

УДК 629.463.65:629.023

## Топологическая оптимизация поддерживающей балки пола полувагона с глухим кузовом

Д. Г. Бейн<sup>1</sup>, Л. В. Цыганская<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «НВЦ «Вагоны», Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 22, литера М, 1-й этаж, пом. 5н

<sup>2</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Бейн Д. Г., Цыганская Л. В. Топологическая оптимизация поддерживающей балки пола полувагона с глухим кузовом // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 17–33. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-17-33

### Аннотация

**Цель:** оценка возможности снижения массы тары полувагона с глухим кузовом за счет снижения массы поддерживающих пол сварных балок с применением метода топологической оптимизации конструкции. **Метод:** приведен краткий обзор известных методов параметрической оптимизации. Проведена топологическая оптимизация конструкции сварной поддерживающей балки с использованием метода ESO (Evolutionary Structural Optimization). Оптимизированная конструкция поддерживающей балки была проверена на прочность при действии сочетания расчетных нагрузок по режиму 1в согласно ГОСТ 33211 при действии сжимающей силы 2,5 МН. **Результаты:** применение топологической оптимизации для сварных балок рам грузовых вагонов с ограничением на изменение толщины листов позволяет определить приоритетные направления изменений поперечного сечения балки. При этом после технологической обработки результатов оптимизации можно получить конструкцию балки со сниженной массой относительно исходного варианта, на рассмотренном примере — в 2,4 раза (на 58 %). **Практическая значимость:** показана возможность применения метода топологической оптимизации применительно к решению инженерных задач при проектировании металлоконструкций грузовых вагонов. Предложена конструкция поддерживающей балки, вертикальный лист которой имеет трапециевидальные вырезы, а нижний лист — переменную ширину, что позволило снизить массу балки с сохранением ее прочностных характеристик.

**Ключевые слова:** полувагон, рама полувагона, прочность, топологическая оптимизация

### Введение

Снижение металлоемкости грузовых вагонов является актуальной задачей, решение которой обеспечивает повышение эффективности и снижение стоимости вагона.

В работах [1–4] показана возможность применения высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов в конструкциях грузовых вагонов для снижения массы тары грузовых вагонов. В работе [5] отмечено, что применение новых конструктивных решений, обеспечивающих снижение металлоемкости элементов вагона при условии сохранения требуемых показателей прочности, способно снизить технический коэффициент тары вагона.

Для полувагонов с глухим кузовом снижение коэффициента тары возможно в том числе за счет снижения массы продольных подкрепляющих (поддерживающих) балок пола.

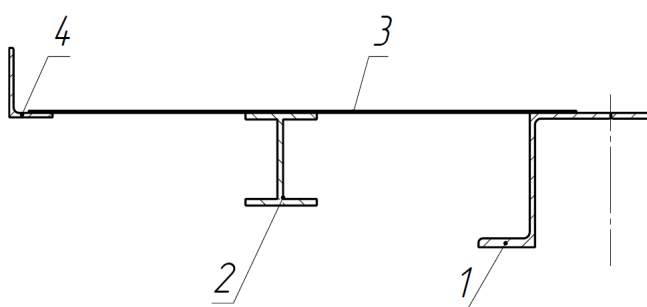
Целью проведенных исследований была оценка возможности снижения массы тары полувагона с глухим кузовом за счет снижения массы поддерживающих пол балок с применением метода топологической оптимизации конструкции.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

- разработка упрощенной конечно-элементной модели поддерживающей балки и проведение оптимизационных расчетов с использованием инструментов топологической оптимизации;
- проведение технологической обработки результатов оптимизации;
- оценка прочности конструкции полувагона с оптимизированными продольными поддерживающими балками при действии нормативных расчетных нагрузок, регламентированных ГОСТ 33211 [6].

Объект исследования — полувагон с глухим кузовом (с линейными размерами универсального полувагона), имеющий продольные поддерживающие балки рамы и настил пола из плоского листа. Схема рамы такого полувагона показана на рис. 1.

Актуальность работы связана как с общей отраслевой тенденцией на создание конструкций вагонов со сниженным коэффициентом тары [1–5], так и с повреждаемостью таких балок в эксплуатации [7] от действий сосредоточенных вертикальных сил (удары ковшом грейдера, падение глыб груза). Пример типового повреждения поддерживающей балки пола полувагона приведен на рис. 2.



1 — хребтовая балка; 2 — поддерживающая балка;  
3 — настил пола; 4 — нижняя обвязка



Рис. 2. Повреждение поддерживающей балки полувагона с глухим кузовом (фото Д. Г. Бейна)

Рис. 1. Эскиз поперечного сечения рамы полувагона с глухим кузовом

## Материалы и методы

На данный момент известно большое количество методов параметрической оптимизации, которые принято разделять на две категории: поисковые и непоисковые (аналитические) [8].

К аналитическим относятся методы решения экстремальных задач, основанные на применении методов дифференциального и вариационного исчисления. Сложность применения непоисковых методов обусловлена тем, что необходимо выразить функции цели и функции ограничений аналитически через параметры проектирования.

Поисковые методы, основанные на использовании теории математического программирования, условно разделяют на методы направленного и ненаправленного поиска.

Процедура методов направленного поиска представляет собой итерационный процесс, на каждом шаге которого изменяются параметры исходной конструкции. Методы ненаправленного поиска также основаны на использовании итерационных процессов, но при этом уступают в быстродействии методам направленного поиска.

В зависимости от способа назначения изменений параметров на каждой итерации выделяют следующие методы направленного поиска:

- детерминированного направленного поиска;
- направленного случайного поиска;
- покоординатной оптимизации;
- градиентный метод;
- метод возможных направлений;
- метод пересчета;
- линейное и динамическое программирование [9].

Из методов случайного поиска для параметрической оптимизации кузовов вагонов используются генетические алгоритмы (эволюционное моделирование) [10]. В основе указанных алгоритмов лежат принципы эволюции видов живой природы. Генетические алгоритмы позволяют получать рациональные решения как на непрерывных, так и на дискретных множествах параметров проектирования.

Топологическая оптимизация — это метод оптимизации формы, который использует алгоритмические модели для наилучшей компоновки материалов в заданном пользователем пространстве при заданных нагрузках и граничных условиях. Топологическая оптимизация применяется для повышения эффективности конструкции за счет удаления избыточного материала из областей, которые не требуют значительных нагрузок, в том числе для снижения массы [11]. Существует несколько методов топологической оптимизации.

Так как современные инженерные программные комплексы (ПК), такие как ANSYS и Solid Works, обладают необходимым функционалом для решения задач топологии конструкций, применение такого метода оптимизации при решении практических инженерных задач в области грузового вагоностроения становится все более перспективным. Например, в работе [11] рассмотрены подходы к топологической оптимизации конструкции типовой балки для железнодорожного подвижного состава с использованием ANSYS, исследован классический случай консольного нагружения силой. В статье [12] дается общее представление топологической оптимизации для линейно-упругих конструкций и рассматривается решение задач оптимизации топологии конструкций на базе программного комплекса (ПК) ANSYS. Решение задач топологической оптимизации конструкций с использованием программы ANSYS также рассмотрено в работе [13].

