

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.023.11

doi: 10.30987/2782-5957-2024-7-61-70

ПРОЧНОСТЬ РАМЫ ПОД СИЛОВУЮ УСТАНОВКУ И ГИДРОПЕРЕДАЧУ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА ТИПА ДР1Б

Павел Михайлович Афанаськов^{1✉}, Леонид Викторович Огородников², Виктор Владимирович Белогуб³, Артур Владимирович Путятю⁴, Кирилл Сергеевич Щербатый⁵, Павел Михайлович Буйленков⁶

^{1,2,3} Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь

⁴ Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Гомель, Республика Беларусь

⁵ Мотор-вагонное депо Минск, Минск, Республика Беларусь

⁶ Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, Москва, Российская Федерация

¹ pavel.afanaskou@gmail.com

² ogorodnikov.l.v@mail.ru

³ belogub69@mail.ru

⁴ putsyata.artur@gmail.com

⁵ kirillsher65@gmail.com

⁶ pavbuy@mail.ru

Аннотация

Проведена проверка соответствия нормативным требованиям модернизируемой части дизель-поезда. В качестве объекта исследования выступает измененная конструкция рамы под новую силовую установку и гидropередачу дизель-поезда типа ДР1Б. Сконструирована рама под новую силовую установку, представлен сравнительный анализ оригинальной конструкции рамы с измененной, а также описаны их конструкционные различия. Описаны нормативные режимы нагружения и представлены нагружающие факторы для проведения оценки прочности исследуемой конструкции рамы. Раз-

работана конечно-элементная модель измененной конструкции рамы под силовую установку, проанализировано ее напряженно-деформированное состояние, на основании которого разработана схема установки тензорезисторов. Представлены результаты натурных испытаний на соударение и ходовых прочностных испытаний дизель-поезда с измененной конструкцией рамы. Выполнена расчетно-экспериментальная оценка коэффициента запаса сопротивления усталости.

Ключевые слова: прочность, дизель-поезд, моделирование, конструкция.

Ссылка для цитирования:

Афанаськов П.М. Прочность рамы под силовую установку и гидropередачу дизель-поезда типа ДР1Б / П. М. Афанаськов, Л. В. Огородников, В.В. Белогуб, А.В. Путятю, К.С. Щербатый, П.М. Буйленков // Транспортное машиностроение. – 2024. - № 7. – С. 61-70. doi: 10.30987/2782-5957-2024-7-61-70.

Original article

Open Access Article

THE FRAME STRENGTH FOR THE POWER PLANT AND HYDRAULIC TRANSMISSION OF DR1B DIESEL TRAIN TYPE

Pavel Mikhailovich Afanaskov^{1✉}, Leonid Viktorovich Ogorodnikov², Viktor Vladimirovich Belogub³, Artur Vladimirovich Putyato⁴, Kirill Sergeevich Shcherbaty⁵, Pavel Mikhailovich Buylenkov⁶

^{1,2,3} Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

⁴ Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Republic of Belarus

⁵ Minsk Motor Car Depot, Minsk, Republic of Belarus

⁶ Railway Research Institute of JSC Russian Railways, Moscow, Russian Federation

¹ pavel.afanaskou@gmail.com

² ogorodnikov.l.v@mail.ru

³ belogub69@mail.ru

⁴ putsyata.artur@gmail.com

⁵ kirillsher65@gmail.com

⁶ pavbuy@mail.ru

Abstract

Compliance with the regulatory requirements of the upgraded part of a diesel train is checked. The object of the study is a modified frame design for a new power plant and hydraulic transmission of DR1B diesel train type. The frame is designed for a new power plant, a comparative analysis of the original frame design with the modified one is presented, as well as their structural differences are described. The normative loading modes are described and the loading factors for assessing the strength of the frame structure under study are presented. A finite element model of the

modified frame structure for the power plant is developed, its stress-strain state is analyzed, and on its basis a scheme for installing resistance strain gages is developed. The results of full-scale impact tests and running strength tests of a diesel train with a modified frame design are presented. A calculated and experimental assessment of the fatigue resistance reserve coefficient is performed.

Keywords: strength, diesel train, modeling, construction.

Reference for citing:

Afanaskov PM, Ogorodnikov LV, Belogub VV, Putyato AV, Shcherbaty KS, Buylenkov PM. The frame strength for the power plant and hydraulic transmission of DR1B diesel train type. *Transport Engineering*. 2024;7:61-70. doi: 10.30987/2782-5957-2024-7-61-70.

