

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 629.4.015: 629.4.027.25

EDN: <https://elibrary.ru/aylekh>

Научная специальность: 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



Обеспечение усталостной прочности соединительных балок четырехосных тележек многоосных грузовых вагонов

Л. В. Цыганская¹, Д. Г. Бейн²✉

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Научно-внедренческий центр «Вагоны», Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Из опыта эксплуатации многоосных вагонов, имеющих в своей конструкции четырехосные тележки, известно, что большинство отказов в эксплуатации приходится на соединительные балки. Объектом исследования в статье является соединительная балка четырехосной тележки грузового вагона. Цель исследования — оценка влияния поперечной перевалки кузова вагона на срок службы соединительной балки.

Материалы и методы. Оценка амплитуд динамических напряжений выполнялась с использованием метода конечных элементов в программной среде ANSYS. Амплитуды напряжений в соединительной балке оценивались по стандартизированным режимам нагружения без учета перевалки и отдельно оценивались амплитуды напряжений от поперечной перевалки восьмиосного вагона-цистерны.

Результаты. Проведен анализ работ по исследованию прочности и нагруженности соединительных балок в эксплуатации, который показал, что основным режимом по повреждающему воздействию в эксплуатации, приводящим к разрушению соединительных балок, является поперечная перевалка кузова вагона. Выполнена оценка усталостной прочности соединительной балки с учетом перевалки кузова вагона при движении. Получены результаты сравнительного расчета срока службы соединительной балки в зависимости от учета поперечной перевалки кузова вагона на примере восьмиосного вагона-цистерны.

Обсуждение и заключение. Расчет срока службы соединительной балки восьмиосного вагона-цистерны выполнен по стандартизированным режимам нагружения с учетом и без учета поперечной перевалки кузова. Показано, что срок службы балки, оцененный без учета поперечной перевалки кузова, не соответствует статистическим и опытным данным.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: восьмиосный грузовой вагон, четырехосная тележка вагона, соединительная балка, перевалка кузова, прочность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Цыганская Л. В., Бейн Д. Г. Обеспечение усталостной прочности соединительных балок четырехосных тележек многоосных грузовых вагонов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 2. С. 104–112.

✉ dmitry.bein@nvc-vagon.ru (Д. Г. Бейн)

© Цыганская Л. В., Бейн Д. Г., 2025

Original article

UDK 629.4.015: 629.4.027.25

EDN: <https://elibrary.ru/aylekh>

Scientific specialty: 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification



Ensuring fatigue strength of connecting beams of four-axle bogies of multi-axle wagons

Lyudmila V. Tsyganskaya¹, Dmitriy G. Beyn²✉

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Saint Petersburg, Russian Federation

²Scientific Research Centre «Vagony»,
Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. From the experience of operating multi-axle wagons with four-axle bogies in their design, it is known that the majority of failures in operation occur on the connecting beams. The object of the study is the connecting beam of a four-axle bogie of a wagon. The purpose of the study is to evaluate the effect of transverse transshipment of the car body on the service life of the connecting beam. Analysis of the work on the strength and load of connecting beams in operation was carried out, which shows that the main mode of damaging effects in operation, leading to the destruction of connecting beams, is the transverse transshipment of the car body.

Materials and methods. The amplitudes of dynamic stresses were estimated using the finite-element method in the ANSYS software environment. The stress amplitudes in the connecting beam were evaluated according to standardised loading modes without considering transshipment, and the stress amplitudes from the transverse transshipment of an eight-axle cistern car were separately evaluated.

Results. The fatigue strength of the connecting beam was assessed, considering the transshipment of the car body during movement. The results of comparative calculation of the service life of the connecting beam are obtained, depending on the consideration of the transverse transshipment of the car body using the example of an eight-axle cistern car.

Discussion and conclusion. The service life of the connecting beam of an eight-axle cistern car is calculated according to standardised loading modes, including and excluding the transverse transshipment of the body. The research shows that the service life of the beam, estimated without considering the transverse transshipment of the car body, does not correspond to statistical and experimental data.

KEYWORDS: eight-axle wagon, four-axle bogie, connecting beam, body transshipment, strength

FOR CITATION: Tsyganskaya L. G., Beyn D. G. Ensuring fatigue strength of connecting beams of four-axle bogies of multi-axle wagons. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(2):104–112. (In Russ.).

Введение. В настоящее время актуальным направлением в области грузового вагоностроения является создание нового восьмиосного подвижного состава с увеличенной нагрузкой на ось до 25 тс. Такие вагоны способны значительно увеличить провозную способность железнодорожной сети. При сопоставимых условиях эксплуатации восьмиосных вагонов по сравнению с четырехосными с нагрузкой 23,5 тс даст прирост провозной способности более чем на 30 % в год¹.

Для реализации таких проектов в первую очередь необходима разработка новой конструкции четырехосной тележки с повышенной нагрузкой на ось с учетом имеющегося опыта эксплуатации, новых требований к прочности, безопасности, динамическим характеристикам (по стандартам^{2, 3}) и нового стандарта воздействия на железнодорожный путь⁴.

