

## УДК 629.4

Е. П. БЛОХИН, д.т.н., профессор, ДИИТ (Украина);  
С. А. КОСТРИЦА, к.т.н., доцент, ДИИТ (Украина);  
А. В. СУЛТАН, к.т.н., доцент, ДИИТ (Украина);  
Е. М. ДЗИЧКОВСКИЙ, ст.н.с., ДИИТ (Украина);  
А. Е. КРИВЧИКОВ, ст.н.с., ДИИТ (Украина);  
И. П. ЛАУШНИК, к.ф.-м.н., доцент, ДИИТ (Украина)

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОВОЗА 2ЕЛ5

У статті наведені результати міцнісних випробувань електровоза 2ЕЛ5.

В статье приведены результаты прочностных испытаний электровоза 2ЕЛ5.

In the paper the results of strength tests of electric locomotive 2EL5 are presented.

Отраслевая научно-исследовательская лаборатория динамики и прочности подвижного состава (ОНИЛ ДППС) Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (ДНУЖТ) провела в октябре 2008г. на заводских путях ОАО «ХК «Лугансктепловоз» ударные, а в ноябре 2008г. на участках Одесса – Котовск - Вапнярка Одесской ж.д. - ходовые прочностные приемочные испытания электровоза 2ЕЛ5-008.

Основной целью разработки нового электровоза являлось создание в Украине грузовых

электровозов нового поколения с улучшенными эксплуатационными качествами для замены грузовых электровозов ВЛ80 всех модификаций, которые выработали свой ресурс.

Схема размещения тензорезисторов на несущих элементах конструкции электровоза 2ЕЛ5-008, которая была разработана на основании результатов статических стендовых испытаний, проведенных испытательным центром «ТРАНССЕРТ» в ОАО «ХК «Лугансктепловоз», приведена на рис. 1 и 2.

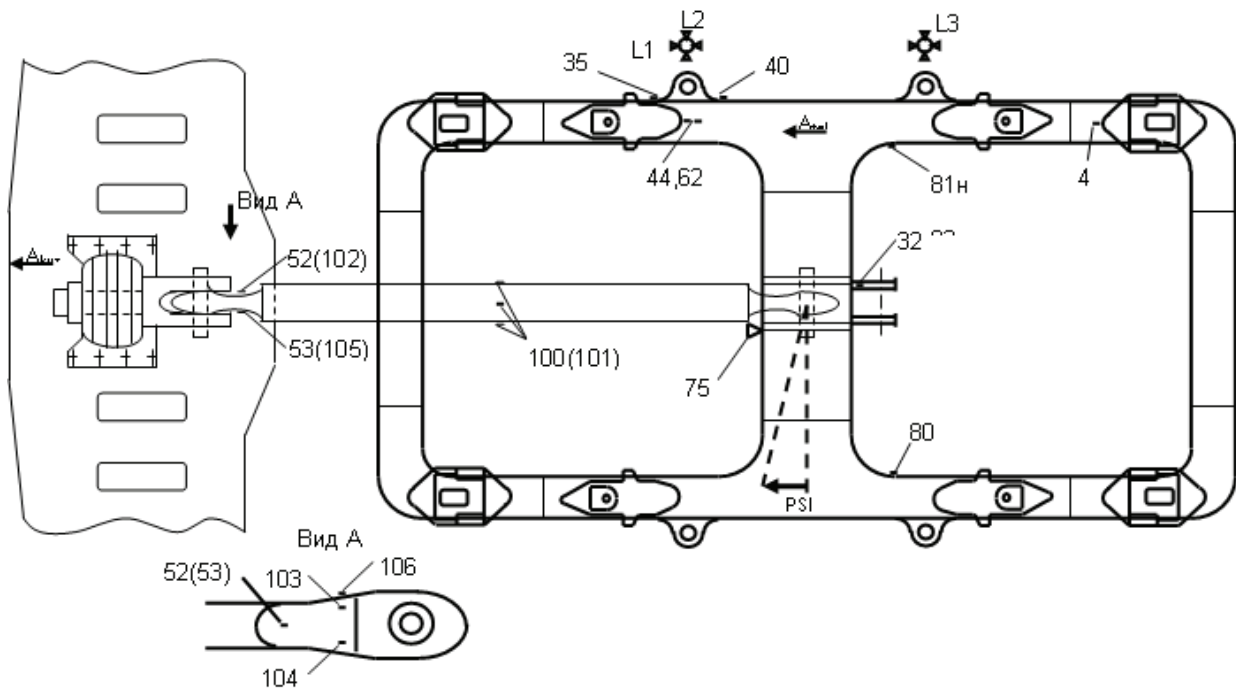


Рис. 1. Схема размещения тензорезисторов на раме тележки, тягах люльчатого подвешивания и наклонных тягах электровоза 2ЕЛ5