Введение

Дизель-поезда типа ДР1Б (рис. 1) являются продолжением серии ДР1 с некоторыми доработками. Данная серия была разработана Рижским вагоностроительным заводом специально по заказу Белорусской железной дороги. Первые дизель-поезда типа ДР1Б поступили в депо Гомель в 2006 году и были предназначены для межрегионального сообщения в пределах Республики Беларусь на железных дорогах колеи 1520 мм. Дизель-поезда были поставлены в 6-вагонной составности: два моторных вагона и четыре прицепных вагона. Моторные вагоны оснащены силовым агрегатом М756, это дизельный V-образный, 12

цилиндровый двигатель, разработанный в 1950-х годах [1-2].

На сегодняшний день существуют сложности с обслуживанием данных силовых агрегатов, ввиду того, что они выработали свой ресурс и зачастую нуждаются в замене [3]. В условиях замены силового агрегата, правильным решением является выбор современного более технологичного дизеля с улучшенными техническими характеристиками. Способ крепления новой силовой установки, зачастую, отличается и требует модернизации конструкции рамы, на которой закреплен дизель и гидropередача.



Рис. 1. Общий вид дизель-поезда типа ДР1Б
Fig. 1. General view of diesel train type DR1B

При модернизации подвижного состава важным является анализ напряженно-деформированного состояния эксплуатируемого подвижного состава, поэтому рамы, кузова и их тонкостенные элементы рассчитываются на прочность в соответствии с нормативными требованиями [4]. Критерием соответствия конструкции является недопущение превышения напряжений (от нагрузок, которым они могут подвергаться в процессе эксплуатации), полученных расчетным путем и в результате проведения испытаний (методом тензометрирования), допускаемых значений, а также обеспечение безопасной эксплуатации в течение всего срока службы [5].

Конструкция рамы под силовую установку М756 и гидропередачу дизель-поезда типа ДР1Б имеет сварную конструкцию, выполненную из сварных балок преимущественно коробчатого сечения. Состоит из двух частей с перепадом по высоте в месте их соединения. На более широкую часть (рис. 2а) устанавливается гидропередача ГДП-1000. На более узкой ча-

сти по всей длине закреплен силовой агрегат М756. Материал, из которого изготовлена рама – сталь Ст3 [6].

Изменениям подверглась часть рамы, на которой размещен новый силовой агрегат, он имеет иную систему крепления к раме – закреплен на четырех демпфирующих подушках. Измененная часть рамы изготавливается из прямоугольных профильных труб прямоугольного сечения 180x100 с толщиной стенки 8 мм по [7]. Одно из основных отличий в геометрии рамы – отсутствует перепад по высоте в месте соединения двух частей рамы. Материал измененной части рамы – Сталь 20 [8] по механическим свойствам близок к стали Ст3. На рис. 2б представлен вид измененной конструкции рамы под новый силовой агрегат.

Стоит отметить то, что места крепления новой рамы под силовую установку и гидропередачу к главной раме кузова головного вагона дизель-поезда типа ДР1Б сохранены.

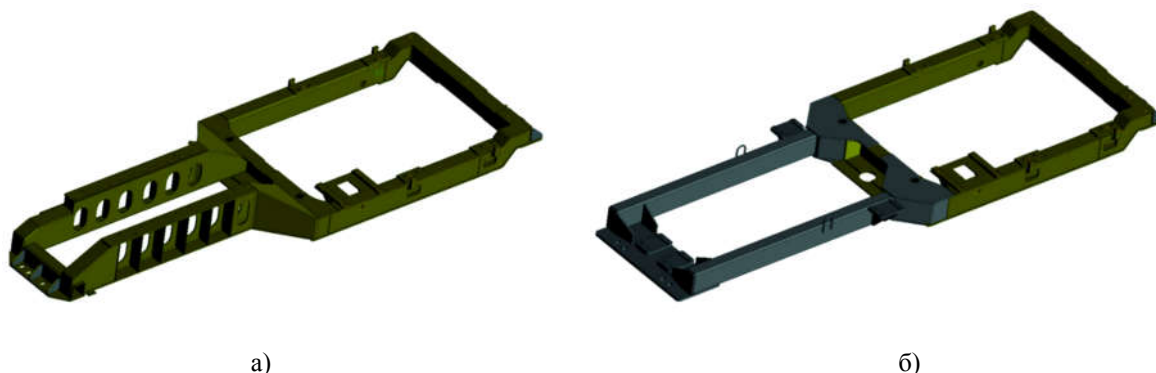


Рис. 2. Рама под силовую установку и гидропередачу: а – конструкция рамы под силовой агрегат М756; б – измененная конструкция рамы под новый силовой агрегат
 Fig. 2. Frame for the power unit and hydraulic transmission: frame designs for the M756 power unit (a); Modified frame designs for the new power unit (b)

Моделирование и расчет

Для предварительной оценки прочности были разработаны 3D модели новой конструкции рамы в среде *SOLIDWORKS*. Для расчета была создана пространственная конечно-элементная модель несущей конструкции измененной рамы под силовую установку и гидропередачу ГДП1000 дизель-поезда типа ДР1Б. Элементы рамы имитировались объемными параболиче-

скими конечными элементами с тремя степенями свободы в каждом узле.

