



Исследование прочности кузовов вагонов электропоезда нового поколения



Александр СКАЧКОВ
Alexander N. SKACHKOV

Сергей САМОШКИН
Sergey L. SAMOSHKIN



Сергей КОРШУНОВ
Sergey D. KORSHUNOV

Скачков Александр Николаевич — кандидат технических наук, директор ЗАО «Научная организация «Тверской институт вагоностроения», Тверь, Россия.

Самошкин Сергей Львович — доктор технических наук, начальник управления научно-технического обеспечения и развития ЗАО НО «Тверской институт вагоностроения», Тверь, Россия.

Коршунов Сергей Дмитриевич — кандидат технических наук, заведующий испытательной лабораторией ЗАО НО «Тверской институт вагоностроения», Тверь, Россия.

Study of Body Strength of New Generation Electric Train Cars

(текст статьи на англ. яз. —
English text of the article — p. 79)

В Твери на основе расчётно-экспериментальных методов проведены теоретические и экспериментальные исследования несущей способности кузовов вагонов электропоезда нового поколения ЭГ2Тв при воздействии различных нормативных нагрузок. На основании предварительной оценки напряжённо-деформированного состояния отдельные узлы металлоконструкции кузовов были изменены. Результаты прочностных статических испытаний показали, что по основным показателям прочности кузова полностью соответствуют требованиям нормативов и тем самым подтверждается рациональность принятых решений. С учётом положительных результатов испытаний кузова были переданы для дальнейших испытаний, а именно для определения параметров изгибных колебаний.

Ключевые слова: электропоезд ЭГ2Тв, металлоконструкция кузова, прочность, несущая способность, нормативные требования, допускаемые напряжения.

Одной из наших совместных инновационных работ с ОАО «Тверской вагоностроительный завод» стало создание электропоезда ЭГ2Тв модели 62—4496. Основной предпосылкой появления электропоезда нового поколения послужила необходимость повышения экономической эффективности пассажирских перевозок внутригородским рельсовым транспортом и обеспечения современного уровня комфорта для пассажиров.

В состав электропоезда входят вагоны трёх типов: головной модели 62—4497, моторный модели 62—4498 и немоторный (прицепной) модели 62—4499. Схемы формирования поездов определяются заказчиком и могут включать в себя от 5 до 12 вагонов различных типов. В таблице 1 приведены основные технические параметры ЭГ2Тв. При этом принято следующее обозначение моделей вагонов: головной — Г, моторный — М, немоторный (прицепной) — Н. Движение электропоезда осуществляется со скоростями до 120 км/ч на электрифици-



Рис. 1. Электропоезд ЭГ2Тв «Иволга» на полигоне ВНИИЖТ. Фото: С. Д. Коршунов.

Таблица 1

Основные технические параметры электропоезда и вагонов

Наименование параметров	Значение параметров			
	Эл. п. 2Г+3М	Вагонов электропоезда		
		Г	М	Н
Масса тары, не более, т	249,7	48,5	50,9	45,5
Количество мест для сидения, шт.	226	24+2	58	58
Расчётная населённость (при плотности стоящих пассажиров 3 чел./м ²), чел.	836	130	192	192
Максимальная нагрузка от колёсной пары на рельс, не более, тс	—	19	20,5	19
Общая мощность (часовая), кВт	3600	—	1200	—
Длина электропоезда основной составности, м	116	23,8	22,8	22,8
База вагона, м	—	15,0	15,0	15,0
База тележки, м	—	2,6	2,6	2,6
Масса тележки, не более, кг	—	7000	10000	7000
Срок службы, лет	40	40	40	40

цированных участках напряжением 3 кВ постоянного тока.

Общий вид полностью сформированного электропоезда показан на рис. 1.

I.

Несущие металлоконструкции кузовов вагонов электропоезда в целом аналогичны, изготовлены из одинаковых сталей и отличаются лишь отдельными конструктивными узлами, обусловленными назначением вагонов. Кузова вагонов представляют собой цельнометаллическую несущую конструк-

цию типа замкнутой оболочки с вырезами для окон и дверей, плоской наружной обшивкой боковых и торцевых стен, крышей рамной конструкции с плоско-гофрированной обшивкой и вырезами под оборудование, а также полом из гофрированных листов. Несущая оболочка подкреплена продольными и поперечными элементами жёсткости. Рамы кузовов состоят из продольных и поперечных балок (хребтовая балка, обвязка рамы, шкворневые, поперечные балки), на которые устанавливается обшивка пола.