Из опыта эксплуатации многоосных вагонов, имеющих в своей конструкции четырехосные тележки, известно, что большинство отказов в эксплуатации приходится на соединительные балки. Вопросами обеспечения прочности соединительных балок в конце прошлого века занимались ведущие отраслевые институты МИИТ и ВНИИЖТ [1, 2]. Специалистами указанных организаций была проделана большая работа, в частности, отметим исследование, выполненное в МИИТ в 1996 г.⁵ (далее по тексту — НИР МИИТ). В нем были определены конструктивно-технологические причины низкой надежности соединительных балок и найдены способы повышения запаса прочности.

В то же время, действующие нормативные документы по расчетной оценке прочности грузовых вагонов и их составных частей («Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм»⁶ и ГОСТ 33211-2014⁷) не учитывают отдельные результаты работ (в т.ч. работы [1, 2] и НИР МИИТ), что может привести к проектированию конструкций соединительных балок с недостаточными прочностными характеристиками.

Результаты ранее выполненных исследований. Основным несущим элементом четырехосной тележки является соединительная балка, передающая нагрузки от рамы вагона на надрессорные балки двухосных тележек. Опыт применения четырехосных тележек модели 18-101 показал, что соединительные балки, передающие нагрузку от рамы вагона на двухосные тележки, являются слабым местом конструкции: уже к восьми годам эксплуатации в них возникают трещины в зоне концевых пятников по верхним и нижним горизонтальным листам (см. НИР МИИТ).

Трещины, как правило, начинаются от места приварки верхнего листа балки к пятнику с торца балки и развиваются либо по периметру кольцевого шва, либо под углом 25...30° к продольной оси балки в тело подпятника^{2, 3}.

Основные места возникновения трещин в соединительных балках — это крайние пятники и центральная часть^{8, 9} (рис. 1).

Существовавшие на момент разработки соединительных балок методы расчета (например, «Нормы...»⁶) позволяли с достаточной точностью определять их напряженно-деформированное состояние. При этом для определения частотных параметров нагруженности соединительных балок в эксплуатации и определения основных схем нагружения потребовалось проведение большого объема экспериментальных исследований и многократных ходовых прочностных испытаний.

При проведении исследований (см. НИР МИИТ) изучались конструктивно и технологически различные конструкции соединительных балок: штамповарные с литыми пятниками с различными конструкциями концевой части крайних пятников, с кованными пятниками, балки облегченной конструкции, унифицированные штамповарные балки, балки с пятниками, выполненными механической обработкой из листовой прокатной стали.

¹ Шелкова О. Придать ускорение // Газета «Гудок». 11.01.2023. № 2. [Электронный ресурс]: URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1623993&archive=2023.01.11>

² ГОСТ 34763.1-2021. Тележки трех- и четырехосные грузовых вагонов железных дорог. Общие технические требования: утв. приказом Росстандарта от 06.10.2021 N 1063-ст. М.: ФГБУ «РСТ», 2021.

³ ГОСТ 34768-2021. Балка соединительная четырехосных тележек грузовых вагонов. Технические условия: утв. приказом Росстандарта от 06.10.2021 N 1071-ст. М.: ФГБУ «РСТ», 2021.

⁴ ГОСТ 34759-2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний: утв. приказом Росстандарта от 06.10.2021 N 1068-ст. М.: ФГБУ «РСТ», 2021.

⁵ Отчет о научно-исследовательской работе «Расчетно-теоретическое обоснование выбора базового варианта конструкции соединительной балки и его оптимизация». Тема № 1257 (ЦВ МПС), 1996. № 87/86 (МИИТ). Исполнители: Ю. Н. Аксенов, А. Ю. Богачев, С. Ю. Петров.

⁶ Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных): утв. МПС России от 22 января 1996 г. М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 319 с.

⁷ ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам (с Поправкой, с Изменением № 1): утв. приказом Росстандарта № 565-ст от 05.06.2015. Москва: Стандартинформ, 2020. 54 с.

⁸ РД ВНИИЖТ-059/01-2019. Инструкция по сварке и наплавке при ремонте грузовых вагонов: утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, протокол от 4-5 ноября 2015 г. №63.

⁹ РД 32 ЦВ 052-2009. Ремонт тележек грузовых вагонов тип 2 по ГОСТ 9246 с боковыми скользунами зазорного типа. Общее руководство по ремонту. Протокол 52 заседания Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества (с изм. и доп., утв. на 80-м заседании Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, протокол от 10.06.2024).