В качестве исходных данных для выполнения оценки напряженно-деформированного состояния приняты:

- геометрические размеры и толщины конструктивных элементов;
- материал несущей конструкции: Сталь 20 и сталь Ст3 с модулем упругости – $2,1 \cdot 10^{11}$ Па и модулем упругости – 0,3;

– в модели учтено место расположения нового силового агрегата и его масса (масса брутто – 3450 кг) и гидропередачи и ее масса (масса брутто – 3850 кг);

– схемы нагружения, в том числе силовые граничные условия, приняты в соответствии с [9];

Создание конечно-элементной модели рамы включает в себя исследование влияния размера конечного элемента и количества элементов в модели на результаты вычислений. За сходимость результатов

принят шаг, на котором максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу меняется менее чем на 3,5 МПа при последовательном измельчении размера сеток (рис. 3). Установлено, что оптимальной является сетка с величиной ребра в диапазоне 2,0–10,0 мм. Конечно-элементная модель рамы под силовую установку и гидропередачу дизель-поезда типа ДР1Б представлена на рисунке 3 и состоит из 1545767 элементов и 2543477 узлов.

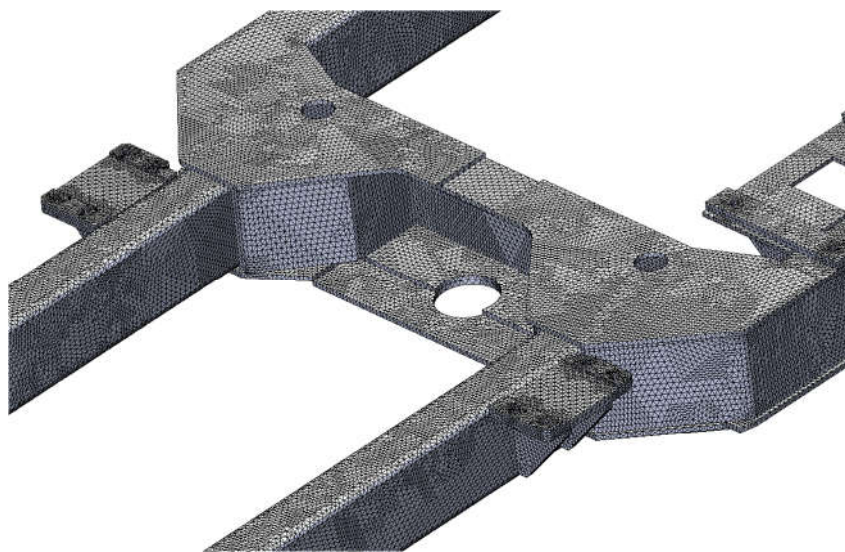


Рис. 3. Укрупненное изображение области рамы с примером построения сетки
Fig. 3. Close-up view of the frame area with an example of meshing

При проведении оценки прочности рассмотрено одновременное действие на раму следующих нагружающих факторов согласно [9]:

– действие вертикальных сил тяжести оборудования и размещенного на нем груза при вертикальном ускорении, равном $(1\pm c)g$, где $c = 2$ в конце вагона и линейно убывает до значения 0,5 в середине вагона (режим 1);

– совместное действие вертикальных сил тяжести оборудования и размещенного на нем груза при вертикальном ускорении $1g$ и инерционных сил, вызванных продольными ускорениями $3g$ (режим 2);

– совместное действие вертикальных сил тяжести оборудования и размещенного на нем груза при вертикальном ускорении $1g$ и инерционных сил, вызванных боковым ускорением $1g$ (режим 3).

Для каждого из приведенных режимов нагружения напряжения в элементах крепления оборудования не должны превышать 0,9 от предела текучести материала. Предел текучести для Сталь 20 – 245 МПа [8], для стали Ст3 – 235 МПа [6].

Результаты расчета показали, что на режиме 1 максимальный уровень эквивалентных напряжений достигает значения в 83,7 МПа при вертикальном ускорении « $(1+c)g$ ». При оценке прочности на нагрузки, соответствующие режиму 2 с учетом инерционных сил, вызванных продольными ускорениями « $+3g$ », наибольшие эквивалентные напряжения достигают значения в 96,9 МПа. Максимальный уровень эквивалентных напряжений достигает значения в 87,4 МПа при действии нагрузок согласно режиму 3. Результаты оценки прочности приведены на рис. 4 в виде рас-

пределения эквивалентных по Мизесу напряжений.