Таблица 2

Механические характеристики и допускаемые напряжения (МПа) для сталей

Класс прочности, марка стали	$\sigma_{\text{в min}}$	$\sigma_{\text{т}}$	I режим	II режим
			[σ]	[σ]
EN10088–2-X6GrNiTi 18–10+2B	370	260	260	175
345Д, 09Г2С/(09Г2СД)	480	345	345/326	220/210

Кабина машиниста головного вагона выполнена в виде отдельного модуля и крепится к несущей конструкции кузова болтовыми соединениями. Стальной каркас кабины имеет ферменную конструкцию, элементы которой представляют собой сварные закрытые профили прямоугольного сечения. Ограждение кабины формируется из пластиковых панелей. Несущие элементы рамы кузова изготовлены из низколегированной стали 09Г2С по ГОСТ 19281, наружная обшивка, каркас кузова – из нержавеющей стали EN10088–2-X6GrNiTi 18–10+2В.

Основные узлы тележек: рама, две колёсные пары, четыре комплекта буксовых подвешиваний, центральное подвешивание, тормоз дисковый, лемнискатный механизм, блоки очистки бандажа (при наличии), оборудование системы гребнесмазывания, кронштейны катушек для монтажа приёмных катушек рельсовых сигналов КП-РС, электромонтаж тележки. Рама является несущим элементом конструкции. Весь комплекс оборудования, обеспечивающий работу тележки, смонтирован в основном на раме или с опорой на неё.

Рессорное подвешивание двухступенчатое – пружинное буксовое и пневматическое центральное. В центральном подвешивании применены две пневматические рессоры, на которые опирается кузов вагона.

Пневморессоры с резинокордными оболочками диафрагменного типа с вибропоглощающими резинометаллическими опорами установлены на опорные поверхности рамы. Применены демпферы гидравлические: вертикальные – для гашения вертикальных колебаний кузова относительно рамы тележки, горизонтальные – для гашения горизонтальных колебаний в поперечном направлении и демпферы виляния – для гашения колебаний виляния тележки.

Колёсные пары выполнены с цельнокатаными колёсами и закреплёнными на

них тормозными дисками, буксовыми узлами с роликовыми подшипниками качения. В буксовом подвешивании применены буксы рычажного типа с резинометаллическими шарнирами для связи колёсной пары с рамой тележки, комплекты цилиндрических винтовых пружин и буксовые демпферы гидравлические – для гашения вертикальных колебаний рамы тележки.

Все кузова вагонов электропоезда имеют большую длину по сравнению с вагонами эксплуатационного парка и уширенные дверные проёмы, повышенную вместимость и дополнительное оборудование для обеспечения современного уровня комфорта. В связи с этим требования к габаритно-весовым параметрам кузовов и их несущей способности приобретают первостепенное значение [1, с. 37; 2, с. 34; 3, с. 204; 4, с. 61].

II.

Рассмотрим для начала расчёт кузова на примере наиболее сложного головного вагона.

В таблице 2 приведены прочностные характеристики и допускаемые напряжения материалов при изготовлении кузовов. В знаменателе указаны расчётные напряжения для хребтовой и шкворневых балок [5, с. 33; 6, с. 10; 7, с. 12; 8, с. 47].

При выполнении расчётов были приняты следующие исходные данные:

Длина кузова по раме – 22,140 м.

База вагона – 15,000 м.

Ширина кузова наружная по обвязке рамы – 3,476 м.

Высота кузова от верха шкворневой балки до верха гофра крыши – 2,925 м.

Конструкционная скорость – 33,3 м/с (120 км/ч).

Коэффициент вертикальной динамики (с учётом влияния боковых сил) – 0,214.

Тара кузова в экипированном состоянии – 36000 кг.

Полезная нагрузка – 19310 кг.

Расчёты на прочность проводились на нагрузки, показанные в таблице 3.

I-й режим — условный режим безопасности. Он учитывает возможность возникновения значительных продольных сил, обусловленных маневровой работой, транспортировкой и аварийными соударениями.

II-й режим — эксплуатационный, учитывает силы, действующие на кузов при разгоне поезда до конструкционной скорости, движении на выбеге или торможении с этой скорости при прохождении кривой.