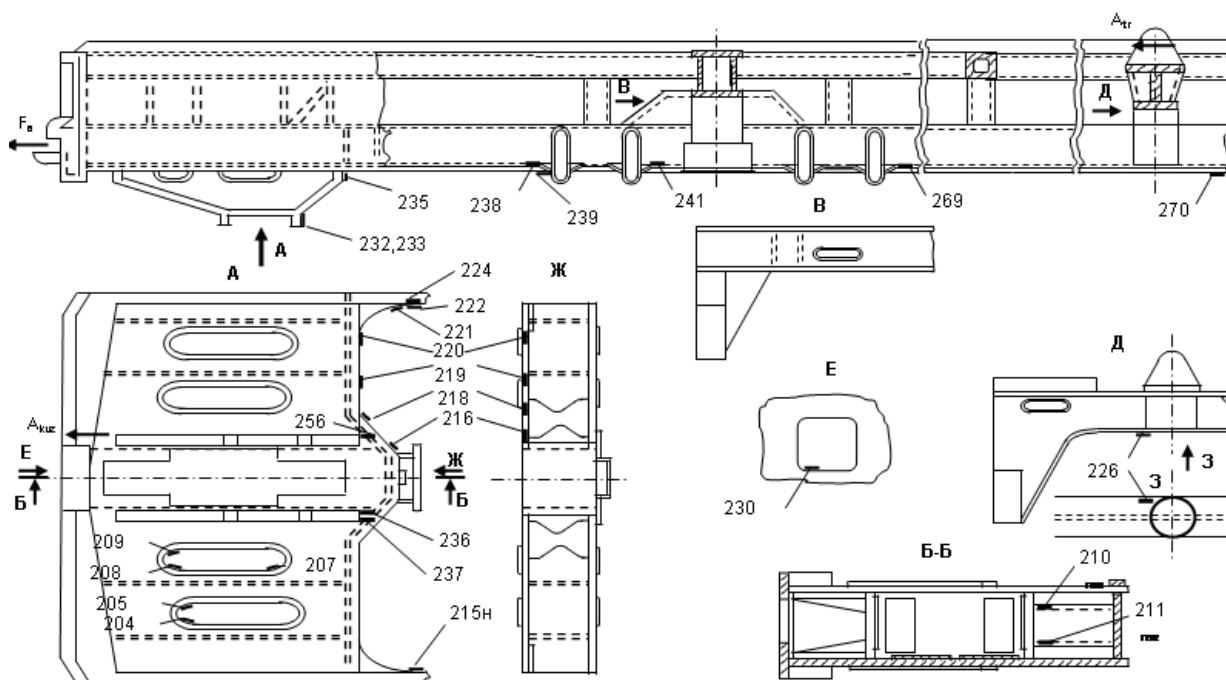


Рис. 2. Схема размещения тензорезисторов на раме кузова электровоза 2ЕЛ5

На схемах приняты следующие обозначения:

1...270 – напряжения (МПа) в несущих элементах конструкции электровоза;

L1, L2, L3 – напряжения (МПа) в тягах люльечного подвешивания, вызванные соответственно изгибающими моментами  $M_y$ ,  $M_z$  и продольной силой  $N_x$  относительно местной системы координат тяг;

$A_{kuz}$ ,  $A_{tel}$ ,  $A_{tr}$  – ускорения ( $м/с^2$ ) соответственно на буферном бруске кузова электровоза в районе автосцепки, посередине боковины рамы тележки и на поперечной трансформаторной балке рамы кузова;

$F_a$  – сила (кН) в тензометрической автосцепке, которой была серийная автосцепка перед проведением испытаний.

PSI – угол поворота первой тележки относительно кузова, определяемый по величине продольного перемещения боковин рам тележки относительно кузова.