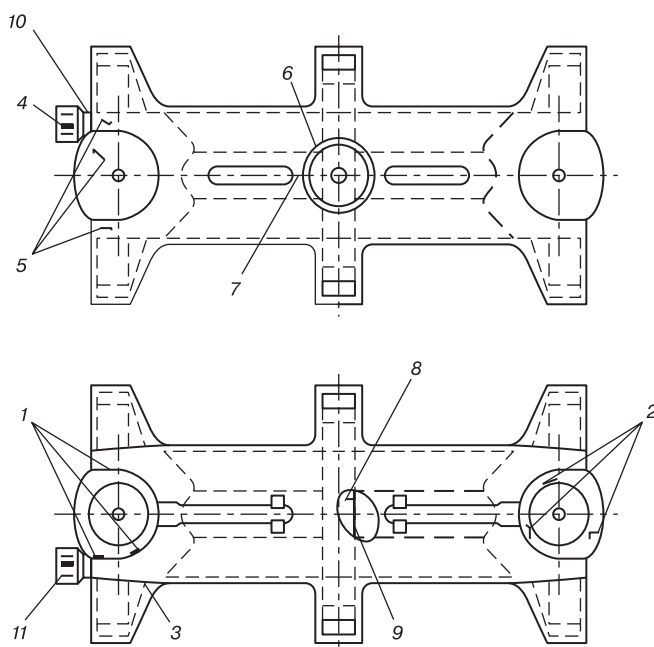


Рис. 1. Дефекты соединительной балки (трещины, изломы), которые разрешено ремонтировать при плановых видах ремонта*:

1 — трещины по зоне сварного шва приварки нижнего листа к пятниковой отливке; 2 — трещины по основному металлу с одной стороны пятниковой отливки (относительно продольной оси); 3 — трещина сварного шва, соединяющего лист нижний и подкрылок скользуна; 4 — излом кронштейна; 5 — трещины верхней части пятниковой отливки с одной стороны; 6 — трещины в зоне сварного шва приварки листа верхнего к пятниковой плите; 7 — трещина верхнего листа балки независимо от длины; 8 — трещины с нижней стороны пятниковой плиты; 9 — трещины по сварным швам приварки внутренней центральной диафрагмы; 10 — трещина сварного шва кронштейна торсиона; 11 — трещина кронштейна

* Источник: РД ВНИИЖТ-059/01-2019⁸, РД 32 ЦВ 052-2009⁹

Fig. 1. Defects in the connecting beam (cracks, kinks), which are allowed to be repaired during scheduled repairs according to*:
1 — cracks in the weld area of welding the bottom sheet to the centre pivot casting; 2 — cracks in the base metal on one side of the centre pivot casting (relative to the longitudinal axis); 3 — weld crack connecting the lower sheet and the side bearer; 4 — fracture of the bracket; 5 — cracks in the upper part of the centre pivot casting on one side; 6 — cracks in the weld area of welding the upper sheet to the centre pivot plate; 7 — crack in the upper sheet of the beam, regardless of length; 8 — cracks on the underside of the centre pivot plate; 9 — cracks on the welds of the welding of the inner central diaphragm; 10 — crack of the weld of the torsion bar bracket; 11 — crack of the bracket

* Source: РД ВНИИЖТ-059/01-2019⁸, РД 32 ЦВ 052-2009⁹

В ходе вышеуказанных многолетних исследований соединительных балок различных конструкций в работах МИИТ, ВНИИЖТ, ПГУПС были получены следующие результаты:

- при движении восьмиосных вагонов со скоростями от 5 до 22 м/с происходит постоянная перевалка кузова с частотами от 0,3 до 1,5 Гц. С увеличением

скорости движения более 22 м/с наблюдается тенденция к увеличению частоты перевалки. В зависимости от конструктивных особенностей вагонов перевалирующая частота может отличаться;

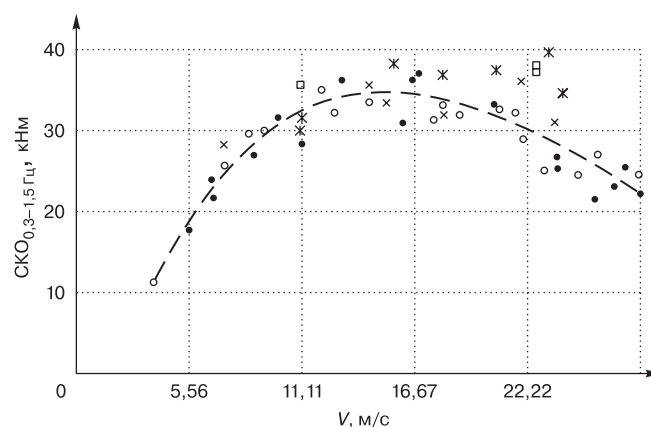
- концевые зоны соединительной балки набегающей (первой по ходу движения) четырехосной тележки всегда нагружены на 12...15% меньше противоположной. Половина соединительной балки со стороны кронштейна торсиона (без учета локального возмущения напряженно-деформированного состояния, вызванного его жесткостью), всегда нагружена на 15...25% больше противоположной половины;

- основным режимом по повреждающему воздействию, приводящим к возникновению трещин в эксплуатации в конструкции балок, является поперечная перевалка кузова вагона при движении. В зоне центрального пятника на повреждение соединительной балки также существенно влияет продольная перевалка кузова;

- были установлены зависимости поперечной перевалки кузова от скорости движения вагона и неровностей пути.

На рис. 2 приведена точечная диаграмма изменения среднеквадратичного отклонения процессов поперечной перевалки (в диапазоне частот 0,3...1,5 Гц) в зависимости от скорости движения [1].