Для создания расчётной схемы метода конечных элементов (МКЭ) использовался проектно-вычислительный комплекс SCAD [9–10]. Гладкие листы при расчёте моделировались изотропными плоскими элементами, панели гофрированной обшивки — плоскими ортотропными элементами, имеющими приведённую толщину

Таблица 3
Величина основных сил для расчёта на прочность

Расчётные параметры	Расчётные режимы	
	I	II
Продольная сила, МН	-2,5	$\pm 0,4$
Вертикальная статическая нагрузка	брутто кузова	брутто кузова
Вертикальная динамическая нагрузка	не учитывается	K_d * брутто кузова
Боковые силы	не учитывается	12,5 % от брутто кузова

Примечание: знак «+» для силы растяжения, знак «-» для силы сжатия.

($\delta_{пр}$). Приведённые толщины панелей обшивки ($\delta_{пр}$), а также модули упругости и коэффициенты Пуассона вдоль (E_x , ν_x) и поперёк (E_y , ν_y) панелей даны в таблице 4. Для плоских изотропных элементов $E_x = E_y$, $\nu_x = \nu_y$ элементы каркаса моделировались

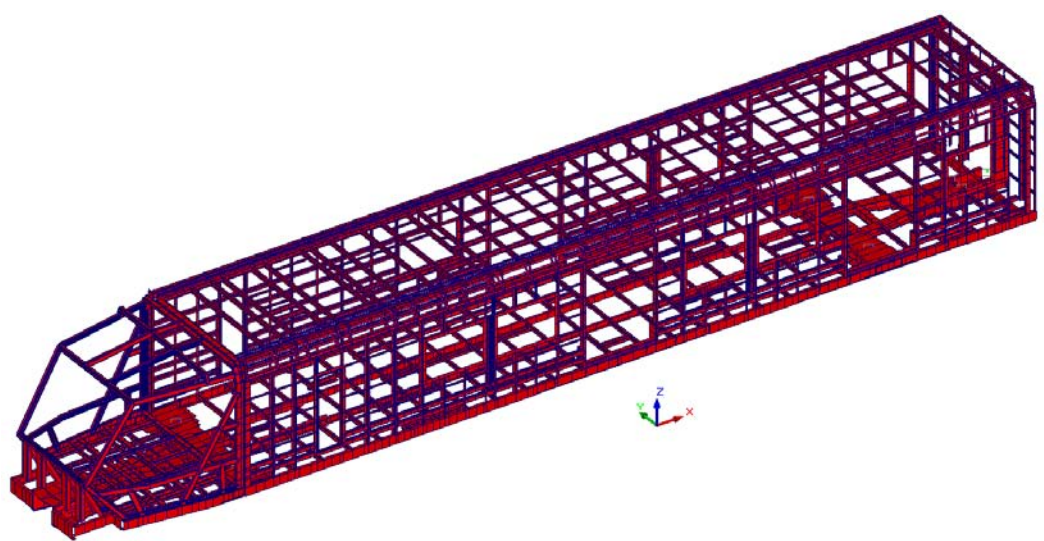


Рис. 2. Расчётная схема МКЭ кузова головного вагона электропоезда (элементы каркаса).

Таблица 4
Приведённые толщины ($\delta_{пр}$), модули упругости и коэффициенты Пуассона (E_x , ν_x , E_y , ν_y) для панелей обшивки кузова

Наименование панели	δ , мм	$\delta_{пр}$, мм	E_x , МПа	ν_x	E_y , МПа	ν_y
Пол гладкий	4,0	4,0	200000	0,3	200000	0,3
Пол гофрированный	1,5	1,55	200000	0,3	479,4	0,00072
Нижний и средний пояса боковой стены	2,0	2,0	200000	0,3	200000	0,3
Верхний пояс боковой стены	2,0+1,0	3,12	200000	0,3	14652	0,022
Крыша гладкая	2,0	2,0	200000	0,3	200000	0,3
Крыша гофрированная	1,5	1,74	200000	0,3	323,0	0,00048
Торцевая стена	2,0	2,0	200000	0,3	200000	0,3



Таблица 5

Значения максимальных расчётных напряжений (σ_x , МПа) в обшивке кузова

Наименование элемента конструкции	σ_x			
	I режим	II реж. (–)	II реж. (+)	при рем. нагрузках
Настил пола в салоне	-235	114	144	94
Настил пола в кабине машиниста	-114	30	61	±25
Боковая стена 1	-202	-118	141	-195
Боковая стена 2	-204	-119	144	-98
Крыша	40	-50	-60	-72
Торцевая стена	36	14	24	-30