В работе [5] отмечено, что применение новых конструктивных решений зачастую усложняет технологию изготовления и ремонта вагона. Однако с учетом внедрения новых технологий изготовления деталей (например, лазерной резки) применение оригинальных технических решений, полученных с помощью топологической оптимизации, может открыть новые конструктивные направления для снижения коэффициента тары и, соответственно, для улучшения технических характеристик железнодорожной техники.

### Математическая постановка задачи оптимизации

Применительно к кузовам вагонов задача оптимального проектирования выражается адаптивным функционалом (1) [9]:

$$J = F(J_m + J_n + J_s + J_p) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $J_m$  — приведенные затраты на конструкционные материалы;

$J_n$  — приведенные затраты на изготовление кузова;

$J_s$  — приведенные затраты на эксплуатацию;

$J_p$  — приведенные затраты на ремонт.

От приведенных затрат на конструкционные материалы  $J_m$  зависят приведенные затраты на изготовление конструкции  $J_n$  (протяженность сварных швов, количество деталей), затраты на эксплуатацию  $J_s$  (стоимость перевозки тары), затраты на ремонт  $J_p$  (количество мест концентрации напряжений, прочностные характеристики и надежность конструкции). Приведенные затраты на конструкционные материалы  $J_m$  определяются стоимостью материалов  $C_{M_i}$  и массой несущих элементов  $M_i$  [9]:

$$J_m = \sum_{i=1}^n (C_{M_i} \cdot M_i), \quad (2)$$

где  $n$  — число несущих элементов.

Так как стоимость материалов  $C_{M_i}$  зависит от массы конструкции, минимальная металлоемкость кузова является предпочтительным критерием. В этом случае функция цели имеет вид:

$$M = \sum_{i=1}^n (\gamma_i \cdot L_i \cdot F_i), \quad (3)$$

где  $\gamma$  — удельный вес материала  $i$ -го несущего элемента;

$L_i$  — длина  $i$ -го несущего элемента;

$F_i$  — площадь поперечного сечения  $i$ -го несущего элемента (для переменных по длине размеров поперечных сечений элемента — эквивалентная площадь).

Соответственно, металлоемкость кузова зависит как от числа несущих элементов  $n$ , так и от размеров их поперечных сечений.

### **Пример топологической оптимизации поддерживающей балки пола полувагона**

#### *Исходные данные*

В работе [8] отмечено, что для оптимизации несущей системы кузова важно знать, какие нагрузки или их сочетания вызывают максимальные напряжения в несущих элементах. В работах [8] и [14] предложено проводить оптимизационные расчеты поддерживающей балки от нагрузки 50 кН (расчетный режим согласно «Нормам ...» [15]).

Рассмотрим пример топологической оптимизации поддерживающей балки пола полувагона с глухим кузовом с использованием упрощенной расчетной схемы: балка длиной 1750 мм с жестким закреплением по консолям.

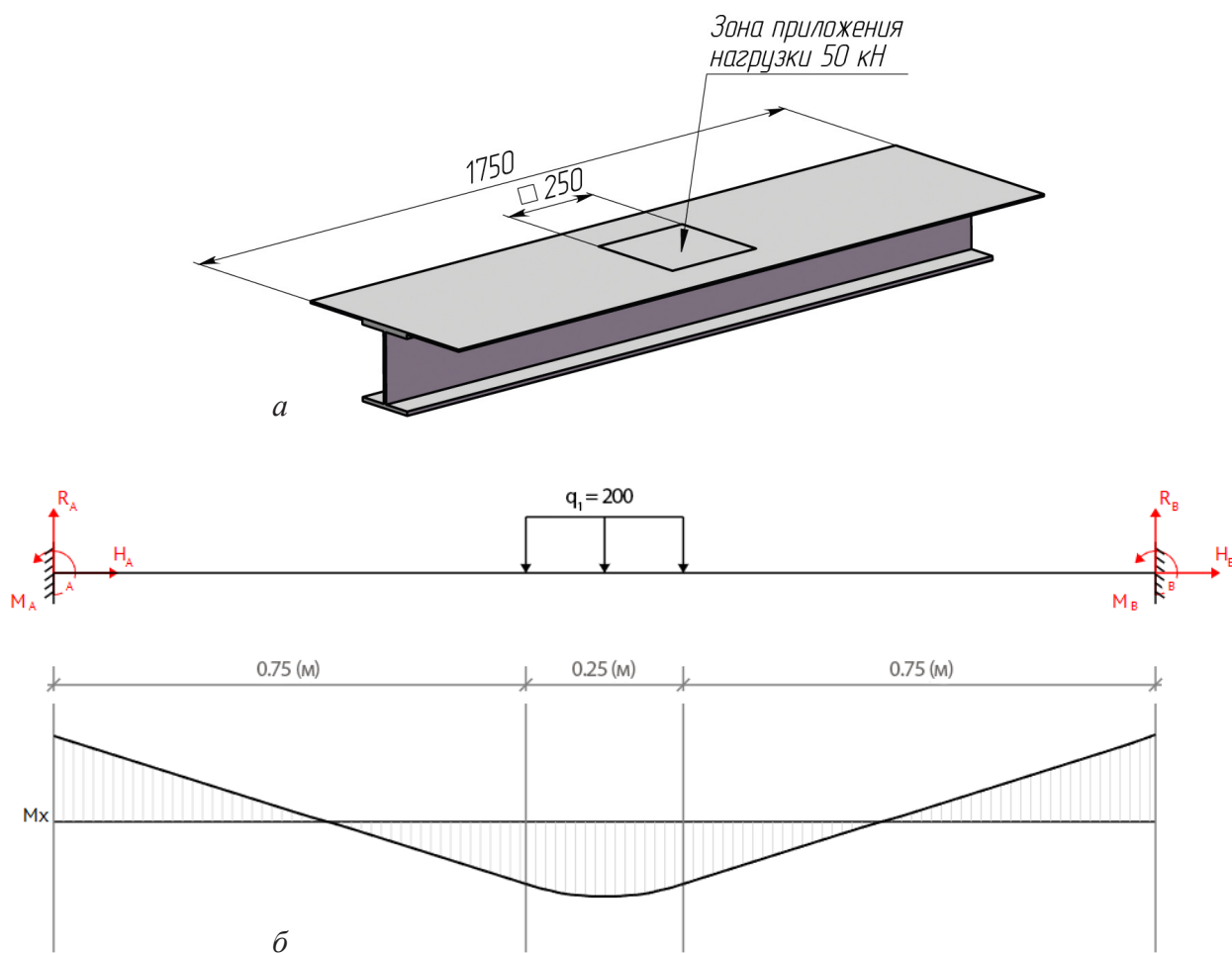
На балку действует нагрузка 50 кН, распределенная на площадке  $250 \times 250$  мм в середине балки. Материал балки — сталь с допускаемыми напряжениями  $[\sigma] = 280$  МПа.

Задачи расчета:

- рассчитать по МКЭ на прочность балку исходной конструкции;
- провести топологическую оптимизацию балки с ограничениями на изменение ее толщин;
- провести топологическую оптимизацию балки без ограничений на изменение ее толщин.