Скорость  $V$  (км/ч), определялась при проведении:

– ходовых прочностных испытаний при помощи GPS навигатора, который устанавливался в вагоне-лаборатории ДИИТа;

– испытаний на соударения при помощи контактных педалей и электронного секундомера.

### Результаты ходовых прочностных испытаний

Опытный сцеп состоял из электровоза 2ЕЛ5-008, вагона – лаборатории № 04572046 и электровоза-эталона ВЛ80С-2534.

Ходовые прочностные испытания электровоза 2ЕЛ5-008 проводились в два этапа.

На первом этапе напряжения в несущих элементах конструкции определялись на выбеге и при малых значениях сил тяги и торможения. На этом этапе в составе опытного сцепа электровоз ВЛ80С двигался в режиме выбега при движении в хвосте сцепа и в режиме тяги при движении в голове.

На втором этапе определялись динамические напряжения в элементах конструкции электровоза 2ЕЛ5-008 при больших значениях силы тяги, которые имеют место во время ведения грузовых поездов в часовом или продолжительном режимах работы электровоза 2ЕЛ5 или при рекуперации. На этом этапе силу сопротивления поезда создавал электровоз ВЛ80С в режиме реостатного торможения при движении в хвосте сцепа или в режиме тяги при движении в голове.

В процессе испытаний движение опытного сцепа осуществлялось на опытных участках пути со следующими скоростями:

- по прямым участкам пути и кривым большого радиуса ( $R > 850 м$ ) – до 120 км/ч;
- по кривым среднего радиуса

(400 м < R < 650 м) – до скорости 110 км/ч;

- по кривым малого радиуса (R < 400 м) – до скорости 50 км/ч;

- по стрелочным переводам на боковой путь марки 1/9 и 1/11 – до 25 и 40 км/ч соответственно.

Анализ осциллограмм, записанных во время опытов, показал:

- при трогании электровоза с места имеют место высокие напряжения в несущих элементах рамы тележки. В частности при силе в автосцепке 420 кН в тензоточке 32 (кронштейн тягового двигателя на центральной поперечной балке рамы тележки) напряжения достигают 40 МПа, в тензоточках 80 и 81 (закругления между боковинами и центральной балкой рамы тележки) – 28 МПа, а в тензоточках 75 и 232 (кронштейны крепления наклонной тяги к центральной балке рамы тележки и к буферному брусу рамы кузова) по 30 МПа. В наклонной тяге (тензоточка 53) напряжения составили 22 МПа;

- при движении по стрелкам на боковой путь, по кривым малого и среднего радиуса и по прямым участкам пути из всех тензоточек, расположенных на раме тележки, точки 80 и 81 наиболее чувствительны к динамическим нагрузкам;

- в тягах люлечного подвешивания имеют место значительные изгибные напряжения (тензоточки L1 и L2), которые по величине превышают растягивающие напряжения (тензоточка L3), что говорит о наличии значительных сил трения в шарнирах люлечного крепления и может отрицательно сказаться на их долговечности. Динамические добавки напряжений в тягах люлечного подвешивания мало зависят от скорости движения электровоза;

- динамические добавки напряжений в раме кузова при движении по прямым участкам пути на выбеге не превышают 10 МПа.

Прочность тяг люлечного подвешивания, а также несущих элементов рам кузова и тележек оценивалась по коэффициенту запаса усталостной прочности  $n_v$ , который определялся по формуле, согласно [2]:

$$n_v = \frac{\sigma_{-1}}{\psi \sigma_m + k_\sigma \sigma_v} \geq [n];$$

где  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости стандартного образца при симметричном цикле нагружения на изгиб;  $k_\sigma$  – эффективный коэффициент, учитывающий понижение предела выносливости конструкции по отношению к пределу выносливости стандартного образца;  $\sigma_m$  – среднее

напряжение цикла;  $\psi$  – коэффициент, учитывающий чувствительность металла к асимметрии цикла (при  $\sigma_m > 0$   $\psi = 0.3$ , при  $\sigma_m < 0$   $\psi = 0$ );

$\sigma_v$  – амплитуда динамических напряжений;  $[n]$  – допускаемый коэффициент запаса сопротивления усталости. Согласно [1], для несущих элементов экипажной части  $[n] = 2$ .

