

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.018

doi: 10.30987/2782-5957-2023-10-55-61

ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ КУЗОВА ВАГОНА С УЧЕТОМ КРИТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ГОФРАХ

Елена Викторовна Сорокина^{1✉}, Сергей Дмитриевич Коршунов², Дмитрий Игоревич Гончаров³, Александр Сергеевич Жуков⁴

^{1,2,3,4} Акционерное общество Научная организация «Тверской институт вагоностроения», Тверь, Россия

¹ sorokina.e@tiv.ru

² korshunov.s@tiv.ru

³ goncharov.d@tiv.ru

⁴ jukov.a@tiv.ru

Аннотация

Рассмотрены вопросы обоснования прочности и устойчивости металлоконструкции кузова двухэтажного пассажирского вагона при воздействии как сжимающих нагрузок, так и воздействии избыточной солнечной радиации и других внешних факторов.

Предложена расчетно-экспериментальная методика оценки устойчивости гофрированных участков скатов крыши кузовов пассажирских вагонов. Предложены пять вариантов конструктивного исполнения обшивки крыши двухэтажного вагона. Выполнена оценка устойчивости обшивки для

принятых вариантов аналитическим методом с использованием пластинчато-стержневой конечно-элементной модели. По результатам расчета определен рациональный вариант конструктивного исполнения крыши вагона.

Результаты теоретических исследований подтверждены данными натурных стендовых испытаний металлоконструкции нового кузова двухэтажного вагона.

Ключевые слова: вагон, обшивка, напряжения, аппроксимация перемещений, напряженно-деформированное состояние, испытания.

Ссылка для цитирования:

Сорокина Е.В. Обоснование прочности несущей конструкции кузова вагона с учетом критических напряжений в гофрах / Е.В. Сорокина, С.Д. Коршунов, Д.И. Гончаров, А.С. Жуков // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 10. – С.55-61. doi: 10.30987/2782-5957-2023-10-55-61.

Original article

Open Access Article

SUBSTANTIATION OF THE STRENGTH OF THE CAR BODY BEARING STRUCTURE TAKING INTO ACCOUNT CRITICAL STRESSES IN FLUTES

Elena Viktorovna Sorokina^{1✉}, Sergey Dmitrievich Korshunov², Dmitry Igorevich Goncharov³, Aleksandr Sergeevich Zhukov⁴

^{1,2,3,4} Tver Institute of Railway Car Building, Tver, Russia

¹ sorokina.e@tiv.ru

² korshunov.s@tiv.ru

³ goncharov.d@tiv.ru

⁴ jukov.a@tiv.ru

Abstract

The issues are considered that are connected with substantiating the strength and stability of the metal structure of a double-deck passenger car body under the influence of both compressive loads and the

effects of excessive solar radiation and other external factors.

A computational and experimental method is proposed for assessing the stability of corrugated sec-

tions of the roof slopes of passenger car bodies. Five variants of the structural design of the double-deck car roof covering are proposed. The stability of the covering for the accepted variants was evaluated by an analytical method using a tabular and rod finite element model. Based on the results of the calculation, a ration-

Reference for citing:

Sorokina EV, Korshunov SD, Goncharov DI, Zhukov AS. Substantiation of the strength of the car body bearing structure taking into account critical stresses in flutes. Transport Engineering. 2023;1055-61. doi: 10.30987/2782-5957-2023-10-55-61.

Введение

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция роста объема перевозок пассажиров железнодорожным транспортом в южных направлениях. Для обеспечения указанных перевозок АО «Федеральная пассажирская компания» активно использует двухэтажные пассажирские вагоны, изготовленные ОАО «Тверской вагоностроительный завод». В процессе эксплуатации указанных вагонов в южных регионах страны были зафиксированы факты деформации листов обшивки крыши кузовов. Анализ причин возникновения деформаций, показал, что одним из основных факторов, инициирующих данные повреждения является избыточная солнечная радиация, а также нагрузки, возникающие при проведении ремонтных работ с подъемкой кузова на домкратах [1]. Для исключения подобных повреждений несущих конструкций, вновь проектируемых двухэтажных пассажирских вагонов специалистами АО НО «Тверской институт вагоностроения» была разработана программа и методика испытаний кузовов двухэтажных пассажирских вагонов [2].

В процессе эксплуатации обшивка крыши испытывает нормальные сжимаю-

Материалы, модели, эксперименты и методы

Анализ конструкций кузовов вагонов, получивших деформацию листов обшивки крыши в эксплуатации показало, что факты потери устойчивости элементов жёсткости продольного набора крыши вызваны следующими причинами:

- при расчете на устойчивость продольных элементов крыши нормативными

al variant of the structural design of the car roof was determined.

The results of theoretical studies are confirmed by the data of full-scale bench tests of the metal structure of a new double-deck car body.

Keywords: car, covering, stresses, approximation of displacements, stress-strain state, tests.

щие усилия от действия вертикальные статической и динамической нагрузки, продольных усилий в составе поезда, а также силы давления ветра, и избыточной солнечной радиации. Для обеспечения прочности и безопасности несущей конструкции вагона на стадии проектирования выполняются расчеты на устойчивость обшивки от действия всей совокупности внешних эксплуатационных усилий.

С учетом данных подходов и созданной методики АО «Тверской вагоностроительный завод» разработал конструкцию кузова двухэтажного вагона модели 61-4465.08.

Отличительной особенностью несущей конструкции кузова вагона от серийно выпускаемого является замена профилей иностранного производства на отечественные. В частности, в качестве несущего элемента нижней обвязки рамы применен стандартный профиль 14П, а в конструкции подоконного пояса в зоне первого этажа использован профиль 20П в соответствии с ГОСТ 8240-97. Также изменена конструкция профиля верхней обвязки стыка боковой стены с крышей кузова.

