
ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 629.463.65

Применение высокопрочной стали для создания полувагонов повышенной грузоподъемности

А. М. Орлова¹, К. П. Демин², Р. В. Попеску²

¹ ПАО «Научно-производственная корпорация «Объединенная вагонная компания», Россия, 119002, Москва, Арбат, 10

² ООО «Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий», Россия, 197046, Санкт-Петербург, Петроградская наб., 22, Литера А, помещ. 38-Н

Для цитирования: Орлова А. М., Демин К. П., Попеску Р. В. Применение высокопрочной стали для создания полувагонов повышенной грузоподъемности // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 3. С. 7–23. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-7-23

Аннотация

Цель: обоснование возможности повышения грузоподъемности полувагонов путем применения высокопрочной стали при изготовлении элементов несущей конструкции. **Методы:** анализ истории изменения грузоподъемности отечественных полувагонов. Численное исследование влияния предела текучести стали на массу конструкции по критериям прочности и жесткости для балки на двух шарнирных опорах, работающей на изгиб, а также по критерию устойчивости сжатой конструкции балки. Конечно-элементное моделирование нагруженности несущей конструкции полувагона с применением высокопрочной стали с целью подтверждения соответствия по нормируемым параметрам прочности и устойчивости требованиям действующих нормативов [1–3]. **Результаты:** произведен анализ значений грузоподъемности универсальных четырехосных полувагонов, построенных в период с начала производства первых отечественных вагонов по настоящее время. Приведены результаты исследования влияния предела текучести стали на массу конструкции по критериям прочности и жесткости для балки на двух шарнирных опорах, работающей на изгиб, а также по критерию устойчивости сжатой конструкции балки. Рассмотрены технические требования к высокопрочной стали для сварных конструкций грузовых вагонов. Приведены показатели, по которым должна производиться оценка пригодности металлопроката из высокопрочных сталей для грузового вагоностроения. Приведены результаты оценки прочности и устойчивости силовой конструкции полувагона модели 12-6744 с применением высокопрочной стали, подтверждающие соответствие конструкции вагона по нормируемым параметрам прочности и устойчивости требованиям действующих нормативов [2, 3]. Описаны преимущества полувагона модели 12-6744, а также экономический эффект от его эксплуатации для грузоотправителя. **Практическая значимость:** обоснована возможность применения высокопрочной стали для повышения грузоподъемности полувагонов. Разработан полувагон модели 12-6744 с применением высокопрочной стали. Приведены его преимущества, а также показан экономический эффект при эксплуатации такого вагона для грузоотправителя.

Ключевые слова: четырехосный полувагон, универсальный полувагон, повышенная грузоподъемность, высокопрочная сталь, оценка прочности и жесткости несущей конструкции полувагона, оценка устойчивости рамы полувагона.

Введение

В период с начала производства первых отечественных полувагонов (1860-е годы) [4, 5] по 1940-е годы наблюдалось активное развитие данного типа подвижного состава. От двухосных вагонов с деревянным кузовом произошел переход к цельнометаллическим сварным конструкциям, установленным на двухосные тележки. Осевая нагрузка увеличилась более чем в 3 раза (с 7,5 до 22 тс), при этом грузоподъемность возросла с 10 до 64 т. В дальнейший период до 2000-х годов происходило совершенствование конструкции, однако грузоподъемность повысилась незначительно (до 72 т) [6]. Переход к осевой нагрузке 25 тс ознаменовал появление во второй половине 2000-х годов полувагонов с грузоподъемностью 75 т, и последние 20 лет флагманские модели ведущих производителей выпускаются с таким показателем без дальнейшего увеличения, что позволяет говорить об определенной стагнации в части увеличения грузоподъемности [7–10].

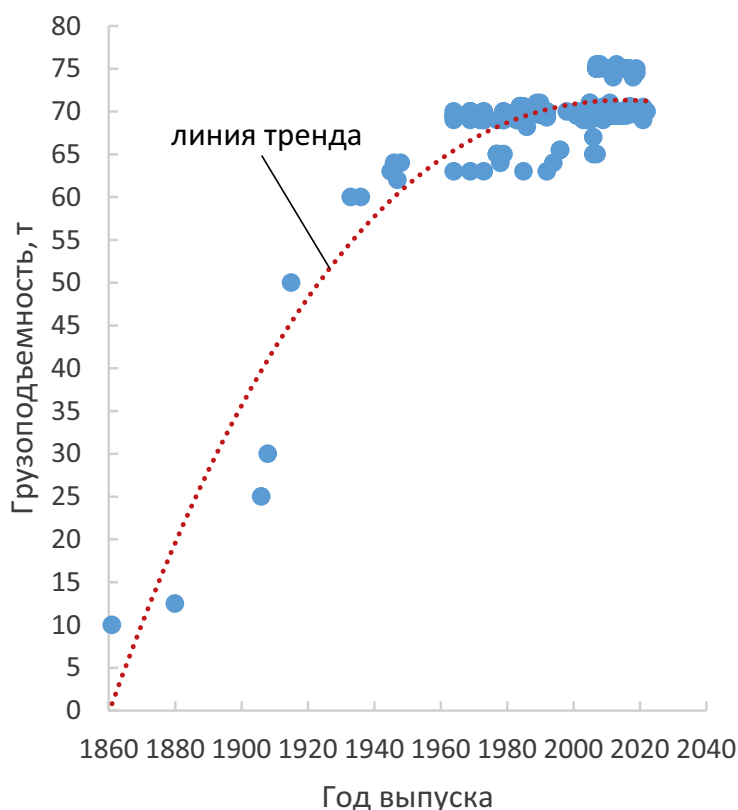


Рис. 1. История изменения грузоподъемности полувагонов с разгрузочными люками, построенных в период с 1860 год по н. в.

Повышения грузоподъемности возможно добиться за счет увеличения осевой нагрузки, применения новых конструктивных решений, а также за счет применения новых конструкционных материалов [11, 12]. Далее в статье рассмотрен вопрос применения новых конструкционных материалов, а именно высокопрочной стали, для повышения грузоподъемности полувагонов.