Коэффициент  $k_\sigma$  определялся из соотношения:

$$k_\sigma = \beta_k \frac{k_1 k_2}{\gamma m},$$

где  $\beta_k$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений в узлах сложного очертания, концентрация напряжений в которых определяется только их геометрией. Так как, все тензодатчики были установлены непосредственно в зоне концентрации напряжений, то коэффициент  $\beta_k$  для всех тензоточек принимался равным 1;  $k_1$  – коэффициент, учитывающий неоднородность материала детали. Для проката  $k_1$  принимался равным 1.1, для литья – 1.3;  $k_2$  – коэффициент, учитывающий влияние внутренних напряжений в детали, величина его зависит от поперечных размеров детали;  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий размеры детали;  $m$  – коэффициент, учитывающий состояние поверхности детали. Для проката  $m = 0.8$ , для чистой станочной обработки  $m = 0.9$ , для стального литья  $m = 0.75$ .

Величина среднего напряжения цикла определялась из соотношения:

$$\sigma_m = \sigma_{cm} + \sigma_f + \sigma_{кр},$$

где  $\sigma_{cm}$  – напряжения, возникающие от действия вертикальных статических нагрузок;  $\sigma_f$  – напряжения, возникающие от действия сил тяги или торможения, при движении экипажа со скоростью  $V$ ;  $\sigma_{кр}$  – значения напряжений, возникающие при движении по кривым участкам пути.

Коэффициенты запаса усталостной прочности  $n_v$  для наиболее нагруженных элементов конструкции экипажной части, а также величины, необходимые для их определения, приведены в табл. 1.

Из приведенных результатов видно, что во всех точках значение коэффициента запаса усталостной прочности не меньше нормативного значения 2.

**Коэффициенты запаса усталостной прочности несущих элементов конструкции электровоза 2ЕЛ5**

Элемент конструкции	V, км/ч	$\sigma_{ст}$ , МПа	$\sigma_б$ , МПа	$\sigma_{кр}$ , МПа	$\sigma_m$ , МПа	$\sigma_v$ , МПа	$n_v$
Рама тележки	21...40	41,5	28,2	12,4	82,1	12,8	3,2
	41...60	41,5	28,2	13,0	82,7	14,7	2,9
	61...80	41,5	28,2	11,9	81,6	15,1	2,9
	81...100	41,5	28,2	16,8	86,5	18,3	2,5
	101...120	41,5	28,2	16,9	86,6	13,2	3,1
Наклонная тяга	21...40	0	16,7	3,2	19,9	2,5	12,9
	41...60	0	16,7	2,2	18,9	4,2	9,9
	61...80	0	16,7	3,2	19,9	3,9	10,1
	81...100	0	16,7	2,8	19,5	5,5	8,1
	101...120	0	16,7	1,3	18,0	8,2	6,2
Рам а кузова	21...40	0	30	4,2	34,2	5,5	6,9
	41...60	0	30	2,9	32,9	6,1	6,5
	61...80	0	30	3,6	33,6	6,4	6,3
	81...100	0	30	3,5	33,5	10,5	4,3
	101...120	0	30	2,5	32,5	13,8	3,5
Тяги люлечного подвешивания	21...40	35,2	5	4,7	44,9	25,2	5,5
	41...60	35,2	5	3,6	43,8	29,4	5,0
	61...80	35,2	5	5,1	45,3	33,9	4,4
	81...100	35,2	5	5,8	46,0	35,5	4,2
	101...120	35,2	5	6,2	46,4	28,9	5,0

**Примечание.** Ввиду того, что напряжения в тягах люлечного подвешивания измерялись посредством измерительных схем (изгибной в точках L1 и L2, растяжения-сжатия в точке L3), поэтому напряжения  $\sigma_{кр}$ ,  $\sigma_v$  в таблице 1 вычислялись как суммарные по формуле:  $L123 = \sqrt{L1^2 + L2^2} + L3$ .

Из приведенных результатов видно, что минимальные значения коэффициента запаса усталостной прочности  $n_v$  для несущих элементов конструкции экипажной части электровоза 2ЕЛ5 оказались равными:

- рама тележки 2,5;
- рама кузова 3,5;
- наклонная тяга 6,2;
- люлечная тяга 4,2.