По результатам расчета установлено, что максимальные значения расчетных эквивалентных напряжений, возникающих в несущей конструкции измененной рамы

под силовую установку и гидропередачу дизель-поезда типа ДР1Б, не превышают допустимых значений, из этого следует, что прочность несущей конструкции измененной рамы соответствует требованиям [9].

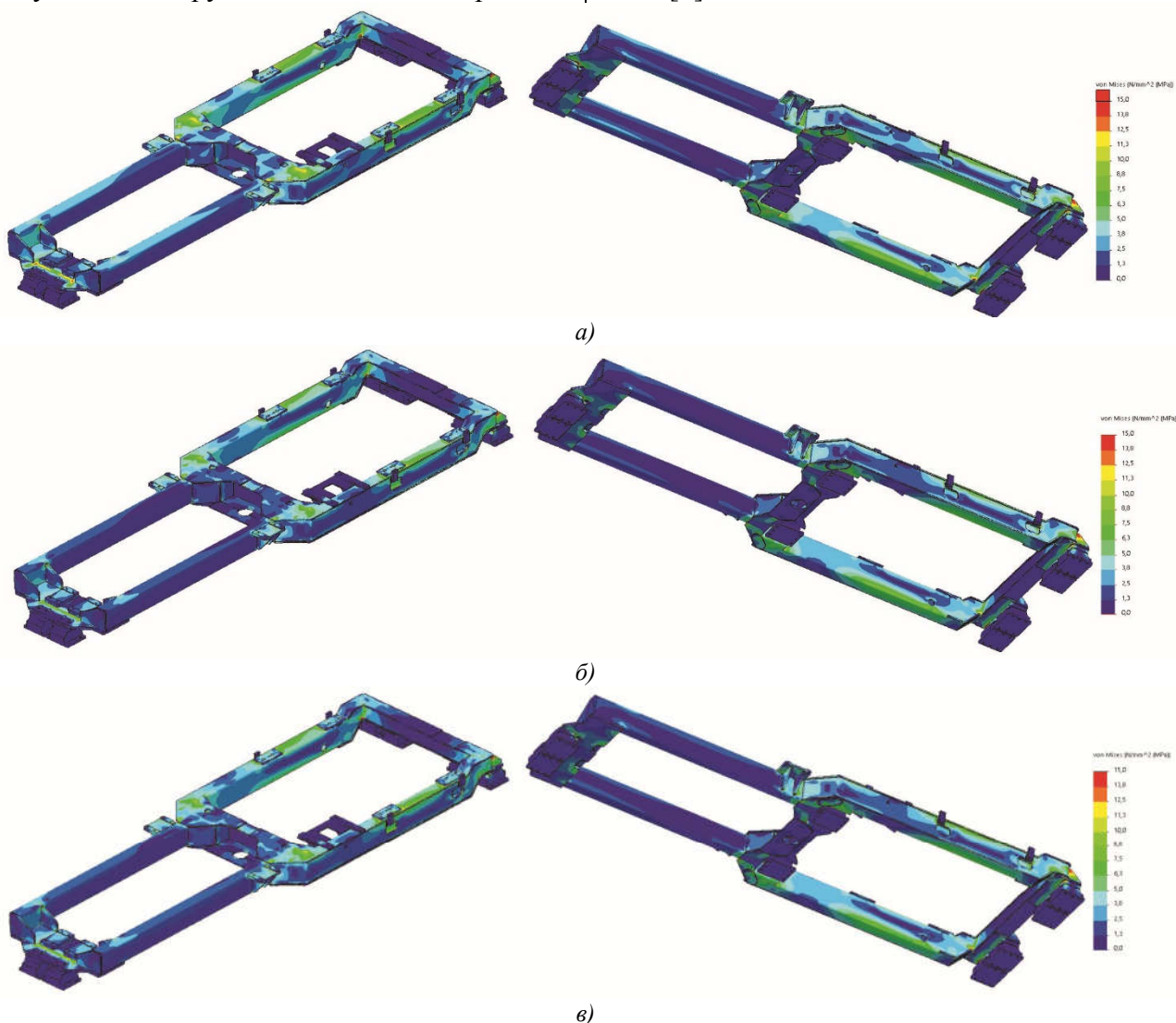


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений (МПа) в раме (для наглядности распределения значений эквивалентных напряжений, по всей конструкции измененной рамы приведены от 0 до 15 МПа): а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3

Fig. 4. Distribution of equivalent stresses (MPa) in the frame (for clarity, the distribution of equivalent stress values throughout the structure of the modified frame is given from 0 to 15 MPa): mode 1 (a); mode 2 (b); mode 3 (c)

Натурные испытания

Проведение испытаний по определению характеристик прочности методом тензометрирования невозможно без грамотно разработанной схемы размещения тензорезисторов (контрольных точек) [10]. Схема разработана в соответствии с проведенными прочностными расчетами в трех режимах нагружения, а также с учетом опыта специалистов испытательного

центра, проводящих испытания сварных рамных конструкций. Схема установки тензорезисторов на раме представлена на рис. 5.