Функция цели топологической оптимизации: минимум массы по критерию прочности. В поперечное сечение балки включена часть настила пола с учетом рекомендаций к построению поперечных сечений, приведенных в «Нормах ...» [15].

3D-модель балки с частью настила показана на рис. 3.



**Рис. 3.** Упрощенная расчетная схема поддерживающей балки: *а* — исходная 3D-модель; *б* — расчетная схема и эпюра изгибающего момента

### Описание расчетной модели

Для моделирования была разработана объемная конечно-элементная модель на основе твердотельной 3D-модели с разбиением на конечно-элементную сетку на основе смешанной кривизны.

Сведения о конечно-элементной сетке:

- максимальный размер элемента: 10,06 мм;
- минимальный размер элемента: 10,06 мм;
- всего узлов: 227 188;
- всего элементов: 119 525.

Были заданы технологические и эксплуатационные ограничения:

- толщина листа настила пола не изменялась;
- толщина стенок и полок двутавра балки: 3 мм min (ограничение по коррозионной стойкости);
- выполнение условия симметричности относительно продольной и поперечной плоскостей симметрии балки.

Расчетная конечно-элементная модель показана на рис. 4.

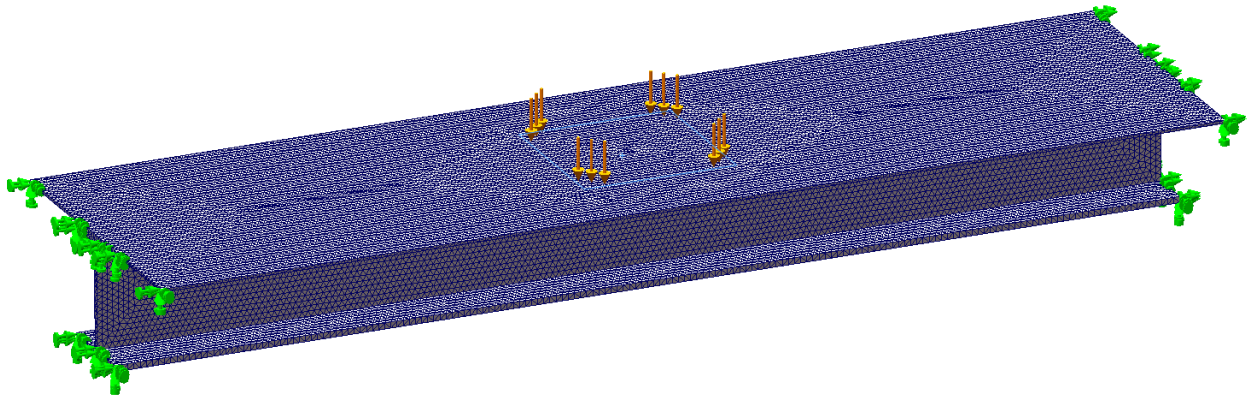
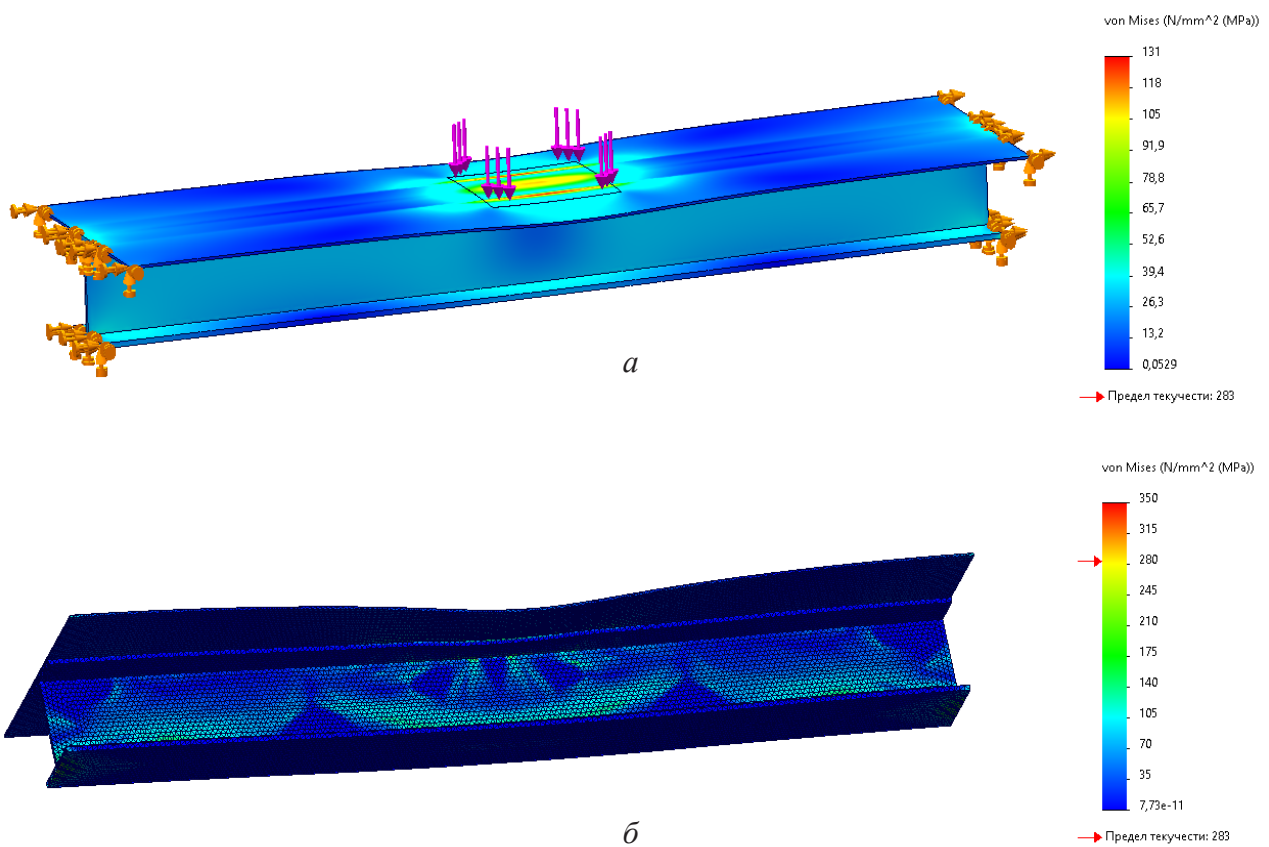
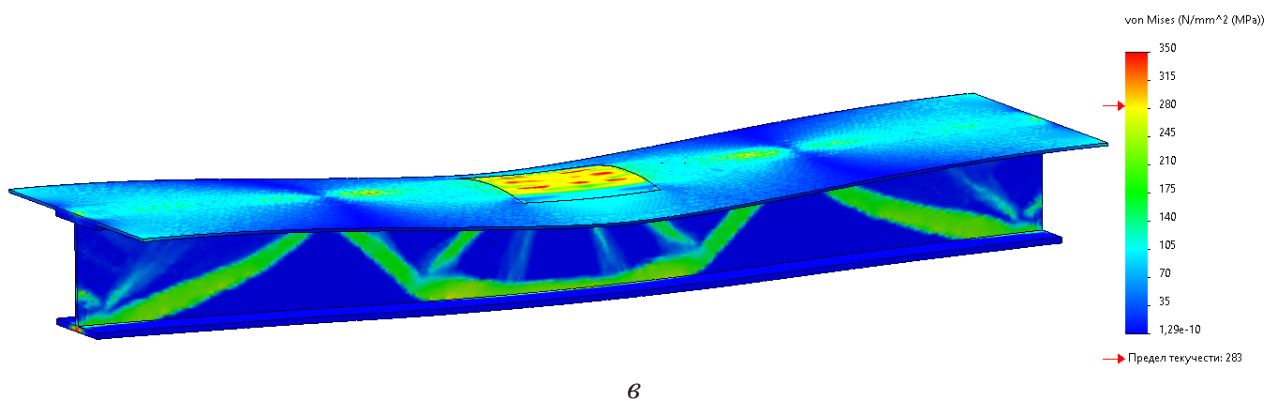