Таблица 6

Значения максимальных расчётных нормальных напряжений (σ_x , МПа) в элементах каркаса кузова

Наименование элемента конструкции		Диапазон напряжений по I режиму
хребтовая балка	середина вагона	от -183 до -223
	за дверью машиниста	от -291 до -298
	под окном	от -221 до -269
	консоль за шкворневой балкой	от -225 до -320
	консоль головного конца	от -141 до -256
шкворневая балка	правый конец вагона	от -187 до 214
	головной конец вагона	от -147 до -159
обвязки рамы	в зоне правой двери	от -245 до -252
	в зоне средней двери	от -156 до -175
поперечные балки	100×60×4	от -251 до 169
	100×60×5	от 228 до 264
	80×60×5	от -189 до 234
продольные балки	дверные стойки	от -168 до 230
	обвязка крыши	от 138 до 263
	стрингер крыши	от -145 до -301
	балки кабины	от 120 до 204

стержневыми элементами. При создании расчётной схемы учтено эксцентричное соединение элементов каркаса с обшивкой. Фрагмент расчётной схемы показан на рис. 2. Схема содержит 6650 узлов, 11845 элементов, порядок системы уравнений около 40000 неизвестных.

Закрепление расчётной схемы в пространстве как твёрдого тела при расчёте по режимам обеспечивали четыре вертикальные по оси Z линейные связи в местах установки кузова на пневморессоры, две продольные линейные связи по оси X в месте приложения продольной нагрузки (на одном конце рамы), а также две дополнительные поперечные линейные связи по оси Y по концам кузова.

Вертикальная распределённая нагрузка прикладывалась по площади пола и горизонтальной проекции крыши. Вертикальная нагрузка от оборудования, имеющего

существенную массу, учитывалась отдельно как узловая. Продольные усилия с присоединённым моментом прикладывались к передним (растягивающие) или задним (сжимающие) упорным угольникам.

Результаты расчётов представлены в таблицах 5 и 6, где приведены значения нормальных напряжений для наиболее нагруженных элементов обшивки и каркаса кузова.

Анализ результатов расчётов показал, что кузова головного вагона электропоезда ЭГ2Тв, как и моторного (М) и немоторного (Н) вагонов, по прочности удовлетворяют требованиям [5, с. 179].

III.

Испытания кузовов на прочность при статическом действии нормативных нагрузок проводились в помещении экспериментального цеха института вагоностроения



Рис. 3. Реализация вертикальной нагрузки на металлоконструкцию кузова вагона с помощью пневмооборудования.

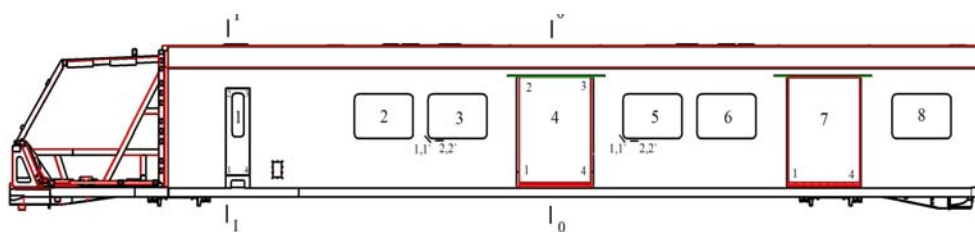


Рис. 4. Схема расположения исследуемых сечений на кузове головного вагона модели 62-4497.