Обоснование возможности применения высокопрочной стали при изготовлении несущих элементов грузовых вагонов повышенной грузоподъемности

На сегодняшний день наиболее широко для несущих конструкций вагонов применяется низколегированная сталь марки 09Г2С по ГОСТ 19281-2014 «Прокат повышенной прочности. Общие технические условия» [13]. Наибольшее применение имеет прокат класса прочности 325 (шкворневая балка, отдельные элементы вагона толщиной 10 мм и более) и 345 (отдельные элементы вагона толщиной менее 10 мм). При этом в других отраслях тяжелого машиностроения широко применяются стали с более высокими механическими свойствами. Так, например, для изготовления и ремонта горно-шахтного оборудования, карьерной техники и навесного оборудования, силовых конструкций подъемных механизмов и грузового автотранспорта применяют высокопрочные стали с пределом текучести от 400 МПа и более [14]. Известны случаи применения в вагоностроении сталей с пределом текучести 500 МПа и более [15, 16].

С целью оценки возможности применения высокопрочной стали при изготовлении несущих элементов грузовых вагонов повышенной грузоподъемности было проведено исследование влияния предела текучести стали на массу конструкции по критериям прочности и жесткости для шарнирно опертой балки с расстоянием между опорами $2l$, м, с выступающими консольными участками длиной n , м (рис. 2, *а*), нагруженной, равномерно распределенной по длине нагрузкой q , кН/м, а также по критерию устойчивости сжатой конструкции балки (стержня), нагруженной сжимающей силой N , кН (рис. 2, *б*). Величина нагрузки q кН/м подобрана таким образом, чтобы обеспечить максимальные напряжения в балке, соответствующие напряжениям, возникающим в хребтовой балке при расчете кузова вагона. Варьировался предел текучести материала балки в диапазоне от 200 до 500 МПа.

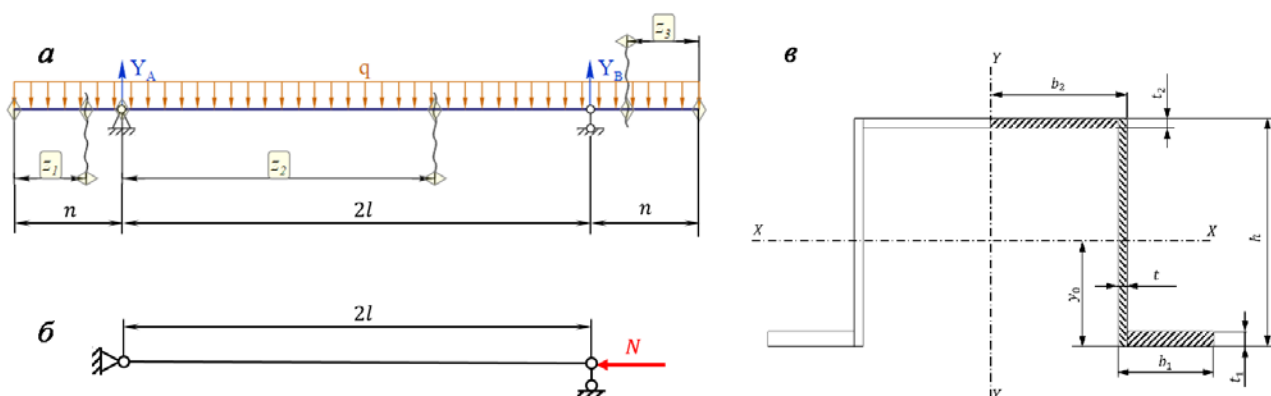


Рис. 2. Расчетные схемы:

а — шарнирно опертой балки для исследования влияния предела текучести стали на массу конструкции по критериям прочности и жесткости; *б* — стержня с шарнирно закрепленными концами; *в* — поперечное сечение исследуемой конструкции

Масса балки оценивалась из условия сохранения одинакового значения коэффициента запаса прочности по наиболее нагруженному сечению.

В качестве поперечного сечения исследуемой конструкции было принято составное сечение из двух зетовых профилей (рис. 2, в), имитирующее хребтовую балку полувагона. При этом конфигурация сечения сохранялась неизменной, варьированию подвергались толщины полок зетового профиля t_1 , t_2 и вертикальной стенки t соответственно.

На рис. 3, а показана зависимость массы балки m , кг, от предела текучести материала σ_T , МПа. С увеличением предела текучести масса балки уменьшается квадратично. Лимитирующее значение m_0 , кг, соответствует массе хребтовой балки из двух зетовых профилей по ГОСТ 5267.3-90 «Профиль зетовый для хребтовой балки. Сортамент», изготовленных из стали 10Г2БД по ГОСТ.5267.0-90 «Профили горячекатаные для вагоностроения. Общие технические условия» с пределом текучести 375 МПа. Такая хребтовая балка имеет наибольшее применение в конструкциях серийно выпускаемых полувагонов.