Рис. 4. Расчетная конечно-элементная модель балки

### Результаты топологической оптимизации

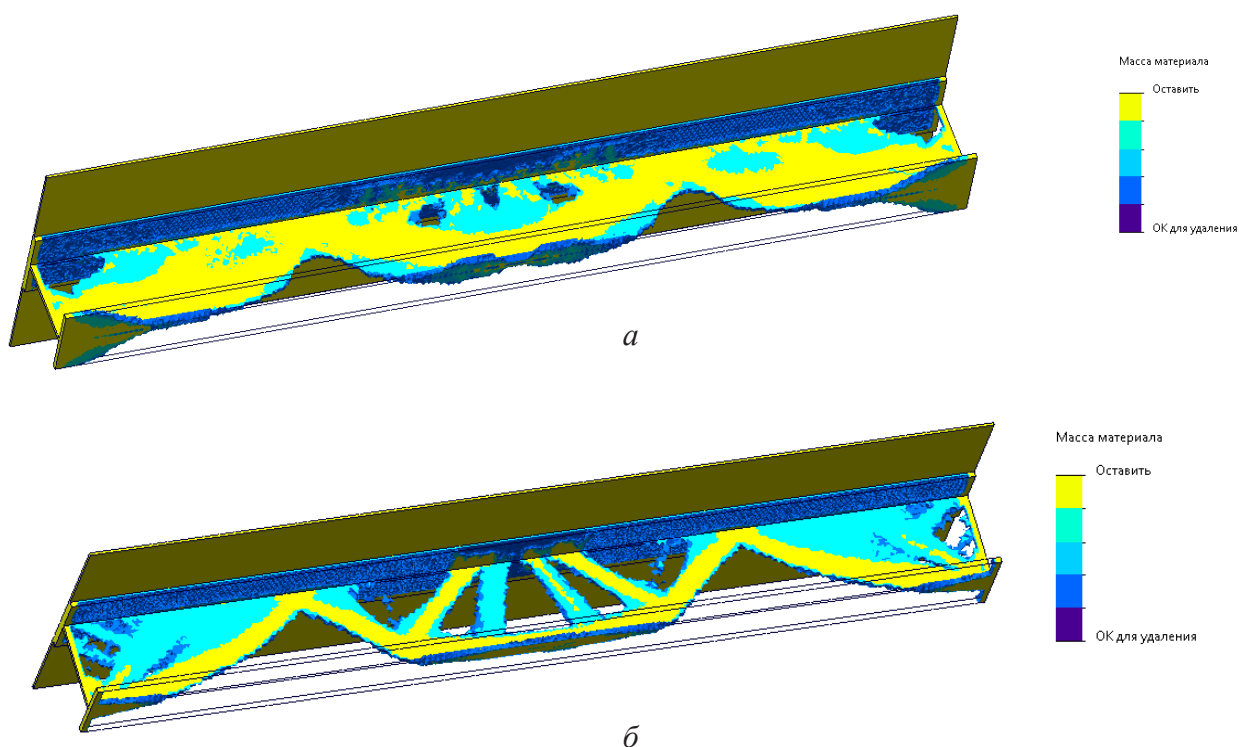
Диаграммы распределения эквивалентных напряжений (МПа) в балке исходной конструкции и в балках после завершения топологической оптимизации показаны на рис. 5.





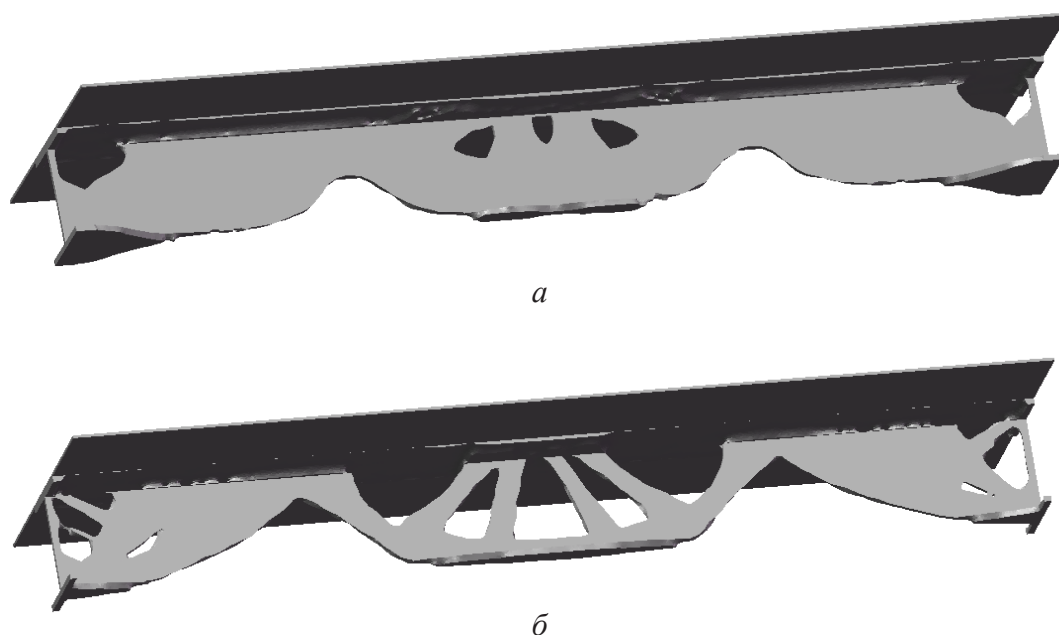
**Рис. 5.** Диаграмма распределения эквивалентных напряжений  $\sigma$  (МПа) в поддерживающей балке: *а* — исходной конструкции; *б* — после топологической оптимизации балки с ограничениями на изменение толщин стенки и полок двутавра; *в* — после топологической оптимизации балки без ограничений на изменение толщин стенки и полок двутавра

На рис. 6 показана диаграмма приоритета удаления металла балки по результатам топологической оптимизации с ограничениями на изменение толщин стенки и полок двутавра (рис. 6 *а*) и без указанных ограничений (рис. 6 *б*).