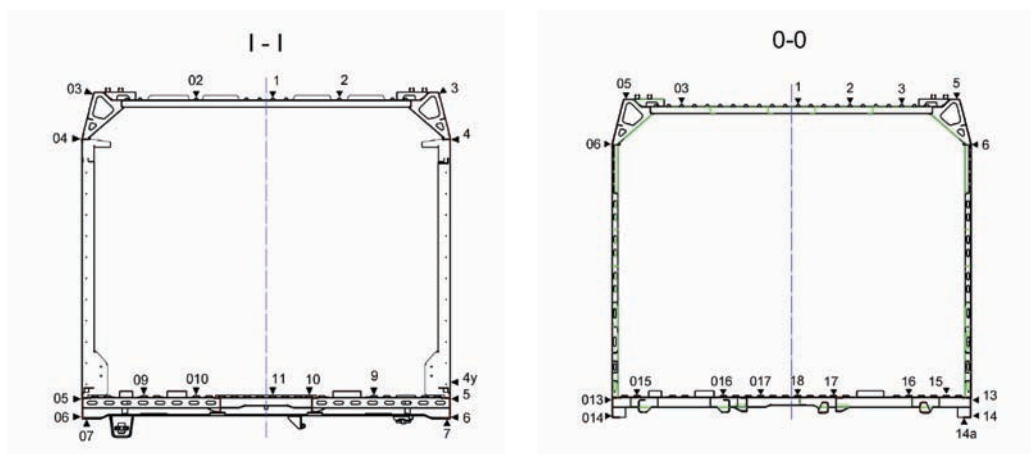


Рис. 5. Схема установки тензодатчиков в сечениях 0-0 и I-I кузова вагона модели 62-4497.



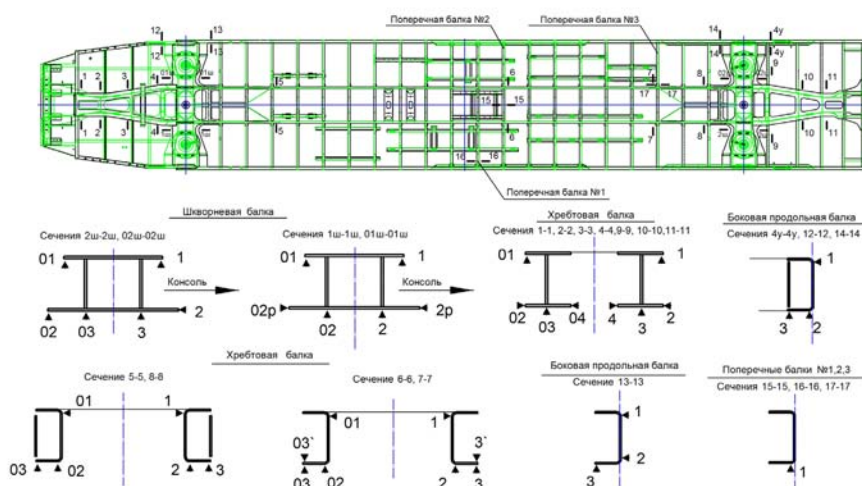


Рис. 6. Схема расположения сечений и установки тензодатчиков на основных несущих элементах кузова головного вагона модели 62-4497.

ния на специальном стенде, оборудованном гидравлической силовой системой с силоизмерительными устройствами и позволяющем создавать продольные (растяжение-сжатие), а также вертикальные и ремонтные нагрузки [11, 12].

Вертикальные нагрузки тара и брутто создавались штатными пневматическими приспособлениями стенда, дискретно распределёнными по полу кузовов вагонов. На рис. 3 показана реализация вертикальной нагрузки на металлоконструкцию моторного вагона с помощью пневмооборудования.

При испытаниях кузова подвергались действию нормативных статических нагрузок, предусмотренных [5, с. 179; 6, с. 10].

Продольные нагрузки:

- сжатие по осям сцепных устройств 1,0 МН;
- сжатие по осям сцепных устройств 2,0 МН;
- растяжение по осям сцепных устройств 1,0 МН.

Вертикальные нагрузки (согласно расчёту на прочность):

- вертикальная нагрузка, имитирующая тару кузова вагона;
- вертикальная нагрузка, имитирующая брутто кузова вагона.

Нагрузки, возникающие при ремонте:

- подъёмка порожнего кузова под концы шкворневой балки;
- подъёмка гружёного кузова под концы шкворневой балки;

- подъёмка порожнего кузова под концы шкворневых балок на трёх домкратах;
- подъёмка порожнего кузова под концы шкворневых балок по диагонали;
- аварийная подъёмка порожнего кузова под сцепное устройство с имитацией массы моторной тележки 10 т.

Схемы расположения сечений и расстановки тензодатчиков на кузове головного вагона показаны на рис. 4–6. Для других моделей вагонов они принципиально не отличаются.