Также исследованиями прочности соединительных балок с учетом перевалки занимались специалисты



Условные обозначения балльности пути
(conventional designations of the route grade):

• 0...50 ○ 50...100 × 100...200 □ 200...300 * 300...400

Рис. 2. Точечная диаграмма изменения среднеквадратичного отклонения процессов поперечной перевалки (в диапазоне частот 0,3...1,5 Гц) в зависимости от скорости движения*

* Источник: НИР МИИТ 1996 г.

Fig. 2. Dot diagramme of the change in the standard deviation of the transversal transshipment processes (in the frequency range 0.3...1.5 Hz) depending on the movement speed*

* Source: МИИТ research in 1996

ПГУПС [3, 4] и Иркутского государственного университета [5–7].

В работе А. А. Романовой¹⁰ отмечено, что основной причиной преждевременного выхода из строя соединительных балок в условиях Сибири и Дальнего Востока является наличие значительного количества кривых участков пути, на которых происходит боковая качка вагона, что приводит к поперечной перевалке балки и возникновению в ней трещин. При экспериментальных исследованиях по определению ресурса схема нагружения реализовалась приложением вертикальной нагрузки к центральному подпятнику и приложением динамических нагрузок от двух пневмопульсаторов, установленных с одной стороны вагона и вызывающих перевалку цистерны на пятниках. При испытаниях соединительная балка переваливалась на концевых пятниках с опиранием концевых подкрылков на наддрессорные балки тележек.

В работе [6] отмечено, что одним из наиболее важных режимов нагружения соединительной балки, оказывающим преобладающее влияние на разрушение зон крайних пятников, является поперечная перевалка (без «завала» на скользуны). При режиме нагружения, соответствующем поперечной перевалке с «завалом» на скользуны, введенные автором [6] изменения значительно улучшили работоспособность наиболее нагруженных зон соединительной балки. При дальнейших исследованиях, в работе [7] расчеты рекомендуемого автором варианта конструкции проводились при поперечной перевалке без завала и с завалом на скользуны, а также при продольной перевалке с опорой на внешние стороны пятников. При моделировании продольной перевалки, как и в работе [1], вертикальная нагрузка на подпятник и крайние пятники распределялась по их рабочей поверхности по закону квадратичной параболы вдоль продольной оси балки. Аналогично для крайних пятников был смоделирован один из наиболее жестких режимов, когда максимальная интенсивность нагрузки на пятники смещена к внешним краям балки. При сравнительном анализе показано, что для корректной оценки работоспособности балки необходим расчет главных амплитуд напряжений. Использование стандартных подходов к оценке прочности недостаточно и в отдельных случаях может приводить к некорректным результатам.

В статье [8] рассмотрены различные конструкции опорных устройств ходовых частей большегрузных восьмиосных вагонов и этапы их модернизации. В работе [9] отмечено, что разработка надежной и легкой конструкции соединительной балки играет важней-

шую роль в обеспечении лучшей динамики восьмиосных вагонов по сравнению с четырехосными.

Следует отметить, что несмотря на огромный расчетно-экспериментальный опыт, полученный при выполнении вышеперечисленных работ, действующие нормативные документы по расчетной оценке прочности грузовых вагонов и их составных частей (ГОСТ 33211-2014 и упомянутые «Нормы...») не учитывают перевалку кузова вагона при расчете соединительной балки, что может привести к проектированию конструкций балок с недостаточными прочностными характеристиками. Задача по оценке усталостной прочности соединительной балки с учетом перевалки кузова вагона при движении остается на сегодня актуальной. Данная работа посвящена исследованию влияния поперечной перевалки кузова вагона на срок службы соединительной балки.

Оценка срока службы соединительной балки. В настоящей работе проведена сравнительная оценка результатов срока службы соединительной балки по чертежу 1500.10.01.000 АО «НВЦ «Вагоны» со сроком службы 16 лет, установленным на основании ресурсных испытаний и подтвержденным опытом эксплуатации (с учетом коррозии). Влияние температурных воздействий в рамках работы не рассматривалось.

В соответствии с действующими нормативными документами оценка прочности соединительных балок выполняется по ГОСТ 33211-2014, а срок службы оценивается с учетом требований ГОСТ 34768-2021 по формуле

$$T_k = \frac{\left(\frac{\sigma_{a,N}}{[n]} \right)^m N_0}{B \cdot f_3 \cdot K_{\Pi} (1 - K_{\Pi}) \sum_{k=1}^p K_{yч k} \sum_{j=1}^q P_{v,j} \sum_{i=1}^r \sigma_{a,i}^m P_{\sigma,i}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{a,N}$ — предел выносливости по амплитуде напряжений натурной детали при установившемся режиме нагружения на базе испытаний $N_0 = 10^7$, МПа;

$[n]$ — допускаемый коэффициент запаса сопротивления усталости, принимаем $[n] = 1,6$ для расчета фактического срока службы балки;

m — показатель степени уравнения в кривой усталости в амплитудах;

B — коэффициент перевода календарного срока службы во время непрерывного движения;

N_0 — базовое число циклов (для несущих деталей $N_0 = 10^7$, МПа);

f_3 — центральная (эффективная) частота процесса;

K_{Π} — коэффициент использования грузоподъемности вагона;

¹⁰ Романова А. А. Совершенствование конструкции соединительных балок восьмиосных вагонов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Петерб. гос. ун-т путей сообщ. Санкт-Петербург, 2004. 22 с.