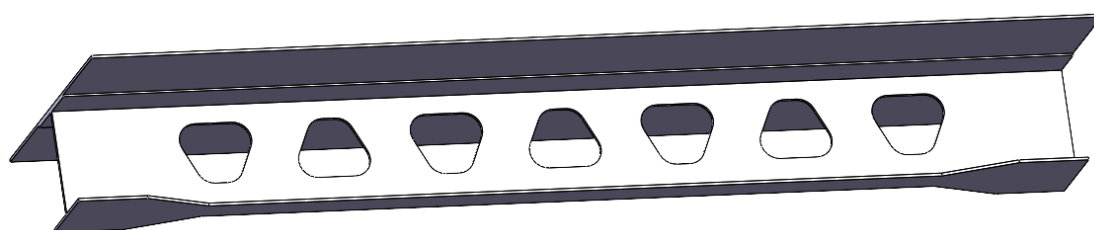
**Рис. 6.** Диаграмма приоритета удаления металла балки по результатам топологической оптимизации: *а* — с ограничениями на изменение толщин стенки и полок двутавра; *б* — без ограничений на изменение толщин стенки и полок двутавра

На рис. 7 показан внешний вид балки по результатам топологической оптимизации.



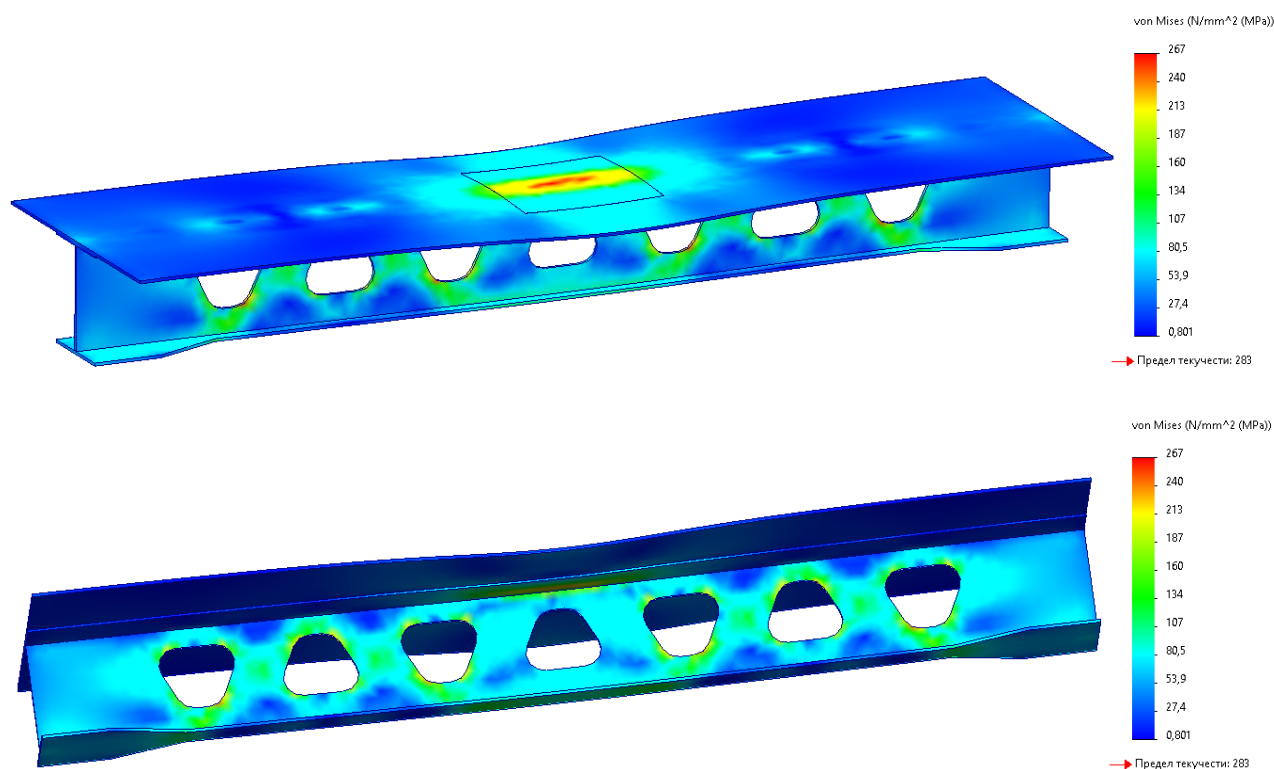
**Рис. 7.** Внешний вид балки по результатам топологической оптимизации:  
*a* — с ограничениями на изменение толщин стенки и полок двутавра; *б* — без ограничений на изменение толщин стенки и полок двутавра

На основе полученных оптимизированных 3D-моделей с неравномерным распределением толщины по стенкам и полкам двутавра (рис. 7) была проведена технологическая обработка, после которой получили конструкцию балки, приведенной на рис. 8.



**Рис. 8.** Внешний вид балки после технологической обработки результатов оптимизации

Указанная балка также была рассчитана на прочность от нагрузки 50 кН. Диаграмма распределения эквивалентных напряжений в балке после технологической обработки результатов оптимизации показана на рис. 9.



**Рис. 9.** Диаграмма распределения эквивалентных напряжений  $\sigma$  (МПа) в поддерживающей балке после технологической обработки результатов оптимизации