Полученные экспериментальные данные при испытаниях металлоконструкции кузова головного вагона показали, что определяющей нагрузкой с точки зрения прочности является сжатие по осям сцепных устройств, а основным нагруженным узлом — рама кузова. При этом основная часть продольных нагрузок воспринимается хребтовой и шкворневыми балками. Наибольшие значения напряжений зарегистрированы в зонах соединений хребтовой и шкворневой балок, где они достигли 331 МПа в хвостовой части кузова, и несколько ниже в головной части, что связано с передачей части нагрузки балками каркаса кабины машиниста на несущие элементы кузова. По этой же причине напряжения в шкворневой балке головного конца кузова ниже, чем в шкворневой балке хвостового конца, где их величина не превышала 187 МПа. Распределение напряжений по сечениям хребтовой балки характерно для

Значения максимальных напряжений в элементах конструкции кузовов головного и моторного вагонов (доработанная конструкция)

Элемент конструкции	Допускаемые напряжения по I расчётному режиму, МПа	Максимальные экспериментальные напряжения на кузове головного вагона, МПа	Максимальные экспериментальные напряжения на кузове моторного вагона, МПа
Крыша	260	28	35
Дверной проём	260	130	76
Рама вагона. Балка хребтовая	345	331	301
Рама вагона. Балка шкворневая	345	271	244
Рама вагона. Боковая балка рамы	345	238	220
Рама вагона. Поперечная балка рамы	345	128	213

изгиба в горизонтальной плоскости и связано с изменением её геометрии в плане [13–15].

Боковые продольные балки воспринимают значительную долю продольных нагрузок, но имеют выраженную неравномерность распределения напряжений по сечениям, обусловленную дверными вырезами в боковинах и, как следствие, значительными изменениями геометрических характеристик несущих элементов кузова. Так, напряжения в зонах стыка продольных балок со шкворневыми почти в два раза выше, чем в средней части кузова. Действие других испытательных нагрузок (вертикальной, ремонтных и аварийных подъёмов) вызывает напряжения порядка 100–110 МПа лишь в отдельных точках конструкции. Средний же их уровень находится в пределах 30–60 МПа.

Из результатов предварительных испытаний моторного вагона следует, что наиболее напряжённым элементом конструкции является хребтовая балка в сечениях 3–3 и 5–5, где при первом расчётном режиме напряжения вплотную приближались к допускаемым. Нагрузкой, определяющей напряжённое состояние этих зон, становится сжимающая нагрузка по осям сцепных устройств 2,0 МН. Она привела к незначительной деформации упорной плиты сцепного устройства. Менее нагруженной показала себя шкворневая балка, в сечениях которой отсутствуют напряжения, превышающие допускаемые. Наибольшие значения зафиксированы на радиусах перехода нижнего листа и по кромкам верхнего листа в сечениях Iш–Iш и 0Iш–0Iш. В остальных элементах шкворневой балки напряжения

не превышают 100 МПа, и можно предположить излишний запас прочности для режима I.

Достаточно высокая жёсткость шкворневой балки позволяет передавать значительные нагрузки на боковые балки рамы, что определяет их оптимальную нагруженность в шкворневом сечении I–I. В углах оконных вырезов срединные значения напряжений находятся в пределах 70–80 МПа, такой же уровень отмечен в углах дверного выреза, оконных стойках, стрингерах, простенках. Действие ремонтных нагрузок не вызывает существенных изменений в напряжённом состоянии несущих элементов по сравнению с действием вертикальной нагрузки брутто. Исключение составляют углы оконных и дверных вырезов, но и в этих зонах уровень срединных напряжений не превышает 70–80 МПа. При подъёмке порожнего кузова массой тара двумя домкратами по диагонали наблюдалась местная упругая деформация обшивки кузова в зоне установки домкратов.

Экспертиза результатов статических испытаний в зонах максимальных напряжений показала, что это относится к нижним полкам продольных элементов хребтовой балки. Так, по сечению хребтовой балки 3–3 (см. рис. 6), расположенному в консольной части рамы, величина максимальных напряжений лежит в пределах от 315 до 332 МПа (точки 4 и 04). По сечению хребтовой балки 5–5, расположенному в её средней части и незначительно удалённому от шкворневой балки, величина максимальных суммарных напряжений несколько выше (точки 3 и 03 на рис. 6).





Для снижения уровня суммарных напряжений были предложены конструктивные решения, направленные на совершенствование этих зон:

- увеличение толщины упорной плиты сцепного устройства с 40 до 60 мм;
- увеличение толщины нижних пластин продольных элементов консольных частей хребтовой балки с 10 до 12 мм;
- приварка вдоль оси вагона между шкворневой балкой и поперечной балкой № 1 продольного элемента, состоящего из двух гнутых швеллеров высотой 80 мм и толщиной 5 мм, сваренных между собой по вертикали (образуют составной двутавр);
- на участке от поперечной балки № 1 до следующей поперечной балки (к середине вагона) вварка двух косынок размером 550 x 350 x 6 мм с отогнутой кромкой высотой 40 мм.