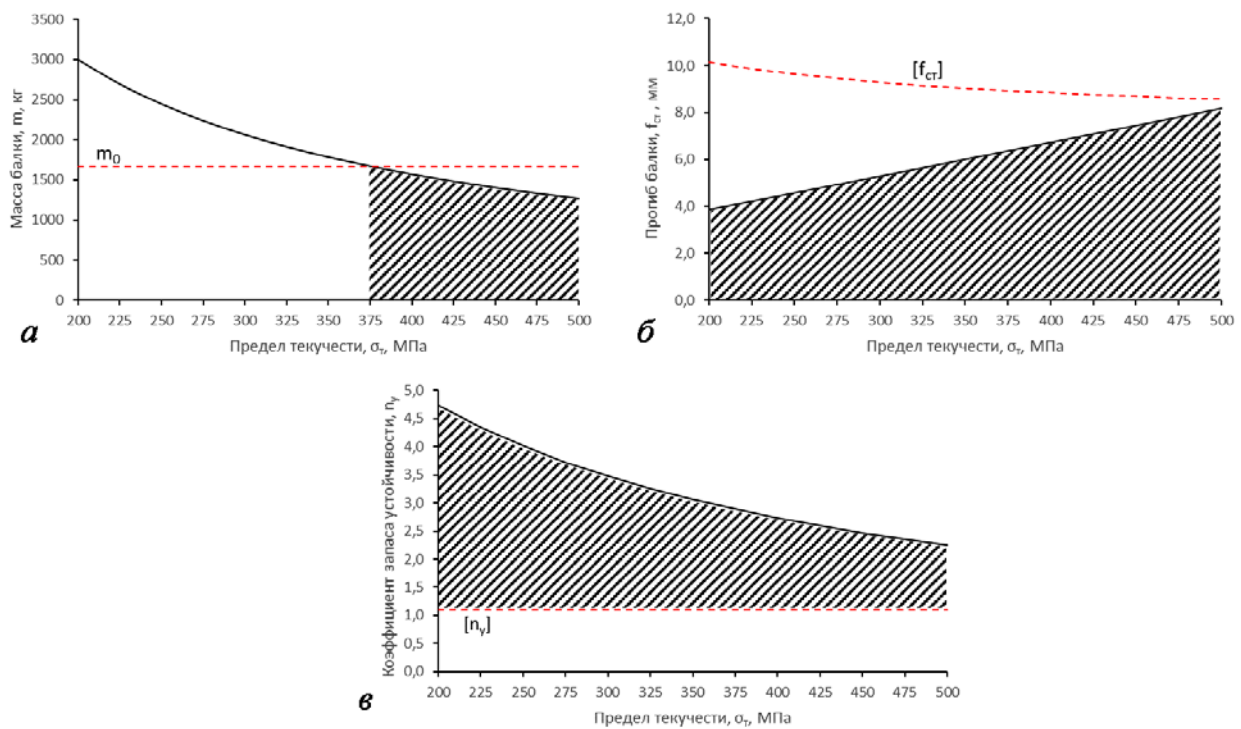


Рис. 3. Влияния предела текучести стали на массу конструкции по критериям прочности (а) и жесткости (б) для балки на двух шарнирных опорах, работающей на изгиб, а также по критерию устойчивости (в) сжатой конструкции балки (стержня)

На рис. 3, б показана зависимость статического прогиба балки f_{ct} , мм, от предела текучести материала σ_T , МПа. При рассматриваемой схеме нагружения наибольший прогиб наблюдается в середине балки и определяется по формуле:

$$f_{\text{ст}} = \frac{5}{384} \frac{q \cdot 2l^4}{EI_x} - \frac{q \cdot n^2 \cdot 2l^2}{16EI_x}, \quad (1)$$

где E — модуль упругости стали, принимают равным $2,1 \cdot 10^5$ МПа;

I_x — момент инерции поперечного сечения балки, см⁴.

В выражении (1) первый член правой части представляет прогиб, вызываемый нагрузкой, лежащей между опорами, второй — прогиб, вызываемый нагрузкой на консолях.

С увеличением предела текучести снижается масса балки за счет уменьшения толщин полок зетового профиля t_1 , t_2 и вертикальной стенки t , что в свою очередь приводит к снижению осевого момента инерции поперечного сечения I_x , см⁴, и увеличению прогиба балки $f_{\text{ст}}$, мм, соответственно.

Допускаемый прогиб $[f_{\text{ст}}]$, мм, определяется из условия, чтобы обеспечить разницу частот изгибных колебаний балки $f_{\text{э}(2)}$, Гц, и ее вертикальных колебаний на пружинах $f_{\text{э}(1)}$, Гц, не менее чем в 1,5 раза [2]:

$$\frac{f_{\text{э}(2)}}{f_{\text{э}(1)}} \geq 1,5. \quad (2)$$

Рассмотрим колебательную систему (рис. 4), состоящую из балки, нагруженную равномерно распределенной по длине нагрузкой q , кН/м, опертую на пружины в 2 точках.

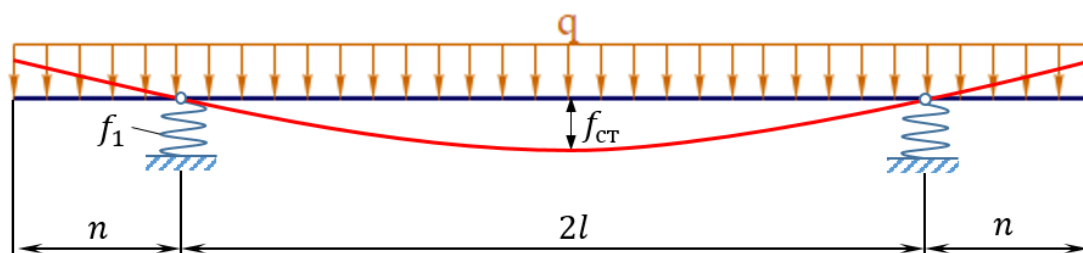


Рис. 4. Схема колебательной системы

Частоты вертикальных колебаний на пружинах $f_{\text{э}(1)}$, Гц, определяют по формуле

$$f_{\text{э}(1)} = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{f_1}}, \quad (3)$$

где a — коэффициент, принимается равным 1;

f_1 — расчетный статический прогиб пружин, мм, подобранный с учетом массы балки, нагруженной распределенной нагрузкой, исходя из вертикальной силовой характеристики рессорного подвешивания тележки модели 18-9855.

Частоты изгибных колебаний балки $f_{\nu(2)}$, Гц, определяют по формуле:

$$f_{\nu(2)} = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{f_{ст}}}, \quad (4)$$

Допускаемый прогиб балки $[f_{ст}]$, мм, с учетом условия (2) и формул (3), (4) определялся по формуле:

$$[f_{ст}] = \left(\frac{\sqrt{f_1}}{1,5} \right)^2. \quad (5)$$

Также было проведено исследование конструкции по критерию устойчивости. На рис. 3, в показана зависимость коэффициента запаса устойчивости n_y сжатого стержня от предела текучести σ_T , МПа.

Аналитическая проверка устойчивости стержня от действия сжимающей нагрузки производилась по формуле:

$$n_y = \frac{\sigma_{кр}}{\sigma_{сж}} \geq [n_y], \quad (6)$$

где $\sigma_{кр}$ — критическое напряжение сжатия, МПа;

$\sigma_{сж}$ — напряжение сжатия из расчета на прочность, МПа;

$[n_y]$ — допускаемый коэффициент запаса устойчивости, принимают равным 1,1 согласно [2], 1,6 — согласно [3].

Критическое напряжение сжатия $\sigma_{кр}$, МПа, определяют по формуле:

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}, \quad (7)$$

где λ — гибкость стержня, которую определяют по формуле:

$$\lambda = \frac{\beta \cdot 2l}{\sqrt{\frac{I}{F}}}, \quad (8)$$

где β — коэффициент приведения длины стержня, определяемый в зависимости от условий его закрепления и приложения нагрузки [3];

I — минимальный момент инерции поперечного сечения стержня, см⁴;

F — эффективная площадь поперечного сечения стержня, см².