Испытаниям на соударение выполнялись путем соударения вагона-бойка с испытываемым головным вагоном в груженом состоянии, установленным перед вагонами подпора. Удар проводился в гру-

женом состоянии. Масса груза, имитирующего сидящих пассажиров, составляла 4,76 т, масса тары с заправкой 66 % экипировки – 60 т. Скорость соударения регистрировалась путем измерения времени прохождения вагоном-бойком (тележкой) фиксированного расстояния, а сила соударения – тензометрической автосцепкой. Соударения осуществлялись с постепенным увеличением скорости (силы соударе-

ния). Расчетная (максимальная) сила соударения для вагона в соответствии с [9] составляет 2000 кН для передней консоли головного вагона. После окончания соударений производился заключительный осмотр испытываемого образца с проверкой работоспособности автосцепного оборудования и установленных на вагоне механизмов. Неисправностей и повреждений не выявлено.

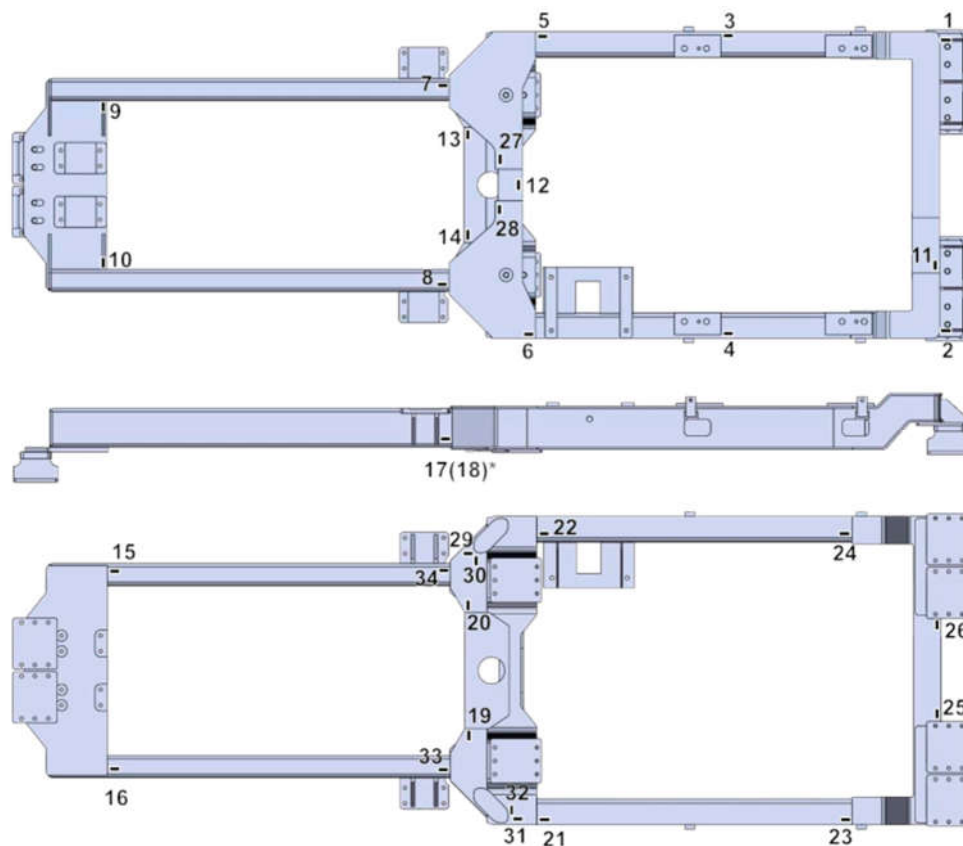


Рис. 5. Схема установки тензорезисторов: датчики №№ 1, 2, 9 и 10 установлены на горизонтальной части косынки; датчики №№ 27 и 28 установлены снизу листа у нахлесточного шва * – в скобках номер датчика, расположенного симметрично относительно продольной оси рамы

Fig. 5. Installation diagram of strain gauges: sensors No. 1, 2, 9 and 10 are installed on the horizontal part of the gusset; sensors Nos. 27 and 28 are installed at the bottom of the sheet at the overlap seam * – in brackets the number of the sensor located symmetrically relative to the longitudinal axis of the frame

На рис. 6 в качестве примера представлены осциллограммы регистрируемых величин для контрольной точки № 18 (удара № 10), при котором были получены: напряжения – 69,3 МПа; сила соударения – 1740,6 кН; скорость соударения – 6,76 км/ч.