K_{Π} — коэффициент порожнего пробега;
 $P_{v,j}$ — доля времени (вероятность) эксплуатации в j -м интервале скоростей;
 $K_{yч k}$ — средняя доля протяженности характерных участков пути;
 $\sigma_{a,i}$ — уровень амплитуды динамических напряжений, МПа;
 $P_{\sigma,i}$ — частота (вероятность) появления амплитуд напряжений с уровнем $\sigma_{a,i}$ в i -м интервале скоростей;
 p — число характерных участков пути;
 q — принятое число разрядов скоростей движения;
 r — принятое число разрядов амплитуд напряжений в y -м интервале скоростей движения вагона.

Оценка амплитуд динамических напряжений выполнялась с использованием метода конечных элементов в программной среде ANSYS. Амплитуды напряжений в соединительной балке оценивались по стандартизированным режимам нагружения по ГОСТ 33211-2014 без учета перевалки и отдельно оценивались амплитуды напряжений от поперечной перевалки восьмиосного вагона-цистерны.

Для оценки напряжений от поперечной перевалки вагона на пятник соединительной балки нагрузка от веса кузова вагона прикладывалась в виде давления, распределенного по квадратичной зависимости, показанной на рис. 3. Нелинейный характер распределения контактного давления по поверхности пятника показан в работе НИР МИИТ. Выполненные авторами сопоставления ранее проведенных результатов испытаний соединительных балок с расчетами показали, что квадратичная зависимость нагружения пятника при расчете прочности с учетом поперечной перевалки наиболее точно отражает характер его напряженно-деформированного состояния.

Диаграмма распределения давления по пятнику показана на рис. 4.

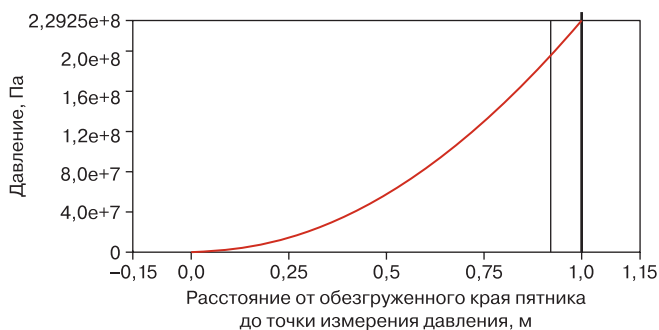


Рис. 3. График квадратичной зависимости распределения давления по пятнику*

* Источник: данные авторов

Fig. 3. Graph of the quadratic dependence of the pressure distribution on centre pivot*

* Source: authors data

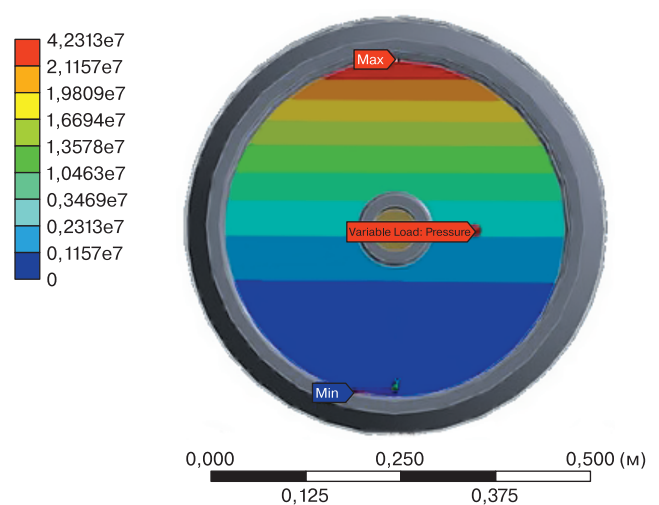


Рис. 4. Диаграмма распределения давления по пятнику*

* Источник: данные авторов

Fig. 4. Diagramme of the pressure distribution on the centre pivot*

* Source: authors data

На основании формулы (1), а также с учетом данных работы и распределений скоростей по ГОСТ 33211-2014 и приложению А ГОСТ 34768-2021 проведена оценка срока службы по формуле

$$T_k = \frac{\left(\frac{\sigma_{a,N}}{[n]} \right)^m N_0}{B \cdot f_{\text{пер}} \cdot K_{\Pi} (1 - K_{\Pi}) \sum_{k=1}^p K_{yч} \sum_{j=1}^q P_{v,j} \sum_{i=1}^r \sigma_{a,i}^m P_{\sigma,i}}, \quad (2)$$

где $f_{\text{пер}}$ — частота поперечной перевалки кузова вагона на соединительной балке, равна 1,5 Гц;

$\sigma_{a,i}^{\text{пер}}$ — уровень амплитуды динамических напряжений при поперечной перевалке, МПа.

Диаграммы распределений эквивалентных напряжений в пятнике в зависимости от учета перевалки показаны на рис. 5.

Диаграммы распределений главных напряжений в пятнике по оси, перпендикулярной направлению движения вагона в зависимости от учета перевалки, показаны на рис. 6.