Напряжение сжатия $\sigma_{сж}$, МПа, определяют по формуле:

$$\sigma_{сж} = \frac{F_{сж}}{F}, \quad (9)$$

где N — сила сжатия, принятая равной 2,5 МН (соответствует продольной нагрузке по I режиму [2, 3]).

Как видно из рис. 3, δ с увеличением предела текучести коэффициент запаса устойчивости снижается.

Проведенное исследование показало, что с увеличением предела текучести масса балки снижается, что позволяет сделать следующий вывод: применение высокопрочной стали при изготовлении несущих элементов грузовых вагонов способно снизить массу тары вагона и, как следствие, увеличить его грузоподъемность. Однако с увеличением предела текучести снижается жесткость и увеличивается гибкость стержня. При определенных условиях конструкция перестанет обладать требуемой жесткостью и устойчивостью. Таким образом, при разработке вагонных конструкций с применением высокопрочной стали наряду с оценкой прочности следует также оценивать жесткость и устойчивость конструкции.

Выбор высокопрочной стали для сварных конструкций грузовых вагонов

Важным является вопрос технических требований к конструкционным материалам для несущих элементов грузовых вагонов [17].

Оценка пригодности металлопроката из высокопрочных сталей для сварных конструкций грузовых вагонов должна производиться по обязательному комплексу показателей эксплуатационных свойств металла в сварных конструкциях. К таким показателям относятся:

- предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение;
- чувствительность к концентрации напряжений, определяющая сопротивление усталости конструкции;
- хладостойкость, определяющая сопротивление хрупкому разрушению при низких температурах;
- коррозионная стойкость в атмосферных условиях и в контакте с перевозимым грузом;
- скорость распространения усталостной трещины (живучесть);
- свариваемость (в том числе с другими сталями, применяемыми в вагоностроении) и обрабатываемость в условиях поточного производства на вагоностроительных заводах и в депо.

В соответствии с перечисленными требованиями была выбрана сталь с пределом текучести 420 МПа. АО «ВНИИЖТ» проведены комплексные исследования по подтверждению возможности ее применения для изготовления полувагонов повышенной грузоподъемности на соответствие [18–22].

По результатам проведенного исследования выявлено, что прокат из высокопрочной стали с пределом текучести 420 МПа по химическому составу основного металла, механическим характеристикам основного металла и пределу выносливости соответствует требованиям нормативных документов и выдержал испытания в соответствии с требованиями. Сварные соединения, изготовленные

по подобранной АО «ТВСЗ» технологии, по механическим свойствам, макро- и микроструктуре, твердости, выдержали испытания в соответствии с требованиями.

Положительные результаты проведенных исследований и испытаний послужили основанием для заключения о возможности применения проката из высокопрочной стали с пределом текучести 420 МПа с толщиной до 12 мм включительно в конструкциях грузовых вагонов.

Применение высокопрочной стали с пределом текучести 420 МПа в конструкции полувагона модели 12-6744

Выбранная высокопрочная сталь была применена в новом продукте линейки ПАО «НПК ОВК» — универсальном полувагоне модели 12-6744 с осевой нагрузкой 25 тс [12]. Ряд элементов (рис. 5) кузова вагона выполнены из высокопрочной стали с пределом текучести 420 МПа, что позволило снизить массу тары на 2 т и увеличить грузоподъемность на эту величину соответственно. На рисунке элементы из высокопрочной стали показаны оранжевым цветом: обшивка боковых и торцевых стен, верхняя обвязка, горизонтальные пояса и вертикальные стойки торцевых стен, концевая балка, а также вертикальный и нижний листы промежуточных балок рамы. Высокопрочная сталь применена в комбинации с типовой сталью 09Г2С класса прочности 325 (элементы толщиной 10 мм и более) и 345 (элементы толщиной менее 10 мм).

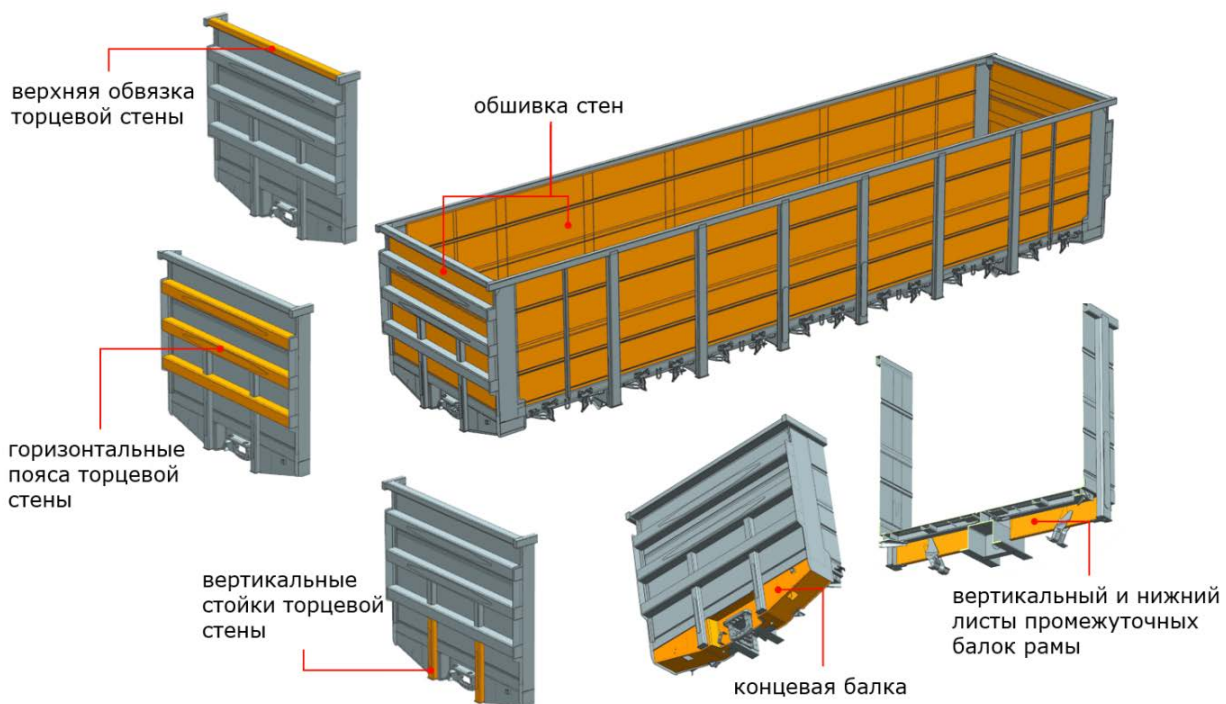


Рис. 5. Элементы из высокопрочной стали с пределом текучести 420 МПа в конструкции полувагона модели 12-6744

Расчетная оценка прочности, жесткости и устойчивости несущей конструкции полувагона модели 12-6744 повышенной грузоподъемности

Для подтверждения прочностных характеристик разработанного полувагона был проведен комплекс нормативных расчетов с применением метода конечных элементов.