Эти усиления были реализованы на всех головных, моторных и немоторных вагонах двух первых составов электропоезда ЭГ2Тв. Повторные контрольные испытания подтвердили рациональность принятых решений.

В таблице 7 приведены обобщённые данные прочностных статических испытаний доработанной конструкции.

ВЫВОДЫ

1. По результатам расчётно-экспериментальных исследований выполнена оценка несущей способности кузовов вагонов электропоезда нового поколения ЭГ2Тв.

2. Установлено, что в отдельных узлах и зонах рамы кузовов нормальные напряжения вплотную приближаются к допускаемым уровням по первому режиму нагружения уровни [5]. К ним относятся:

- упорная плита сцепного устройства;
- продольные элементы консольных частей хребтовой балки;
- зона соединения продольных элементов хребтовой балки с поперечными балками рамы за шкворневой балкой к середине вагона.

3. Проведённая доработка рамы на всех моделях вагонов электропоезда

ЭГ2Тв, направленная на оптимизацию металлоконструкции кузовов, позволила снизить уровень суммарных напряжений, которые при воздействии нормативных нагрузок не превышали допускаемых значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Русанов О. А., Панкратов И. Г., Шур Я. И. Обеспечение нормативных значений частоты изгибных колебаний кузовов вагонов электропоездов // Вестник ВНИИЖТ. — 2005. — № 5. — С. 36–39.
2. Гучинский Р. В., Петин С. В. Учёт жесткости оборудования при проектировании кузовов вагонов электропоездов // Вестник РГУПС. — 2018. — № 1. — С. 32–39.
3. Чурков Н. А., Соколов М. М., Морчиладзе И. Г. Вагоны железных дорог. — М.: МБА, 2015. — 392 с.
4. Соколов М. М., Третьяков А. В., Морчиладзе И. Г. Контроль динамики железнодорожного подвижного состава. — М.: ИБС—Холдинг, 2007. — 358 с.
5. Нормы для расчёта и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств экипажной части мотор-вагонного подвижного состава железных дорог МПС колеи 1520 мм. — М.: ВНИИВ — ВНИИЖТ, 1997. — 147 с.
6. ГОСТ 33796-2016. Мотор-вагонный подвижной состав. Требования к прочности и динамическим качествам. — М.: Стандартиформ, 2016. — 43 с.
7. ГОСТ Р 55434-2013. Электропоезда. Общие технические требования. — М.: Стандартиформ, 2013. — 38 с.
8. ТР ТС 001/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава». — Минск: Бел. ГИСС, 2012. — 46 с.
9. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчётные модели сооружений и возможность их анализа. — Киев: Сталь, 2002. — 600 с.
10. Бруякин И. В. Совершенствование технологии автоматизированного расчёта кузовов железнодорожных вагонов // Автоматизация и современные технологии. — 1995. — № 12. — С. 13–16.
11. Коршунов С. Д., Скачков А. Н., Самошкин С. Л., Гончаров Д. И., Жуков А. С. Методика расчётно-экспериментальных исследований кузовов современного подвижного состава // Известия ПГУПС. — 2015. — № 4. — С. 38–47.
12. Коршунов С. Д., Самошкин С. Л. Современные методы испытаний железнодорожного подвижного состава, прошедшего ремонты различных объёмов и вновь построенного // Вагонный парк. — 2012. — № 3. — С. 15–18.
13. Коршунов С. Д., Смирнов А. А., Щеглов А. С. и др. Прочностные статические испытания и оценка прочности металлоконструкции кузова вагона электропоезда нового поколения // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: Материалы XIII международной научно-техн. конференции. — СПб.: ПГУПС, 2018. — С. 90–95.
14. Гурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. — М.: Высшая школа, 1999. — 479 с.
15. Тензометрия в машиностроении: Справочное пособие / Под ред. Р. А. Макарова. — М.: Машиностроение, 1975. — 288 с.

Координаты авторов: **Скачков А. Н.** — +7(4822) 55–54–32, **Самошкин С. Л.** — +7 (4822) 79–40–33, **Коршунов С. Д.** — +7(4822) 55–93–07.

Статья поступила в редакцию 24.10.2018, принята к публикации 07.12.2018.