На основании результатов ударных испытаний произведено построение зави-

симости максимальных значений напряжений от силы, действующей через автосцепку. По полученной зависимости, интерполированной линейным сплайном, определялись значения напряжений, соответствующей нормативной силе соударения. На рис. 7 приведен пример линейной интерполяции серии ударов для контрольной точки № 18.

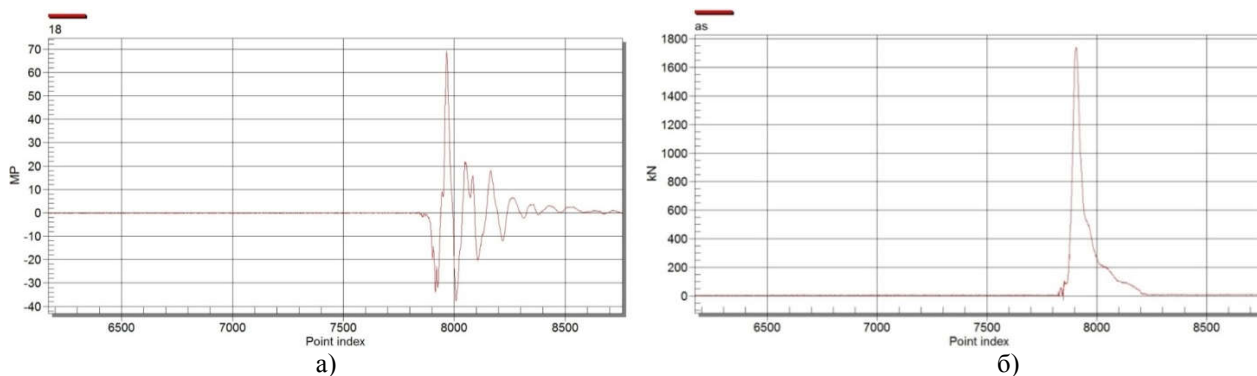


Рис. 6. Осциллограммы регистрируемых величин: а – осциллограмма напряжений, МПа; б – осциллограмма силы удара в автосцепку, кН

Fig. 6. Oscillograms of recorded quantities: stress oscillogram, MPa (a); oscillogram of the impact force in the automatic coupler, kN (b)

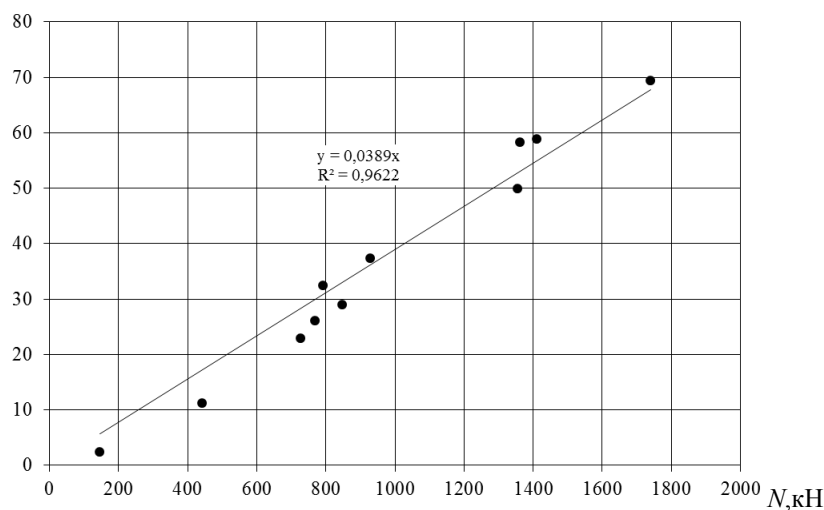


Рис. 7. Интерполяция серии ударов для датчика № 18
Fig. 7. Interpolation of a series of impacts for sensor No. 18

При проведении ходовых прочностных испытаний контролировались динамические напряжения в наиболее нагруженных сечениях элементов измененной рамы. Испытания проводились в груженом состоянии. Опытный поезд для проведения испытаний был загружен щебнем крупной фракции в мешках, исходя из условия 100 кг на одно пассажироместо, и был сформирован из двух моторных (головных) и двух немоторных вагонов. Требуемый массив экспериментальной информации по исследуемым величинам при ходовых прочностных испытаниях получен путем последовательного набора записей (реализации) процессов при движении дизельпоезда по прямым и кривым участкам пути, а также на стрелочном переводе во всем проектном диапазоне допускаемых эксплуатационных скоростей вплоть до

конструкционной скорости, при движении прямым и обратным ходом.