На рис. 6 приведено напряженно-деформированное состояние кузова при ударе по I режиму — одного из определяющих с точки зрения прочности режиме нагружения согласно [2, 3]. По результатам расчетов были определены напряжения в наиболее нагруженных элементах:

– нижняя обвязка торцевой стены ($\sigma_{\text{экв}} = 369,87$ МПа, допускаемые напряжения $[\sigma] = 378,00$ МПа, коэффициент запаса прочности $k_{\text{зап}} = 1,02$);

– верхняя обвязка торцевой стены ($\sigma_{\text{экв}} = 354,83$ МПа, допускаемые напряжения $[\sigma] = 378,00$ МПа, коэффициент запаса прочности $k_{\text{зап}} = 1,07$);

– вертикальные стойки торцевой стены ($\sigma_{\text{экв}} = 330,92$ МПа, допускаемые напряжения $[\sigma] = 378,00$ МПа, коэффициент запаса прочности $k_{\text{зап}} = 1,14$);

– зона соединения верхнего листа концевой балки с хребтовой балкой ($s_{\text{экв}} = 290,39$ МПа, допускаемые напряжения $[s] = 292,50$ МПа, коэффициент запаса прочности $k_{\text{зап}} = 1,01$);

– зона соединения нижнего листа шкворневой балки с хребтовой балкой (точка 108: $s_{\text{экв}} = 290,73$ МПа, допускаемые напряжения $[s] = 292,50$ МПа, коэффициент запаса прочности $k_{\text{зап}} = 1,01$).

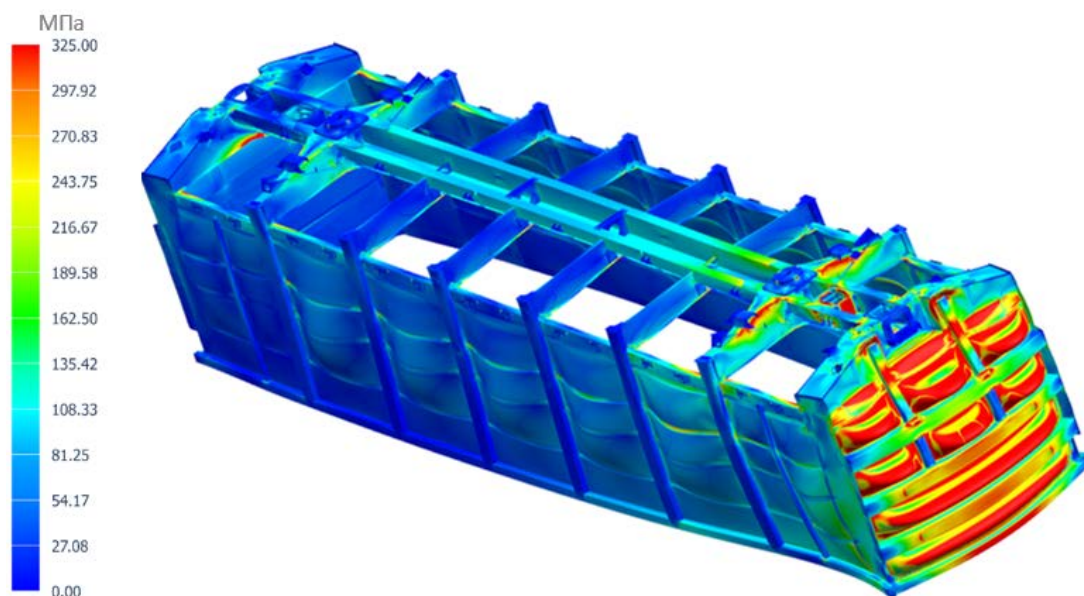


Рис. 6. Напряженно-деформированное состояние кузова вагона при ударе 3,5 МН (показаны эквивалентные напряжения по Мизесу в МПа)

Для оценки жесткости конструкции были определены деформации основных несущих элементов (рис. 7) при загрузке вагона насыпным грузом до полной грузоподъемности. Максимальные перемещения в основных несущих элементах составили:

- максимальный прогиб хребтовой балки — 4 мм;
- максимальные перемещения точек верхней обвязки боковых стен — 9 мм;
- максимальные перемещения точек стоек боковых стен — 9 мм;
- максимальные перемещения точек верхней обвязки торцевых стен — 1 мм.