Результаты расчета напряжений для консольного пятника в зависимости от учета перевалки приведены в табл. 1.

По результатам проведенных расчетов, при учете перевалки кузова, эквивалентные напряжения в консольном пятнике соединительной балки в 1,5 раза выше, а главные напряжения — в 5 раз по сравнению с результатами расчетов без учета перевалки кузова (табл. 1). Результаты сравнительного расчета срока службы консольного пятника T_k показывают, что с учетом перевалки величина срока службы снижается с 245 до 25 лет (табл. 2).

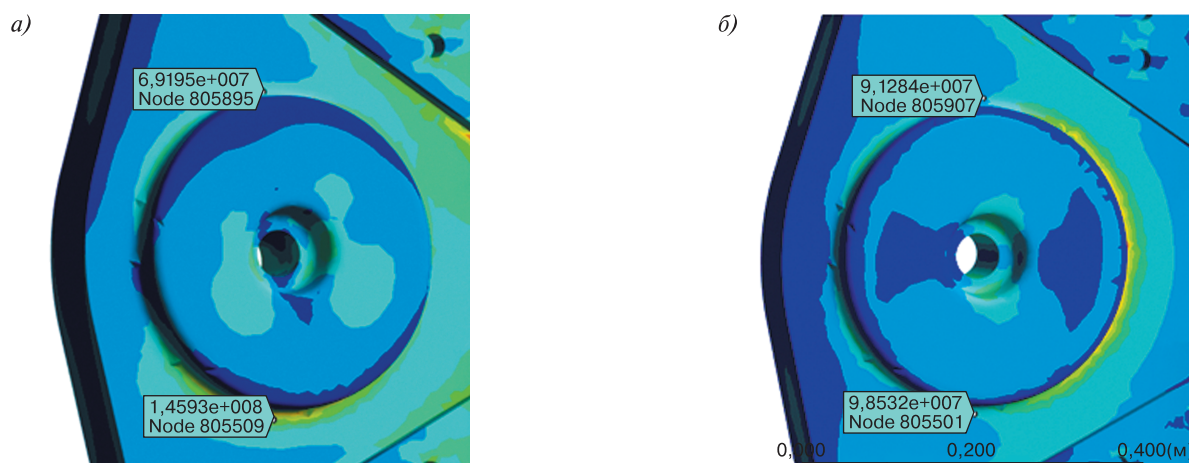


Рис. 5. Диаграммы распределений эквивалентных напряжений в пятнике*:
 а — с учетом перевалки; б — без учета перевалки
 * Источник: данные авторов

Fig. 5. Diagrammes of equivalent stress distributions in the centre pivot*:
 а — with transshipment; б — without transshipment
 * Source: authors data

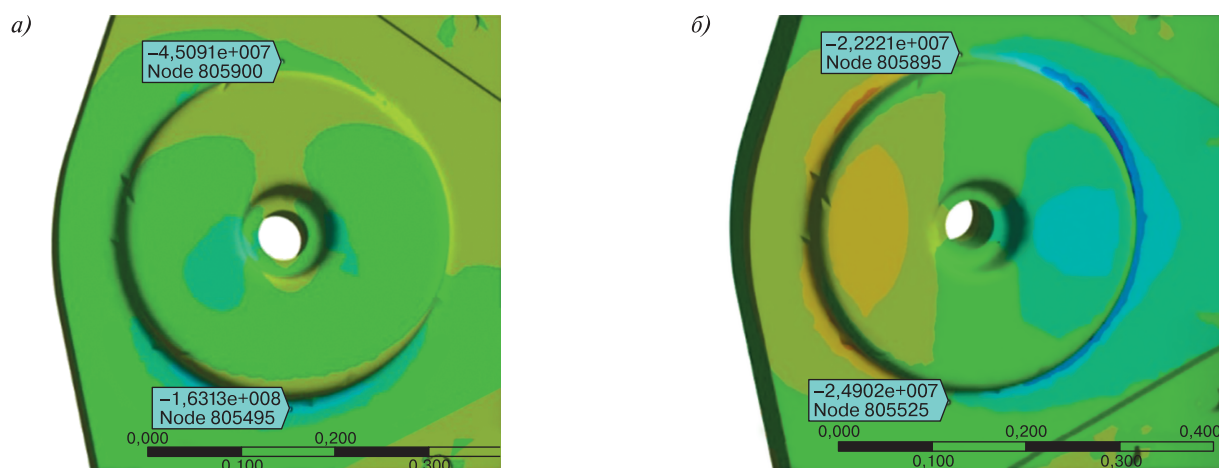


Рис. 6. Диаграммы распределений главных напряжений в пятнике по оси, перпендикулярной направлению движения вагона*:
 а — с учетом перевалки; б — без учета перевалки
 * Источник: данные авторов

Fig. 6. Diagrammes of the distribution of the main stresses in the center pivot along the axis which is perpendicular to the direction of car movement*:
 а — with transshipment; б — without transshipment
 * Source: authors data

Таблица 1

Результаты расчета напряжений для консольного пятника в зависимости от учета перевалки*