**Результаты испытаний на соударения**

Во время опытов на соударения испытываемая секция электровоза 2ЕЛ5 с маневровым локомотивом (опытный сцеп) находилась на одном пути с заторможенным сцепом-стенкой из 10 грузовых вагонов общей массой около 800 т, на который в режиме выбега накатывался опытный сцеп. На соседнем пути находилась вагон-лаборатория с измерительной аппаратурой.

Испытания на соударения проводились в два этапа. На первом этапе испытаний к изме-

рительной аппаратуре были подключены тензоточки, расположенные на раме кузова электровоза (204...236 см. рис. 2), и датчики ускорений. На этом этапе было произведено 7 соударений со скоростями подхода опытного сцепа от 1,5 км/ч до 4,7 км/ч. Перед вторым этапом был проведен экспресс-анализ полученных результатов, в результате которого менее чувствительные точки (212, 213, 217, 220, 225, 227, 237) были заменены на тензоточки (101, 102, 103, 104, 105, 106 см. рис. 1), расположенные на наклонной тяге. На втором этапе испытаний было произведено 18 соударений и реализованы скорости соударения опытного сцепа от 4,5 до 7,2 км/ч. При скорости соударения 7,2 км/ч сила в автосцепке составила 1610 кН.

Результаты линейной экстраполяции опытных данных на нормативную для грузовых локомотивов силу 2500 кН, согласно [1], приведены в табл. 2.

**Напряжения (МПа) и ускорения ( $m/c^2$ ) в элементах конструкции электровоза 2ЕЛ5 при действии нормативной продольной силы 2500 кН**

Датчик	$A_{kuz}$	$A_{tel}$	$A_{tr}$	101	102	105	204	205	207
Значение	34	29	31	-165	-190	-205	-130	310	260
Датчик	208	209	210	211	214	215	216	218	219
Значение	-190	150	-150	-80	-160	-155	200	130	85
Датчик	221	222	224	226	230	232	233	235	236
Значение	-195	-160	-190	95	-115	180	245	120	33

Как видно из табл. 2, максимальное напряжение 310 МПа, полученное в тензоточке 205 на обечайке овального отверстия ближнего к стяжному ящику (см. рис. 2), не превышает допустимого значения. Согласно [1], для стали 09Г2С, из которой изготовлен буферный брус электровоза 2ЕЛ5, допустимое напряжение равно  $[\sigma] = 0,95\sigma_T = 0,95 \times 345 = 328$  МПа.

В трубе наклонной тяги, которая изготовлена из стали 10В, расчетное напряжение (см. точку 101 на рис. 1 и в табл. 2), соответствующее силе в автосцепке 2500 кН, составило 165 МПа, что ниже допустимого  $0,9\sigma_T = 0,9 \times 205 = 185$  МПа.

В литой головке наклонной тяги (сталь 20Л) максимальное напряжение, экстраполированное по экспериментальным данным на силу в автосцепке 2500 кН, составило 205 МПа (см. точку 105 на рис. 1 и в табл. 2), что превышает допустимую величину  $0,9\sigma_T = 0,9 \times 216 = 195$  МПа. Прочность литой детали можно обеспечить, изготовив её из стали 25Л, для которой предел текучести равен  $\sigma_T = 235$  МПа, что позволит повысить допустимое напряжение головки наклонной тяги до  $0,9\sigma_T = 0,9 \times 235 = 212$  МПа.

Следует обратить внимание, что электровозы 2ЕЛ5 является аналогом российских электровозов 2ЭС5К «Ермак», которые эксплуати-

руются в настоящее время на Южной железной дороге (локомотивное депо ст. Котовск).

За время эксплуатации электровозов 2ЭС5К на путях «Укрзалізниця» неоднократно наблюдались усталостные трещины на кронштейнах крепления наклонной тяги к буферному брусу. Поэтому, несмотря на положительные результаты испытаний электровоза, в отношении кронштейна крепления наклонной тяги, было принято решение о проведении теоретического расчета его на прочность, результаты которого приведены в [2].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. НОРМЫ для расчёта и оценки несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм [Текст] / ВНИИЖТ. – М., 1998.
2. Султан, А. Исследование напряжённо-деформированного состояния кронштейна крепления наклонной тяги к буферному брусу электровоза 2ЕЛ5 [Текст] / А. Султан, Б. Товт. – ДИИТ, 2009.

Поступила в редколлегию 27.07.2009