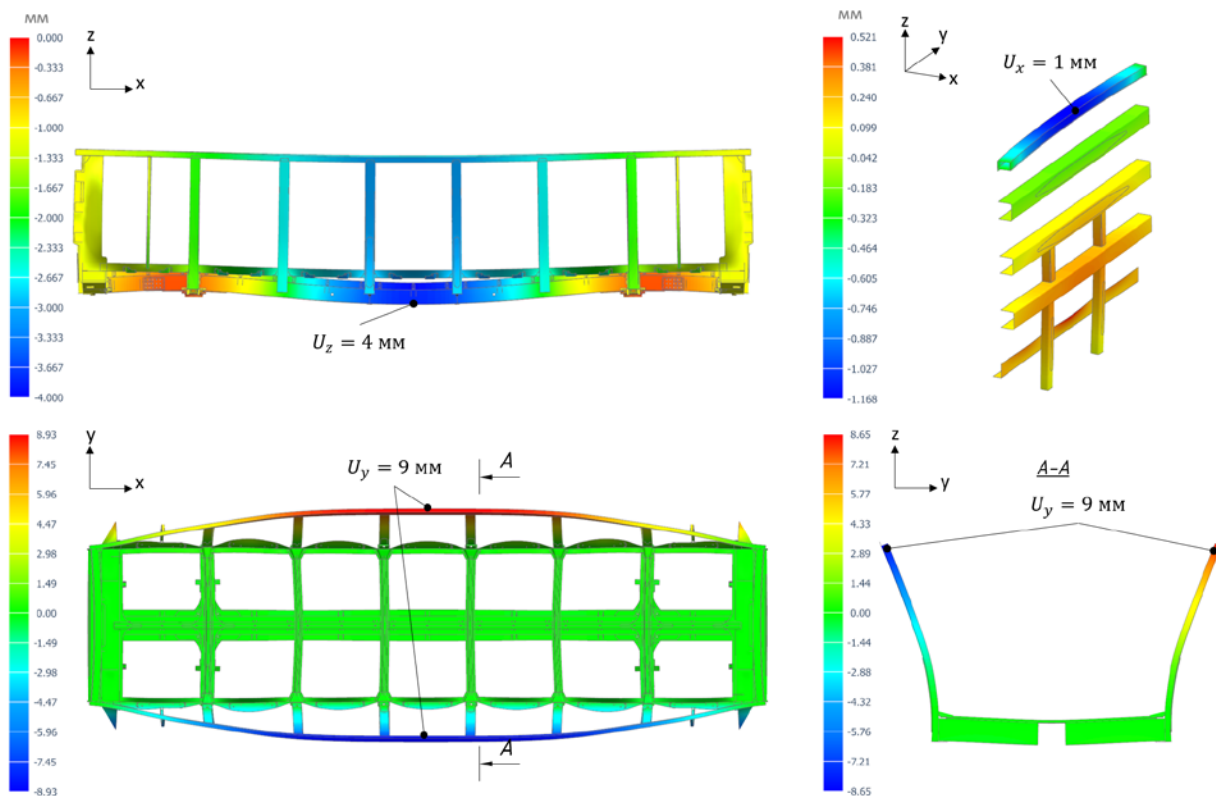


Рис. 7. Перемещения точек основных несущих элементов конструкции вагона от действия веса груза (часть элементов кузова скрыта)

Наряду с расчетом на прочность и жесткость была выполнена оценка устойчивости рамы вагона под действием сжимающей силы, действующей через автоцепки. Устойчивость сжатых элементов, согласно [2, 3], проверяется путем сравнения расчетного коэффициента запаса устойчивости n_y с допускаемым значением $[n_y]$. Расчетный коэффициент запаса устойчивости составил $n_y = 6,3$, что больше минимально допустимого значения $[n_y] = 1,1$, согласно [2], и $[n_y] = 1,6$, согласно [3]. Вид первой формы потери устойчивости приведен на рис. 8.

Для проверки отсутствия резонанса была проведена расчетная оценка собственных частот колебаний несущей конструкции вагона в сравнении с частотой колебаний кузова на рессорном подвешивании.

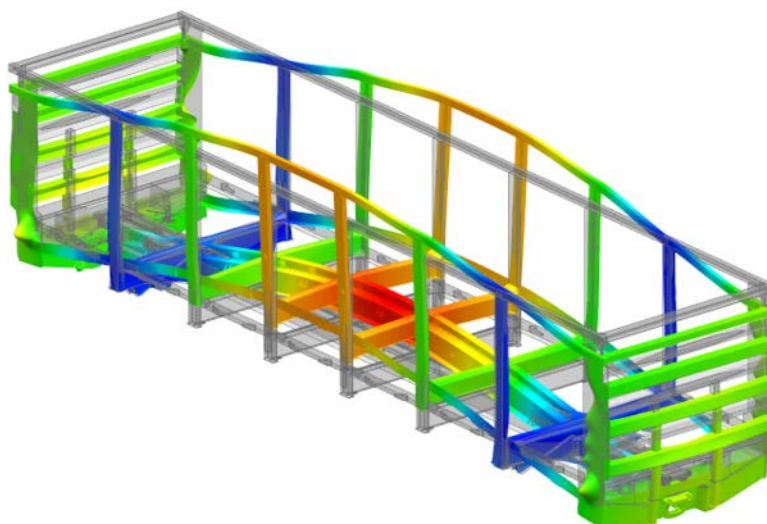


Рис. 8. Первая форма потери устойчивости рамы вагона

Частоту колебаний кузова на рессорах определяют по формуле:

$$f_k = \frac{a_k}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{f_1}}, \quad (10)$$

где a_k — коэффициент, равный 1,4 для кузова вагона;

f_1 — расчетный статический прогиб рессорного подвешивания порожнего вагона для тележки модели 12-9855 серийной конструкции составляет 0,025 м.

При подстановке данных в формулу получим $f_k = 4,42$ Гц.

Для оценки возможности возникновения резонанса выполнен модальный анализ методами численного моделирования. Первая собственная частота изгибных колебаний составила 36,46 Гц, что превышает частоту вертикальных колебаний кузова на рессорах более чем в 1,5 раза и подтверждает отсутствие резонанса. Соответствующая форма изгибных колебаний кузова приведена на рис. 9.

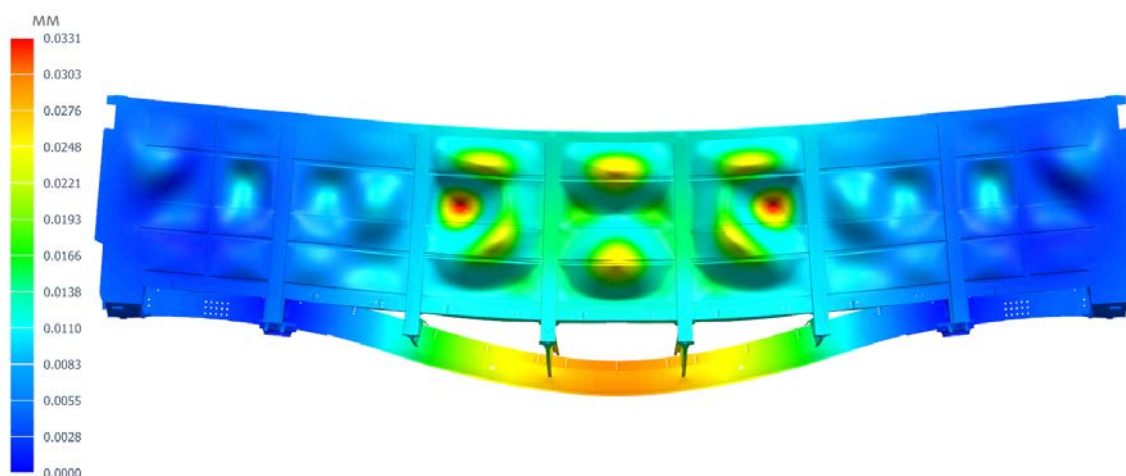


Рис. 9. Первая собственная форма изгибных колебаний кузова вагона

Выполненные расчеты подтвердили соответствие конструкции вагона по нормируемым параметрам прочности, жесткости и устойчивости действующим требованиям [2, 3].