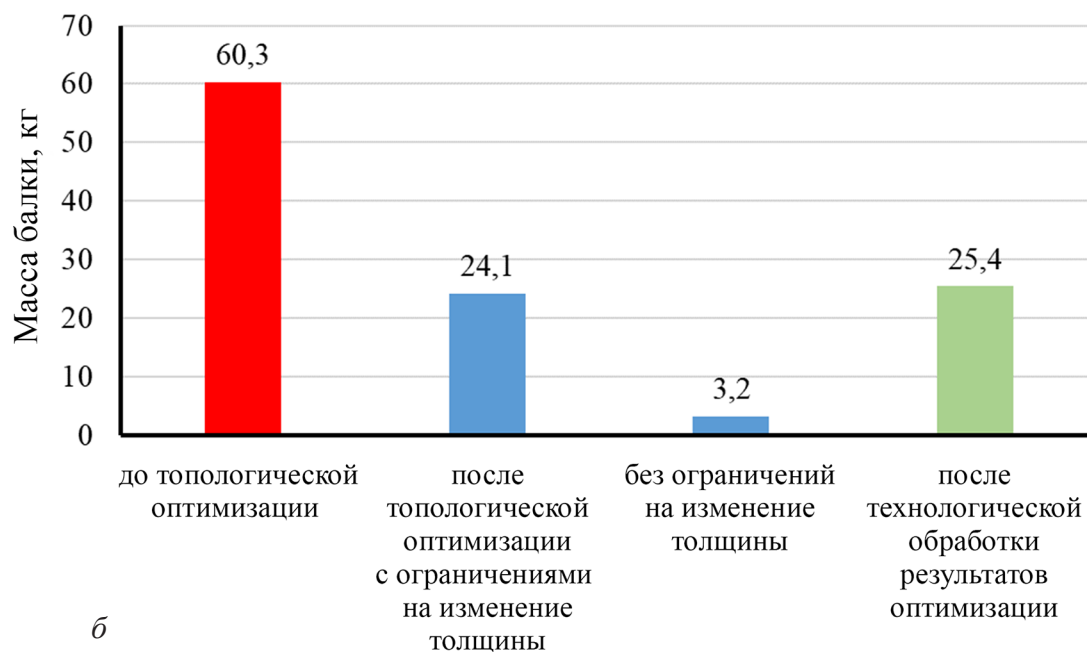
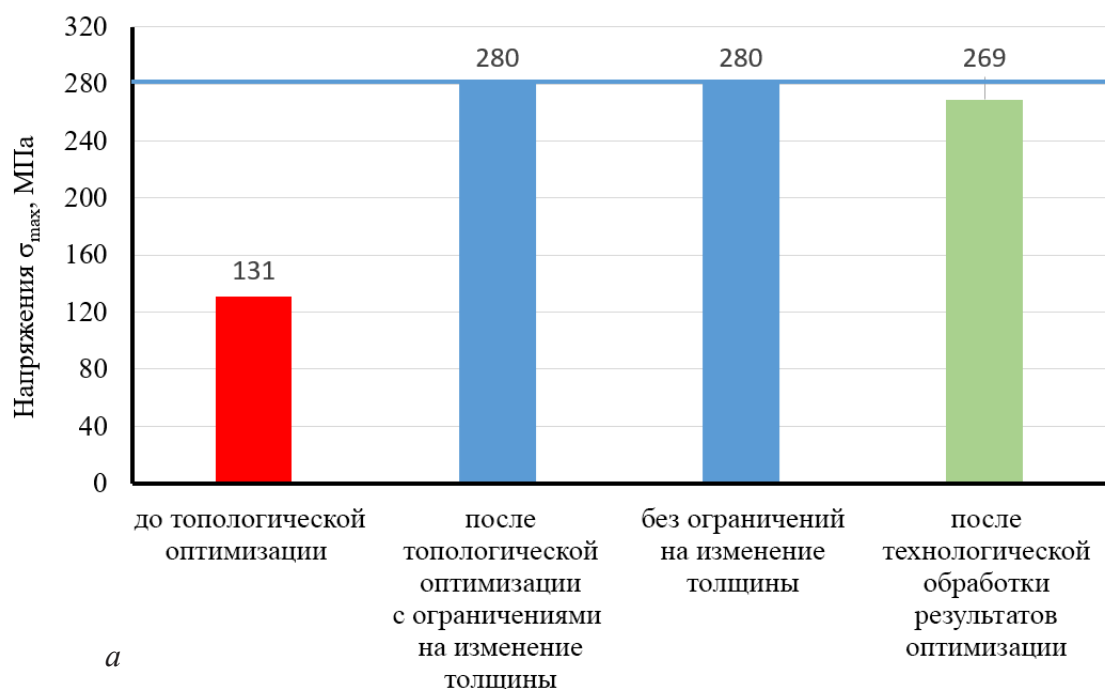
### Анализ результатов топологической оптимизации

В табл. 1 приведены результаты примера топологической оптимизации поддерживающей балки пола полувагона с глухим кузовом от нагрузки 50 кН, приложенной к средней части балки.

ТАБЛИЦА 1. Результаты примера топологической оптимизации поддерживающей балки пола полувагона от нагрузки 50 кН

Параметр	Значение параметра для поддерживающей балки пола			
	До топологической оптимизации	По результатам топологической оптимизации		После технологической обработки результатов оптимизации
		С ограничениями на изменение толщины	Без ограничений на изменение толщины	
Масса, кг, без учета листа пола	60,3	24,1	3,2	23,4
Расчетные эквивалентные напряжения $\sigma_{\max}$ , МПа	131	280	280	269
Коэффициент запаса прочности $k = [\sigma]/\sigma_{\max}$	2,14	1	1	1,04

Сравнение напряжений приведено на рис 10 а. Сравнение масс вариантов балок приведено на рис. 10 б.



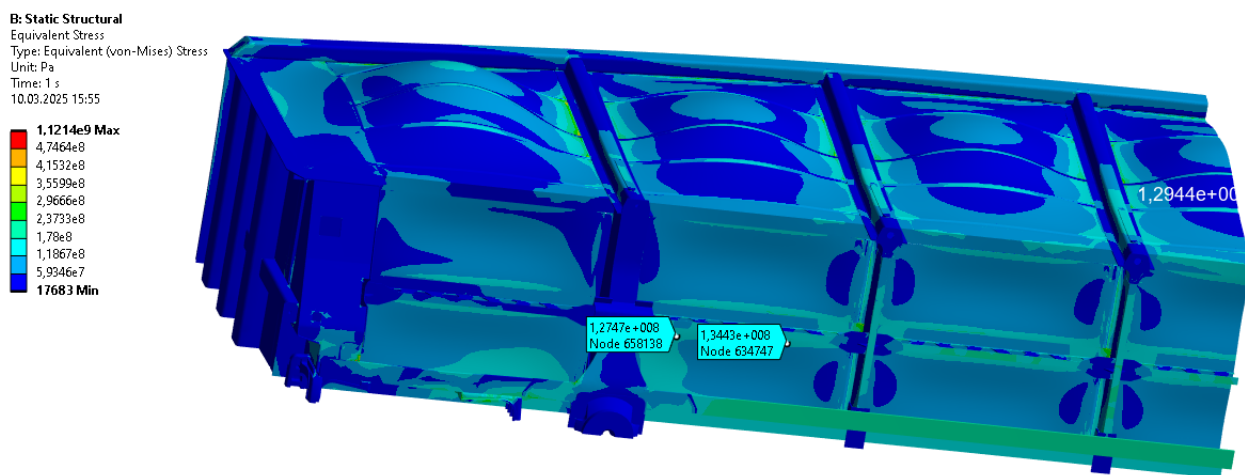
**Рис. 10.** Результаты примера топологической оптимизации: *а* — диаграмма сравнения максимальных расчетных эквивалентных напряжений  $\sigma_{\max}$  вариантов балок до и после топологической оптимизации; *б* — диаграмма сравнения масс вариантов балок (без учета примыкающего листа пола) до и после топологической оптимизации

## Общая оценка прочности кузова полувагона с оптимизированной поддерживающей балкой

Предложенная конструкция поддерживающей балки была проверена на прочность при действии сочетания расчетных нагрузок по режиму 1в согласно ГОСТ 33211 [6] (при действии сжимающей силы 2,5 МН).

По результатам расчета напряжения в балке при данном расчетном режиме не превышают 170 МПа, при этом напряжения в подкрепляемом листе пола также значительно ниже допускаемых значений.

Диаграмма распределения эквивалентных напряжений показана на рис. 11. Внешний вид кузова с оптимизированной поддерживающей балкой показан на рис. 12.