Table 1

Results of console centre pivot stresses calculation, depending on the accounting of transshipment*

Рассматриваемый случай	Без учета поперечной перевалки	С учетом поперечной перевалки	Расхождение с вариантом без учета поперечной перевалки, %
Эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$, МПа	98,5	145,9	+48
Главные напряжения σ_1 , МПа	24,9	163,0	+555

* Источник: данные авторов

* Source: authors data

Таблица 2
Результаты сравнительного расчета срока службы
для консольного пятника*

Table 2

Results of comparative calculation of service life for console centre pivot*

Рассматриваемый случай	$\sigma_{a,н}$, МПа	$\sigma_{a,э}$, МПа	T_k , лет
Без учета поперечной перевалки	65,25	3,97	245
С учетом поперечной перевалки	65,25	49,63	25

* Источник: данные авторов

* Source: authors data

Обсуждение и заключение. Анализ работ по исследованию прочности и нагруженности соединительных балок в эксплуатации показал, что основным режимом по повреждающему воздействию в эксплуатации, приводящим к разрушению соединительных балок, является поперечная перевалка кузова вагона.

Выполнен сравнительный расчет срока службы соединительной балки, который показал, что оценка срока службы по ГОСТ 34768-2021, не учитывающая основной разрушающий режим для соединительных балок грузовых вагонов — поперечную перевалку кузова — не соответствует экспериментальным и статистическим данным.

Возможные направления дальнейших исследований по повышению усталостной прочности соединительных балок четырехосных тележек авторы видят в применении скользящих с упругими элементами, в выборе оптимальных величин переходных радиусов балки и установке дополнительных подкрепляющих ребер, в изменении системы опирания соединительной балки на тележки.

Отдельные результаты использованы компанией РМ РЕЙЛ при разработке новых соединительных балок, при выборе технического решения соединительной балки для четырехосной тележки.

Планируется проведение полного комплекса испытаний по требованиям стандартов и дополнительных стендовых испытаний, имитирующих перевалку кузова.

Предлагается рассмотреть возможность разработки и внедрения новой методики расчета соединительных балок четырехосных тележек, учитывающей влияние поперечной перевалки кузова на ее срок службы.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Аксенов Ю. Н., Богачев А. Ю., Павлов Н. В., Голышев А. И. Анализ характеристик износа пятниковых зон надрессорных и соединительных балок // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2000. № 3. С. 40–45. Aksyonov Yu. N., Aksenov Yu. N., Bogachev A. Yu., Pavlov N. V., Golyshev A. I. Analysis of wear characteristics of center plate units of bolsters and span bolsters. *Vestnik VNIIZhT*. 2000;3:40–45. (In Russ.).
- Аксенов Ю. Н., Фаерштейн Ю. О. Анализ НДС и эксплуатационной надежности сварных соединений соединительной балки четырехосной тележки // Труды МИИТ. 1986. Вып. 783. С. 71–77. Aksenov Yu. N., Fayershteyn Yu. O. Analysis of VAT and operational reliability of welded joints of the connecting beam of a four-axle trolley. *Tr. MIIT*. 1986;783:71–77. (In Russ.).
- Бороненко Ю. П. Анализ повреждаемости центральных пятников 8-осных цистерн / Ю. П. Бороненко, В. М. Бубнов, А. С. Вершинин и др. // Петербургский институт инженеров железнодорожного транспорта: сб. науч. трудов. СПб., 1993. 126 с. Boronenko Yu. P. Analysis of damageability of central pads of 8-axle tank cars. Yu. P. Boronenko, V. M. Bubnov, A. S. Vershinin et al. // In: *St. Petersburg Institute of Railway Engineers: collection of scientific papers*. St. Petersburg, 1993. 126 p. (In Russ.).
- Романова А. А. Повышение ресурса соединительной балки // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2004. № 1. С. 63–66. EDN: <https://www.elibrary.ru/lrhuqn>. Romanova A. A. Increasing the resource of the connecting beam. *Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering*. 2004;(1):63–66. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/lrhuqn>.
- Конечноэлементный анализ кинетики температурных полей и деформации при термообработке соединительной балки / А. Е. Неживляк, Ю. Н. Аксенов, М. В. Гречнева, В. Н. Матханов // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственные процессы: Сборник трудов международной конференции, Кацивели, Крым, 16–20 сентября 2002 г. Кацивели, Крым: Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 2002. С. 140–144. EDN: <https://elibrary.ru/yqkbkn>. Nezhivlyak A. E., Aksenov Yu. N., Grechneva M. V., Matkhanov V. N. Finite Element Analysis of Temperature Field Kinetics and Deformation during Heat Treatment of a Connecting Beam. In: *Mathematical Modeling and Information Technologies in Welding and Related Processes: Collection of Proceedings of the International Conference, Katsiveli, Crimea, September 16–20, 2002*. Katsiveli, Crimea: E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2002. P. 140–144. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/yqkbkn>.
- Разработка рациональной конструкции соединительных балок по результатам конечноэлементного анализа / А. Е. Неживляк, М. В. Гречнева, А. Е. Балановский, Ю. Н. Аксенов // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственные процессы: Сборник трудов Второй международной конференции, поселок Кацивели, Крым, 13–17 сентября 2004 г. Кацивели, Крым: Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 2004. С. 195–199. EDN: <https://elibrary.ru/yqcbid>. Nezhivlyak A. E., Grechneva M. V., Balanovsky A. E., Aksenov Yu. N. Development of a rational design of connecting beams based on the results of finite element analysis. In: *Mathematical modeling and information technologies in welding and related processes: Proceedings of the Second international conference, Katsiveli, Crimea, September 13–17, 2004*. Katsiveli, Crimea: E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2004. P. 195–199. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/yqcbid>.