Технико-экономические характеристики полувагона модели 12-6744

Полувагон модели 12-6744 (рис. 10) — эволюционная модель грузового вагона для угольной продукции, металлургических и строительных грузов, продукции горнодобывающих предприятий. Полувагон обладает следующими технико-экономическими характеристиками: грузоподъемность — 77 т (плюс 2 т к серийной модели 12-9853), объем кузова — 94 м³. Срок службы полувагона составляет 32 года.

Увеличенная относительно флагманских моделей за счет снижения массы тары более чем на 10% погрузка обеспечивает перевозку в поезде, сформированном из полувагонов модели 12-6744, дополнительно до 550 т груза по сравнению с составом из типовых аналогов с осевой нагрузкой 23,5 тс, или на 140 т дополнительно, при формировании маршрутов из инновационных вагонов грузоподъемностью 75 т. Это позволит увеличить провозную способность и обеспечить дополнительный вывоз грузов на участках с ограниченной пропускной способностью.



Рис. 10. Универсальный полувагон модели 12-6744
(источник фото: ПАО «НПК ОВК»)

Заключение

В работе рассмотрен вопрос применения высокопрочной стали при изготовлении полувагонов для повышения их грузоподъемности.

Исследовано влияние предела текучести стали на массу конструкции по критериям прочности и жесткости для балки на двух шарнирных опорах, работающей

на изгиб, а также по критерию устойчивости сжатой конструкции балки. Выявлено, что применение высокопрочной стали способно снизить массу конструкции, что в свою очередь позволяет повысить грузоподъемность вагона при применении такой стали в качестве конструкционного материала.

Приведены требования к высокопрочной стали для вагонных конструкций, в соответствии с которыми подобрана сталь с пределом текучести 420 МПа. По результатам комплексных исследований, проведенных АО «ВНИИЖТ», подтверждена возможность применения выбранной стали для сварных конструкций грузовых вагонов. Подобранная сталь была применена в качестве конструкционного материала полувагона модели 12-6744 — нового продукта в линейке ПАО «НПК ОВК».

Приведены результаты оценки прочности, жесткости и устойчивости силовой конструкции полувагона модели 12-6744, подтверждающие его соответствие требованиям действующих нормативов [1–3].

Описаны преимущества полувагона модели 12-6744, а также экономический эффект от его эксплуатации для грузоотправителя.

Библиографический список

1. ТР ТС 001/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава».
2. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартинформ, 2014.
3. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996.
4. Шадур Л. А. Развитие отечественного вагонного парка. М.: Транспорт, 1988. 279 с.
5. Мокршицкий Е. И. История вагонного парка железных дорог СССР. М.: Изд-во и 1-я тип. Трансжелдориздата, 1946. 203 с.
6. Типаж «Вагоны грузовые магистральные на 1986–2000 гг.». М.: ВНИИЖТ, ВНИИВ, 1986. 30 с.
7. О результатах вывода на рынок тележки принципиально новой конструкции на примере 18-9855 / А. М. Орлова [и др.] // Техника железных дорог. 2023. № 2 (62). С. 34–41.
8. Каталог продукции ОВК // Научно-производственная корпорация «Объединенная вагонная компания». URL: <https://www.uniwagon.com/#!/products> (дата обращения: 03.05.2024).
9. Смольянинов А. В., Колясов К. М. Анализ параметров и конструктивных решений кузовов инновационных вагонов // Транспорт Урала. 2020. № 4 (67). С. 34–39.
10. Смольянинов А. В. Анализ конструкций и параметров полувагонов, используемых для тяжеловесного движения // Транспорт Урала. 2017. № 4 (55). С. 26–30.
11. Новоселов А. Ю., Коротков Д. С., Попеску Р. В. Улучшение технико-экономических характеристик полувагонов // Железнодорожный транспорт. 2023. № 7. С. 26–32.

12. Орлова А. М., Демин К. П., Попеску Р. В. Как повысить эффективность полувагона: направления снижения технического коэффициента тары // Транспорт РФ. 2023. № 3–4 (106–107). С. 33–38.

13. ГОСТ 19281-2014. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия.

14. Высокопрочные стали с экономным легированием для карьерного транспорта и горнодобывающей техники / В. Н. Никитин [и др.] // Сталь. 2016. № 10. С. 57–66.

15. Бороненко Ю. П., Филиппова И. О. Использование высокопрочных сталей в вагоностроении // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 3 (58). С. 16–19.

16. Таничева Н. А., Федоров И. В., Филиппова И. О. Съёмное оборудование для перевозки лесоматериалов: новые технические решения и применение высокопрочных сталей // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2020. Т. 17, № 1. С. 117–128.

17. ГОСТ 32.153-2000. Металлопрокат для кузовов грузовых вагонов нового поколения. Технические требования.

18. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.

19. ГОСТ 7268-82. Сталь. Метод определения склонности к механическому старению по испытанию на ударный изгиб.

20. ГОСТ 14019-2003. Материалы металлические. Метод испытания на изгиб.

21. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств.

22. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.

Дата поступления: 14.06.2024

Решение о публикации: 18.07.2024

Контактная информация:

ОРЛОВА Анна Михайловна — докт. техн. наук, профессор, генеральный директор ООО «Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий» (ООО «ВНИЦТТ»), директор дирекции научно-технического развития ПАО «Научно-производственная корпорация «Объединенная вагонная компания» (ПАО «НПК «ОВК»); aorlova@uniwagon.com

ДЕМИН Константин Павлович — директор научно-исследовательской дирекции ООО «Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий» (ООО «ВНИЦТТ»); kdemin@tt-center.ru

ПОПЕСКУ Роман Витальевич — инженер-исследователь ООО «Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий» (ООО «ВНИЦТТ»), аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I; rpopesku@tt-center

Use of high-strength steel to create high capacity gondola cars

A. M. Orlova, K. P. Demin, R. V. Popesku

¹ PJSC Research and Production Corporation “United Wagon Company”, 10, Arbat, Moscow, 119002, Russia

² All-Union Research and Development Center for Transport Technologies LLC, Petrogradskaya emb., 22, lit. A, room 38-N, st. Petersburg, 197046, Russia

For citation: Orlova A. M., Demin K. P., Popesku R. V. Use of high-strength steel to create high capacity gondola cars // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 3. P. 7–23. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-7-23