**Рис. 11.** Диаграмма распределения эквивалентных напряжений  $\sigma$  (МПа) в кузове полувагона (режим 1в по ГОСТ 33211, сила сжатия 2,5 МН)



**Рис. 12.** Внешний вид кузова с оптимизированной поддерживающей балкой

## Анализ результатов

На примере топологической оптимизации поддерживающей балки пола полувагона с глухим кузовом можно сделать следующие выводы:

- применение топологической оптимизации для сварных балок без ограничения на изменение толщины листов не позволит получить технологичные результаты из-за градиентного характера вырождения конечных элементов по листам;
- использование топологической оптимизации для сварных балок с ограничением на изменение толщины листов позволяет определить приоритетные направления изменений поперечного сечения балки;
- после технологической обработки результатов оптимизации можно получить конструкцию со сниженной массой относительно исходного варианта, на рассмотренном примере — в 2,4 раза (снижение на 58 %);
- по результатам проверки прочности оптимизированной балки путем расчета модели кузова полувагона на сочетание нагрузок по режиму 1 в ГОСТ 33211 [6] напряжения в оптимизированной балке не превышают величину допустимых напряжений.

## Заключение

В работе показана возможность применения метода топологической оптимизации применительно к решению инженерных задач при проектировании металлоконструкций грузовых вагонов.

Применение топологической оптимизации позволяет определить конструктивные направления для снижения массы несущего элемента, выполненного в виде сварной балки: определить формы и расположение вырезов, толщины листов и их форму (контур).

Предложена конструкция поддерживающей балки пола полувагона с глухим кузовом, вертикальный лист которой имеет трапецеидальные вырезы, а нижний лист — переменную ширину, что позволило снизить массу балки с сохранением ее прочностных характеристик.

*Работа выполнена в рамках продолжения совместных исследований и разработки технических решений [16–20 и др.] специалистов АО «НВЦ «Вагоны» и ПГУПС, направленных на повышение прочности и надежности кузовов полувагонов.*

## Список источников

1. Бороненко Ю.П., Филиппова И.О. Использование высокопрочных сталей в вагоностроении // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 3 (58). С. 16–19. EDN UCCVOP
2. Бороненко Ю.П., Комайданов А.А., Дробжев С.М. Эффективность применения алюминиевых сплавов в конструкциях грузовых вагонов // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XVII Международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 21–24 августа 2023 года). СПб.: ПГУПС, 2024. С. 7–13. EDN HDAJWL

3. Бороненко Ю.П., Дробжев С.М., Рахимов Р.В. Проблемы конструирования вагонов из алюминиевых сплавов // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: материалы III Международной научно-технической конференции (Ташкент, 17–20 апреля 2024 года). Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет, 2024. С. 42–48. EDN KPRNZD
4. Орлова А.М., Демин К.П., Попеску Р.В. Применение высокопрочной стали для создания полувагонов повышенной грузоподъемности // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. № 3. С. 7–23.
5. Орлова А.М., Демин К.П., Попеску Р.В. Как повысить эффективность полувагона: направления снижения технического коэффициента тары // Транспорт Российской Федерации. 2023. № 3–4 (106–107). С. 33–38.
6. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам (с поправкой, с изменением № 1): утв. приказом Росстандарта от 05.06.2015 № 565-ст. М.: Стандартинформ, 2020. 54 с.
7. Булычев М.А., Бейн Д.Г. Математическое моделирование и оптимизация кузовов полувагонов с несущим полом. Брянск: Брянский государственный технический университет, 2014. 183 с.
8. Лозбинец В.П. Проектирование и оптимизация несущих систем кузовов вагонов. Брянск: Брянский государственный технический университет, 1997. 88 с.
9. Лозбинец Ф.Ю. Экономия материальных ресурсов в сфере производства и эксплуатации несущих кузовов вагонов. Брянск: Центр научно-технической информации, 2000. 131 с.
10. Эволюционное моделирование в проектировании несущих систем вагонов / И.Н. Серпик [и др.] // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2008. № 5. С. 21–25.
11. Кротов С.В., Кононов Д.П., Буйносов А.П. Оптимизация элементарной детали подвижного состава // Транспорт Урала. 2023. № 1 (76). С. 65–69.
12. Оптимизации топологии конструкций с использованием ПК ANSYS / Н.И. Марчук [и др.] // Тенденции развития науки и образования. 2019. № 47–46. С. 58–61.
13. Марчук Н.И., Прасоленко Е.В. Решение задач топологической оптимизации конструкций с использованием программы ANSYS // Новая наука: Опыт, традиции, инновации. 2017. Т. 2, № 4. С. 196–199.
14. Бейн Д.Г. Анализ напряженного состояния несущего настила пола четырехосного полувагона с глухим кузовом // Вестник Брянского государственного технического университета. 2011. № 1 (29). С. 47–51.
15. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 320 с.
16. Бейн Д.Г., Исполова Е.А. Оценка прочности и разработка конструкций усиленных увязочных устройств полувагонов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. № 1 (57). С. 30–35.

17. Полувагон: патент на полезную модель № 169635 U1 Российская Федерация, МПК В61D 3/00, В61D 17/06, В61F 1/00. № 2016138777 / Бороненко Ю.П., Цыганская Л.В., Бондаренко К.В.; заявл. 30.09.2016; опубл. 28.03.2017; заявитель АО «Научно-внедренческий центр “Вагоны”».

18. Кузов полувагона: патент на полезную модель № 179519 U1 Российская Федерация, МПК В61D 3/00. № 2016152340 / Бороненко Ю.П., Бейн Д.Г., Третьяков А.В.; заявл. 29.12.2016; опубл. 17.05.2018; заявитель АО «Научно-внедренческий центр “Вагоны”».

19. Кузов полувагона: патент на полезную модель № 177170 U1 Российская Федерация, МПК В61D 17/06, В61D 23/00. № 2017119246 / Третьяков А.В., Бейн Д.Г.; заявл. 02.06.2017; опубл. 12.02.2018; заявитель АО «Научно-внедренческий центр “Вагоны”».

20. Полувагон: патент на полезную модель № 224505 U1 Российская Федерация, МПК В61D 3/20, В60P 7/13. № 2023122034 / Бороненко Ю.П., Цыганская Л.В., Бейн Д.Г.; заявл. 23.08.2023; опубл. 28.03.2024; заявитель АО «Научно-внедренческий центр “Вагоны”».

Дата поступления: 14.11.2025

Решение о публикации: 19.01.2026

#### Контактная информация:

БЕЙН Дмитрий Григорьевич — канд. техн. наук, заместитель главного конструктора; [dgbain@mail.ru](mailto:dgbain@mail.ru), [dmitry.bein@nvc-vagon.ru](mailto:dmitry.bein@nvc-vagon.ru)

ЦЫГАНСКАЯ Людмила Валериевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; [tsyganskaya@gmail.com](mailto:tsyganskaya@gmail.com)

## Topology optimization of floor-supporting beams in a solid-bottom gondola car

**D. G. Bein<sup>1</sup>, L. V. Tsyganskaya<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> JSC “Research and Development Center “Vagony”, Office 5N, 1st Floor, 22 Litera M Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190013, Russia

<sup>2</sup> Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** *Bein D. G., Tsyganskaya L. V.* Topology optimization of floor-supporting beams in a solid-bottom gondola car // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 17–33. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-17-33. (In Russian)

#### Abstract

**Objective:** to evaluate the potential for reducing the tare weight of a solid-bottom gondola car by lightening the floor-supporting welded beams through the application of the topology optimization method. **Methods:** a concise review of established parametric optimization approaches is presented. Topology optimization of the floor-supporting welded beam design was performed using the Evolutionary Structural Optimization (ESO) method. With an applied compressive force of 2.5 MN, the strength of the optimized supporting beam

configuration was verified under the design load combined designated as mode 1b in GOST 33211. **Results:** implementing topology optimization on the welded beams of freight car frames, while constraining permissible sheet thickness variations, enables targeted modification of the beam cross-section. After technological refinement of the optimization outcomes, a beam design with less mass has been produced. Comparing the example to the original design, the mass has been lowered by a factor of 2.4 or 58%. **Practical significance:** this research demonstrates the applicability of topology optimization techniques to engineering design issues for metal freight vehicle structures. A supporting beam configuration that reduces mass while preserving the strength properties of the beam has been proposed. It consists of vertical sheets with trapezoidal cutouts and a lower sheet of variable width.