7. Неживляк А. Е., Гречнева М. В., Неживляк Д. А. Усовершенствование конструкции соединительной балки вагона на основе метода конечных элементов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 4(52). С. 188–192. EDN: <https://www.elibrary.ru/xfecpz>.

Nezhivlyak A. E., Grechneva M. V., Nezhivlyak D. A. Improvement of the design of the connecting beam of the car based on the finite element method. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2016;4(52): 188–192. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/xfecpz>.

8. Попова Т. А. Эволюция систем опирания кузова восьмиосного вагона на ходовые части / Т. А. Попова, Г. И. Петров, В. Н. Филиппов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 1(81). С. 10–21. EDN: <https://www.elibrary.ru/egfavg>.

Popova T. A., Petrov G. I., Filippov V. N. Evolution of systems for supporting the body of an eight-axle wagon on the running gear. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2024;1(81):10–21. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/egfavg>.

9. Попова Т. А. Конструктивные особенности исполнения тележек большегрузных восьмиосных вагонов / Т. А. Попова, Г. И. Петров, Ф. Ф. Музаффаров // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: Ташкент, 17–20 апреля 2024 г.: мат. Третьей Межд. науч.-техн. конф. Ташкент: ТГТУ, 2024. С. 326–332. EDN: <https://www.elibrary.ru/ycymzi>.

Popova T. A., Petrov G. I., Muzaffarov F. F. Design features of the bogies of heavy-duty eight-axle wagons. In: *Railway rolling stock: problems, solutions, prospects: Proceedings of the Third International Scientific and Technical Conference, Tashkent, April 17–20, 2024*. Tashkent: TSTU, 2024. P. 326–332. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/ycymzi>.

10. Выбор технического решения соединительной балки для четырехосной тележки / В. С. Коршунов, Л. В. Цыганская, С. В. Буриков, Э. Р. Хамраева // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: Санкт-Петербург, 21–24 августа 2023 г.: мат. XVII Межд. науч.-техн. конф. Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2024. С. 64–65. EDN: <https://www.elibrary.ru/pwkwsd>.

Selection of a technical solution for a connecting beam for a four-axle bogie / V. S. Korshunov, L. V. Tsyganskaya, S. V. Burikov, E. R. Khamraeva. In: *Rolling stock of the 21st century: ideas, requirements, projects: Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference, St. Petersburg, August 21–24, 2023*. St. Petersburg: Emperor Alexander I Petersburg State University of Railway Engineering, 2024. P. 64–65. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/pwkwsd>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Людмила Валериевна ЦЫГАНСКАЯ,

канд. техн. наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС, 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9), Author ID: 546427, <https://orcid.org/0009-0005-8189-9971>

Дмитрий Григорьевич БЕЙН,

канд. техн. наук, заместитель главного конструктора, АО «Научно-внедренческий центр «Вагоны» (АО «НВЦ «Вагоны», 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 22 литера М), Author ID: 741584, <https://orcid.org/0009-0007-7881-2155>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lyudmila V. TSYGANSKAYA,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Railway Cars Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (190031, Saint Petersburg, 9, Moskovsky Ave.), Author ID: 546427, <https://orcid.org/0009-0005-8189-9971>

Dmitriy G. BEYN,

Cand. Sci. (Eng.), Deputy Chief Constructor, Scientific and Innovation Centre “Vagony” (190013, Saint Petersburg, 22M, Moskovsky Ave.), Author ID: 741584, <https://orcid.org/0009-0007-7881-2155>

ВКЛАД АВТОРОВ

Людмила Валериевна ЦЫГАНСКАЯ. Постановка целей и задач исследования, общее руководство исследованием, выполнение расчетов, подготовка таблиц и рисунков с результатами расчетов, написание текста статьи (50 %)

Дмитрий Григорьевич БЕЙН. Подготовка обзора работ, написание текста статьи, редактирование текста статьи и рисунков (50 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Lyudmila V. TSYGANSKAYA. Setting research goals and objectives, general management of the research, performing calculations, preparing tables and figures with calculation results, article writing (50 %).

Dmitriy G. BEYN. Preparing article reviews, article writing, article text and drawings editing (50 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 12.03.2025, рецензия от первого рецензента получена 24.03.2025, рецензия от второго рецензента получена 24.03.2025, рецензия от третьего рецензента получена 07.04.2025, принята к публикации 11.04.2025.

The article was submitted 12.03.2025, first review received 24.03.2025, second review received 24.03.2025, third review received 07.04.2025, accepted for publication 11.04.2025.