Также регистрировались значения напряжений при трогании с места, переходные процессы (тяга – сброс тяги – выбег) для различных скоростей и участков движения. Непосредственно перед началом заездов на каждый из исследуемых участков снимались показания тензорезисторов и принимались за нулевое значение. Записи выполнялись с частотой дискретизации не менее 400 Гц и аппаратной фильтрацией частотой 40 Гц. Регистрация измеряемых процессов производилась кадрами различной длительности в зависимости от длины опытного участка пути и скорости движения.

При обработке результатов ходовых прочностных испытаний производилась систематизация зарегистрированных пара-

метров в зависимости от характера пути и режимов движения опытного поезда и производилась отбраковка недостоверных данных.

По результатам проведенной расчетно-экспериментальной оценки установлено, что модернизированная конструкция

рамы под силовую установку и гидropередачу дизель-поезда типа ДР1Б удовлетворяет требованиям [9] в части соответствия прочности при действии максимальных продольных ударных сил (максимальное значение 212,5 МПа).

Коэффициент запаса сопротивления усталости

Коэффициент запаса сопротивления усталости элементов определяется в соответствии с [9] по формуле

$$n = \frac{\sigma_{-1p}}{K_{\sigma}\sigma_a + \psi_{\sigma} \frac{\sigma_m}{\alpha_{\sigma}}},$$

где σ_{-1p} – предел выносливости стандартного образца растяжения-сжатия с симметричным циклом нагружения, МПа; K_{σ} – коэффициент, характеризующий понижение предела выносливости конструкции по отношению к пределу выносливости стандартного образца (коэффициент концентрации); σ_a – амплитуда напряжений (максимальных в зоне концентрации) цикла, МПа; ψ_{σ} – коэффициент, характеризующий влияние асимметрии цикла; σ_m – величина среднего напряжения цикла, МПа; α_{σ} – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Амплитуды напряжения определены методом «дождя» по [11]. Для каждого участка пути и диапазона скорости движения строилась диаграмма плотности распределения амплитуд напряжения и опре-

делялась приведенная амплитуда динамического напряжения.

Величина σ_m определяется напряжениями, возникающими от действия постоянных статических нагрузок. Напряжения от силовой установки и гидropередачи не измерялись по двум причинам: сложность реализации проекта модернизации дизель-поезда с ремоторизацией; относительно малая величина этих напряжений при оценке прочности твердотельной модели рамы методом конечных элементов (их величина в конечном итоге влияет только на десятые доли коэффициента запаса).

Чтобы не упустить эту составляющую из расчета, производился анализ деформации модели от действия силы тяжести гидropередачи и силовой установки с целью определения знака напряжений в зонах установки тензорезисторов. Из расчета также заимствовалась и величина статических напряжений.

Согласно [9] коэффициент запаса сопротивления усталости для элементов рамы $[n] = 2$. Результаты определения коэффициента запаса сопротивления усталости приведены в таблице.

Таблица
Результаты расчета коэффициента запаса сопротивления усталости

Table

Results of calculation of fatigue resistance reserve factor

№ датчика	σ_{-1p} , МПа	σ_a , МПа	K_{σ}	α_{σ}	n	$[n]$
5	165	5,00	1,72	1,4	13,11	2
8		10,69			6,21	
9		5,81			11,33	
27		8,91			7,44	
28		10,38			6,39	
29		5,35			12,27	
34		10,48			6,33	

Заклучение

1. Разработана конструкция новой рамы под силовую установку и гидropередачу дизель-поезда типа ДР1Б.

2. Выполнен комплекс расчетов напряженно-деформированного состояния измененной конструкции рамы, на нагрузки, регламентированные [9]. Установлено, что конструкция измененной рамы соответствует требованиям нормативной документации.

3. Разработана схема установки тензорезисторов на основании напряженно-деформированного состояния, полученного при оценке прочности конструкции.

Проведена серия испытаний на соударение и ходовые прочностные испытания.

4. По результатам проведенной расчетно-экспериментальной оценки установлено, что новая конструкция рамы под силовую установку и гидropередачу дизель-поезда типа ДР1Б удовлетворяет требованиям [9] в части соответствия прочности по коэффициенту запаса сопротивления усталости (минимальное значение 6,21) и по показателю прочность при действии максимальных продольных ударных сил (максимальное значение 212,5 МПа).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бабич, Г.С. Тепловые дизели М753 и М756 / Г.С. Бабич [и др.] М.: Транспорт, 1968. 228 с.
2. Михайленко, А.А. Дизель-поезда типа ДР / А.А. Михайленко. М.: Транспорт, 1990. 336 с.
3. Афанаськов, П.М. Изучение технического состояния дизель-поездов серии ДР1 перед проведением процедуры оценки остаточного ресурса несущей конструкции после длительной эксплуатации / П.М. Афанаськов, Л.В. Огородников, С.М. Пытлев // Научные основы и технологии повышения ресурса и живучести подвижного состава железнодорожного транспорта. 2021. С. 153-155.
4. Оценка остаточного ресурса несущей конструкции вагона пассажирского после длительной эксплуатации / А.В. Пуятто [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. 2020. № 2 (41). С. 42-45.
5. Afanaskou, P. Estimation of the Residual Resource of a Dumping Wagon for Transportation of Bulky Cargo after Long-term Operation / P. Afanaskou, R. Charnin // Transport means 2021. 2021. Part I. P. 402-405.
6. ГОСТ 535-2005 Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества.