Abstract

Purpose: substantiation of the possibility to increase the load capacity of gondola cars using high-strength steel in the car body structure. **Methods:** gondola cars load capacity changing analysis. Numerical research of the effect of the steel yield strength value on the mass of the beam structure according to the criteria of strength and stiffness for a beam on two hinged supports operating in bending, and also according to the buckling criteria of a compressed beam. Gondola car body structure finite element analysis in order to confirm the strength and buckling parameters with the normative requirements. **Results:** the analysis of load capacity of universal four-axle gondola cars built in the period from the beginning of production of the first Russian cars up to the present time was performed. Results of the analysis of the effect of steel yield strength on the mass of the structure according to the strength criteria and stiffness for a beam on two hinged supports operating in bending, and also according to the buckling criteria of a compressed beam was presented. High-strength steel technical requirements for welded structures of freight wagons is considered. Parameters for evaluating the suitability of rolled high-strength steel for freight wagon construction are given. The results of strength and stability analysis of the gondola car model 12-6744 with high-strength steel, which confirm the design compliance of the car in terms of normative parameters of strength and stability with the requirements of the existing standards are given. The gondola car model 12-6744 advantages are described, as well as the economic effect of its operation for the consignor. **Practical importance:** the possibility of using high-strength steel to increase the load capacity of gondola cars is substantiated. The gondola car model 12-6744 with high-strength steel was designed. Its advantages are given, and the economic effect of operating such a wagon for the consignor is shown.

Keywords: four-axle gondola car, universal gondola car, increased load capacity, high-strength steels, evaluation of strength and stiffness of the gondola car body structure, gondola frame structure buckling analysis

References

1. TR TS 001/2011. Tekhnicheskij reglament Tamozhennogo soyuza “O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava”. (In Russian)
2. GOST 33211-2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam. M.: Standartinform, 2014. (In Russian)
3. Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznih dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnyh). M.: GosNIIV-VNIIZHT, 1996. (In Russian)
4. Shadur L.A. Razvitie otechestvennogo vagonnogo parka. M.: Transport, 1988. 279 s. (In Russian)
5. Mokrshickij E.I. Istoriya vagonnogo parka zheleznih dorog SSSR. M.: Izd-vo i 1-ya tip. Transzheldorizdata, 1946. 203 s. (In Russian)

6. Tipazh "Vagony gruzovye magistral'nye na 1986–2000 gg.". M.: VNIIZHT, VNIIV, 1986. 30 s. (In Russian)
7. O rezul'tatah vyvoda na rynek telezhki principial'no novej konstrukcii na primere 18-9855 / A. M. Orlova [i dr.] // Tekhnika zheleznyh dorog. 2023. № 2 (62). S. 34–41. (In Russian)
8. Katalog produkcii OVK // Nauchno-proizvodstvennaya korporaciya "Ob"edinennaya vagonnaya kompaniya". URL: <https://www.uniwagon.com/#!/products> (data obrashcheniya: 03.05.2024). (In Russian)
9. Smol'yaninov A. V., Kolyasov K. M. Analiz parametrov i konstruktivnyh reshenij kuzovov innovacionnyh vagonov // Transport Urala. 2020. № 4 (67). S. 34–39. (In Russian)
10. Smol'yaninov A. V. Analiz konstrukcij i parametrov poluvagonov, ispol'zuemyh dlya tyazhelovesnogo dvizheniya // Transport Urala. 2017. № 4 (55). S. 26–30. (In Russian)
11. Novoselov A. Yu., Korotkov D. S., Popesku R. V. Uluchshenie tekhniko-ekonomicheskikh harakteristik poluvagonov // Zheleznodorozhnyj transport. 2023. № 7. S. 26–32. (In Russian)
12. Orlova A. M., Demin K. P., Popesku R. V. Kak povysit' effektivnost' poluvagona: napravleniya snizheniya tekhnicheskogo koefficienta tary // Transport RF. 2023. № 3–4 (106–107). S. 33–38. (In Russian)
13. GOST 19281-2014. Prokat povyshennoj prochnosti. Obshchie tekhnicheskie usloviya. (In Russian)
14. Vysokoprochnye stali s ekonomnym legirovaniem dlya kar'ernogo transporta i gornodobyvayushchej tekhniki / V. N. Nikitin [i dr.] // Stal'. 2016. № 10. S. 57–66. (In Russian)
15. Boronenko Yu. P., Filippova I. O. Ispol'zovanie vysokoprochnyh stalej v vagonostroenii // Transport Rossijskoj Federacii. 2015. № 3 (58). S. 16–19. (In Russian)
16. Tanicheva N. A., Fedorov I. V., Filippova I. O. S"emnoe oborudovanie dlya perevozki lesomaterialov: novye tekhnicheskie resheniya i primenenie vysokoprochnyh stalej // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2020. T. 17, № 1. S. 117–128. (In Russian)
17. GOST 32.153-2000. Metalloprokat dlya kuzovov gruzovyh vagonov novogo pokoleniya. Tekhnicheskie trebovaniya. (In Russian)
18. GOST 9454-78. Metally. Metod ispytaniya na udarnyj izgib pri ponizhennyh, komnatnoj i povyshennyh temperaturah. (In Russian)
19. GOST 7268-82. Stal'. Metod opredeleniya sklonnosti k mekhanicheskomu stareniju po ispytaniyu na udarnyj izgib. (In Russian)
20. GOST 14019-2003. Materialy metallicheskie. Metod ispytaniya na izgib. (In Russian)
21. GOST 6996-66. Svarnye soedineniya. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svojstv. (In Russian)
22. GOST 5639-82. Stali i splavy. Metody vyyavleniya i opredeleniya velichiny zerna. (In Russian)

Received: 14.06.2024

Accepted: 18.07.2024

Author's information:

Anna M. ORLOVA — D. Sci. in Engineering, professor, General Director of All-Union Research and Development Center for Transport Technologies LLC, Director of Directorate of Scientific and Technical Development of PJSC Research and Production Corporation “United Wagon Company”; aorlova@uniwagon.com

Konstantin P. DEMIN — Director of the Research Directorate of All-Union Research and Development Center for Transport Technologies LLC; kdemin@tt-center.ru

Roman V. POPESKU — Engineer Researcher of Research Directorate of All-Union Research and Development Center for Transport Technologies LLC, Postgraduate Student; rpopesku@tt-center.ru