**Keywords:** gondola car, gondola car frame, strength, topology optimization

## References

1. Boronenko Yu. P., Filippova I. O. Ispol'zovanie vysokoprochnykh stalej v vagonostroenii // *Transport Rossijskoj Federatsii*. 2015. No. 3 (58). S. 16–19. (In Russian)
2. Boronenko Yu. P., Komajdanov A. A., Drobzhev S. M. Effektivnost' primeneniya alyuminievykh splavov v konstruktsiyakh gruzovykh vagonov // *Podvizhnoj sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty: materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii (Sankt-Peterburg, 21–24 avgusta 2023 goda)*. SPB: PGUPS, 2024. S. 7–13. (In Russian)
3. Boronenko Yu. P., Drobzhev S. M., Rakhimov R. V. Problemy konstruirovaniya vagonov iz alyuminievykh splavov // *Zheleznodorozhnyj podvizhnoj sostav: problemy, resheniya, perspektivy: materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii (Tashkent, 17–20 aprelya 2024 goda)*. Tashkent: Tashkentskij gosudarstvennyj transportnyj universitet, 2024. S. 42–48. (In Russian)
4. Orlova A. M., Demin K. P., Popesku R. V. Primenenie vysokoprochnoj stali dlya sozdaniya poluvagonov povyshennoj gruzopod'emnosti // *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij*. 2024. No. 3. S. 7–23. (In Russian)
5. Orlova A. M., Demin K. P., Popesku R. V. Kak povysit' effektivnost' poluvagona: napravleniya snizheniya tekhnicheskogo koeffitsienta tary // *Transport Rossijskoj Federatsii*. 2023. No. 3–4 (106–107). S. 33–38. (In Russian)
6. GOST 33211–2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam (s Popravkoj, s Izmeneniem № 1): utv. prikazom Rosstandarta ot 05.06.2015 № 565-st. M.: Standartinform, 2020. 54 s. (In Russian)
7. Bulychev M. A., Bejn D. G. Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya kuzovov poluvagonov s nesushchim polom. Bryansk: Bryanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2014. 183 s. (In Russian)
8. Lozbinev V. P. Proektirovanie i optimizatsiya nesushchikh sistem kuzovov vagonov. Bryansk: Bryanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 1997. 88 s. (In Russian)
9. Lozbinev F. Yu. Ekonomiya material'nykh resursov v sfere proizvodstva i ekspluatatsii nesushchikh kuzovov vagonov. Bryansk: Tsentri nauchno-tehnicheskoy informatsii, 2000. 131 s. (In Russian)
10. Evolyutsionnoe modelirovanie v proektirovanii nesushchikh sistem vagonov / I. N. Serpik [i dr.] // *Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*. 2008. No. 5. S. 21–25. (In Russian)

11. Krotov S. V., Kononov D. P., Bujnosov A. P. Optimizatsiya elementarnoj detali podvizhnogo sostava // *Transport Urala*. 2023. No. 1 (76). S. 65–69. (In Russian)
12. Optimizatsii topologii konstruksij s ispol'zovaniem PK ANSYS / N. I. Marchuk [i dr.] // *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2019. No. 47–46. S. 58–61. (In Russian)
13. Marchuk N. I., Prasolenko E. V. Reshenie zadach topologicheskoy optimizatsii konstruksij s ispol'zovaniem programmy ANSYS // *Novaya nauka: Opyt, traditsii, innovatsii*. 2017. T. 2, no. 4. S. 196–199. (In Russian)
14. Bejn D. G. Analiz napryazhennogo sostoyaniya nesushchego nastila pola chetyrekhosnogo poluvagona s glukhim kuzovom // *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. No. 1 (29). S. 47–51. (In Russian)
15. Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh). M.: GosNIIV–VNIIZhT, 1996. 320 s. (In Russian)
16. Bejn D. G., Ispolova E. A. Otsenka prochnosti i razrabotka konstruksij usilennykh uvyazochnykh ustrojstv poluvagonov // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2015. No. 1 (57). S. 30–35. (In Russian)
17. Poluvagon: patent na poleznuyu model' № 169635 U1 Rossijskaya Federatsiya, MPK B61D 3/00, B61D 17/06, B61F 1/00. No. 2016138777 / Boronenko Yu. P., Tsyganskaya L. V., Bondarenko K. V.; zayavl. 30.09.2016; opubl. 28.03.2017; zayavitel' AO “Nauchno-vnedrencheskij tsentr “Vagony”. (In Russian)
18. Kuzov poluvagona: patent na poleznuyu model' № 179519 U1 Rossijskaya Federatsiya, MPK B61D 3/00. No. 2016152340 / Boronenko Yu. P., Bejn D. G., Tret'yakov A. V.; zayavl. 29.12.2016; opubl. 17.05.2018; zayavitel' AO “Nauchno-vnedrencheskij tsentr “Vagony”. (In Russian)
19. Kuzov poluvagona: patent na poleznuyu model' № 177170 U1 Rossijskaya Federatsiya, MPK B61D 17/06, B61D 23/00. No. 2017119246 / Tret'yakov A. V., Bejn D. G.; zayavl. 02.06.2017; opubl. 12.02.2018; zayavitel' AO “Nauchno-vnedrencheskij tsentr “Vagony”. (In Russian)
20. Poluvagon: patent na poleznuyu model' № 224505 U1 Rossijskaya Federatsiya, MPK B61D 3/20, B60P 7/13. No. 2023122034 / Boronenko Yu. P., Tsyganskaya L. V., Bejn D. G.; zayavl. 23.08.2023; opubl. 28.03.2024; zayavitel' AO “Nauchno-vnedrencheskij tsentr “Vagony”. (In Russian)

Received: 14.11.2025

Accepted: 19.01.2026

**Author's information:**

Dmitry G. BEIN — PhD in Engineering, Deputy Chief Designer; [dgbain@mail.ru](mailto:dgbain@mail.ru),  
[dmitry.bein@nvc-vagon.ru](mailto:dmitry.bein@nvc-vagon.ru)

Ludmila V. TSYGANSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of “Wagons and Wagon Economy”; [tcyganskaya@gmail.com](mailto:tcyganskaya@gmail.com)