- Общие технические условия. Минск : Госстандарт, 2006. 14 с.
7. ГОСТ 30245-2012 Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия. Минск : СТАНДАРТИНФОРМ, 2014. 38 с.
 8. ГОСТ 1050-2013 Металлопродукция из легированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. Минск : Госстандарт, 2015. 32 с.
 9. ГОСТ 33796-2016 Моторвагонный подвижной состав. Требования к прочности и динамическим качествам. Минск : Госстандарт, 2017. 35 с.
 10. Прогнозирование остаточного ресурса тележек пассажирского вагона после длительной эксплуатации / П. М. Афанаськов [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения. 2019. Вып. 8. С. 220-226.
 11. ГОСТ 25.101-83 Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов : межгос. стандарт. – введ. 1984–07–01. М. : Издательство стандартов, 1983. 25 с.

REFERENCES

1. Babich GS. M753 and M756 thermal diesel engines. Moscow: Transport; 1968.
2. Mikhailenko AA. Diesel trains of DR type. Moscow: Transport; 1990.
3. Afanaskov PM, Ogorodnikov LV, Pytlev SM. Study of the technical condition of DR1 diesel trains before assessing the residual resource of the supporting structure after prolonged operation. Scientific Foundations and Technologies for Increasing the Resource and Durability of Railway Rolling Stock; 2021.

4. Putyato AV. Assessment of the residual resource of the supporting structure of a passenger car after prolonged operation. Bulletin of BSUT: Science and Transport. 2020;2(41):42-45.
5. Afanaskou P, Charnin R. Estimation of the residual resource of a dumping wagon for transportation of bulky cargo after long-term operation. Transport Means 2021; 2021.
6. GOST 535-2005 Common quality carbon steel bar and shaped sections. General specification. Minsk: Gosstandart; 2006.

7. GOST 30245-2012 Steel bent closed welded square and rectangular section for building. Specification. Minsk: Standartinform; 2014.
8. GOST 1050-2013 Metal products made of non-reinforced structural high-quality and special steels. General specification. Minsk: Gosstandart; 2015.
9. GOST 33796-2016 Railway multiple units. Durability and dynamics requirements. Minsk: Gosstandart; 2017.

10. Afanaskov PM. Forecasting the residual life of the passenger car body after long-term operation. *Actual Problems of Machine Science*. 2019;8:220-226.
11. GOST 25.101-83 Strength calculation and testing. Representation of random loading of machine elements and structures and statistical evaluation of results. Moscow: Publishing House of Standards; 1983.

Информация об авторах:

Афанаськов Павел Михайлович – магистр технических наук, научный сотрудник, тел. +375293695391, Author-ID-РИНЦ 1000475.

Огородников Леонид Викторович – магистр технических наук, тел. +375445889299, заместитель декана, Author-ID-РИНЦ 985114

Белогуб Виктор Владимирович – научный сотрудник, Author-ID-РИНЦ 1028442, тел. +375291480758.

Afanaskov Pavel Mikhailovich – Master of Technical Sciences, Researcher; phone: +375293695391, Author-ID-RSCI 1000475.

Ogorodnikov Leonid Viktorovich – Master of Technical Sciences, Deputy Dean; phone: +375445889299, Author-ID-RSCI 985114.

Belogub Viktor Vladimirovich – Research Associate; phone: +375291480758; Author-ID-RSCI 1028442.

Путьто Артур Владимирович – доктор технических наук, профессор, ректор, тел. +375232224636, Author-ID-РИНЦ 821644.

Щербатый Кирилл Сергеевич – ведущий инженер по безопасности движения на железнодорожном транспорте, тел. +375293695391.

Буйленков Павел Михайлович – магистр технических наук, аспирант, тел. +375291469700.

Putyato Artur Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector; phone: +375232224636, Author-ID-RSCI 821644.

Shcherbaty Kirill Sergeevich – Leading engineer for traffic safety of railroad transport; phone: +375293695391.

Buylenkov Pavel Mikhailovich – Master of Technical Sciences, Postgraduate student; phone: +375291469700.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 07.06.2024; одобрена после рецензирования 24.06.2024; принята к публикации 26.06.2024. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 07.06.2024; approved after review on 24.06.2024; accepted for publication on 26.06.2024. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.