транспорте : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. : под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2019. – С. 158–160.

7. Кобищанов В. В. Оценка усталостной долговечности сварных несущих конструкций вагонов с учетом живучести / В. В. Кобищанов, Д. Я. Антипин // Тяжелое машиностроение. – 2006. – № 11. – С. 14–17.

8. Коршунов С. Д. Совершенствование методов оценки несущей способности и остаточного ресурса кузовов пассажирских вагонов после ремонта : дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук : 05.22.07 / С. Д. Коршунов. – Брянск, 2014. – 171 с.

9. Модернизация маневровых тепловозов с продлением срока службы / Г. М. Волохов [и др.] // Локомотив. – 2019. – № 4 (748). – С. 32–34.

10. Нормы для проектирования, расчета и оценки прочности и динамики механической части вагонов метрополитена колеи 1520 мм / СТО СДС ОПЖТ. – М., 2010. – 120 с.

11. О корректировке «Положения о продлении срока службы грузовых вагонов, курсирующих в международном сообщении» / Ю. П. Бороненко [и др.] // Евразия Вести. – 2012. – № X. – С. 13–14.

12. Оганьян Э. С. О порядке обновления парка и продления сроков службы локомотивов и их основного оборудования / Э. С. Оганьян, Г. М. Волохов, Г. И. Гаджиметов // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 3. – С. 69–71.

13. Разработка рекомендаций по продлению срока полезной эксплуатации пассажирских вагонов / С. В. Мямлин [и др.] // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 118–126.

14. Сенько В. И. Комплексная оценка остаточной несущей способности кузовов пассажирских вагонов / В. И. Сенько, А. В. Пигунов. – Гомель : БелГУТ, 2004. – 127 с.

15. Третьяков А. В. Управление индивидуальным ресурсом вагонов в эксплуатации: [монография] / А. В. Третьяков. – СПб. : ООО "Издательство ОМ-Пресс", 2004. – 348 с.

16. Voiko A. Assessment of remaining resource of tank wagons with expired life time: Summary of Doctoral Dissertation: Engineering sciences / A. Voiko; Riga Technical University. – Riga., – 2013. – 39 p.

17. Gorobets V. L. Operation characteristics of electric trains ER1, ER2 be-yond designed service life / V. L. Gorobets, O. M. Bondarev, V. M. Skoblenko // Наука та прогрес транспорту. 2014. № 6 (54). С. 119–127.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Пуцято Артур Владимирович,

д.т.н., доцент, ректор Гомельского государственного
технического университета имени П.О. Сухого.

Пр. Октября 48, г. Гомель, 246746, Беларусь.

Тел.: +37 529 652 43 65.

E-mail: putsyata.artur@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1828-8052>.