документами не предусмотрен учет температурных напряжений;

- применение стали с увеличенным на 33 % коэффициентом линейного расширения по сравнению с применяемой ранее низкоуглеродистой сталью;

- пониженный модуль упругости нержавеющей стали по сравнению с низкоуглеродистой сталью, что приводит к

уменьшению изгибной жесткости элементов продольного набора;

- снижение толщины металла обшивки крыши с 2 мм до 1,5 мм, вследствие применения коррозионностойкой стали, приводящая к уменьшению момента инерции сечения и тем самым снижению изгибной жёсткости элементов продольного набора;

- наличие пролётов между дугами длиной более 682 мм.

Для устранения установленных негативных факторов, приводящих к деформации обшивки крыши двухэтажного вагона, были предложены следующие мероприятия:

- на стадии проектирования выполнять расчёт на устойчивость продольных элементов жёсткости крыши с учетом возможности возникновения температурных напряжений, вследствие действия избыточной солнечной радиации;

- применить для конструкции крыши стали с меньшим коэффициентом линейного расширения и большим модулем упругости;

- повысить момент инерции продольного набора крыши за счет увеличения их количества и применения подкрепляющих элементов большей высоты;

- изменить длину пролетов до 680 мм и ниже, для существующих гофрированных листов обшивки.

В рамках данных рекомендаций для крыши вагона предложены пять вариантов конструктивного исполнения гофрировки обшивки:

1. с гофрами 21×1,5 мм (рис. 1а);
2. с гофрами 16×70×1,5 мм (рис. 1б);
3. с гофрами 26×47×1,5 мм (рис. 1в);
4. с гофрами 22,5×70×1,5 мм (рис. 1г);
5. с гофрами 31×70×1,5 мм (рис. 1д).

Также рассмотрены два варианта длины пролётов между дугами – 600 и 900 мм.

Оценка эффективности предложенных конструктивных решений выполнена в два этапа. На первом этапе проведено теоретическое исследование устойчивости обшивки крыши пассажирского двухэтажного вагона.

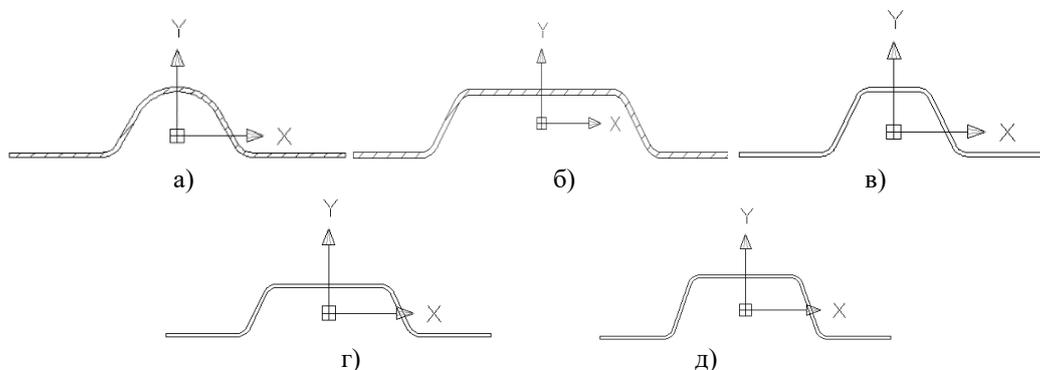


Рис. 1. Варианты гофрировки обшивки крыши: а – вариант №1; б – вариант №2; в – вариант №3; г – вариант №4; д – вариант №5

Fig. 1. Options for corrugating the roof sheathing: a – option No. 1; b – option No. 2; c – option No. 3; d – option No. 4; d – option No. 5

Гофры средней части крыши при расчете на устойчивость рассматривались в виде однопролетных стержней постоянного сечения под действием сжимающей продольной силы. Стержень расположен на жестких опорах и шарнирно закреплен по концам.

Критические напряжения при гибкости $\lambda > \lambda_{nc}$ определяются по формуле Эйлера:

$$\sigma_{крз} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости (модуль Юнга); λ – гибкость стержня, которая рассчитывается по формуле:

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

где l – расчетная длина стержня, равная расстоянию между точками закрепления

сжатого пояса от поперечных смещений или расстоянию между поперечными балками, препятствующими повороту сечения стержня; I – момент инерции сечения стержня; F – площадь сечения стержня брутто; $\beta = 1$ – коэффициент приведения длины стержня, определяемый в зависимости от условий его закрепления и приложения нагрузки.

Расчета критических усилий выполнен по зависимости

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EI}{l^2}.$$

Критические напряжения при гибкости $0 \leq \lambda \leq \lambda_{ли}$ определяются с помощью выражения:

$$\sigma_{кр} = \sigma_{сп} \frac{a_1 + V_1}{a_1 + V_1 + V_1^2}, \quad (3)$$

где:

$$a_1 = \frac{\sigma_{сп}}{\sigma_{сп} - \sigma_{ли}}, \quad (4)$$

$$V_1 = \frac{\sigma_{сп}}{\sigma_{крЭ}}. \quad (5)$$

где: $\sigma_{ли}$, $\sigma_{т}$ и $\sigma_{сп}$ – соответственно пределы пропорциональности, текучести и прочности материала стержня. Если $\sigma_{кр} > \sigma_{т}$, то принимается $\sigma_{кр} = \sigma_{т}$.

Оценка устойчивости обшивки выполнена аналитическим методом с использованием разработанной в среде программного комплекса SCAD пластинчатостержневой конечноэлементной схемы несущей конструкции кузова (рис. 2).

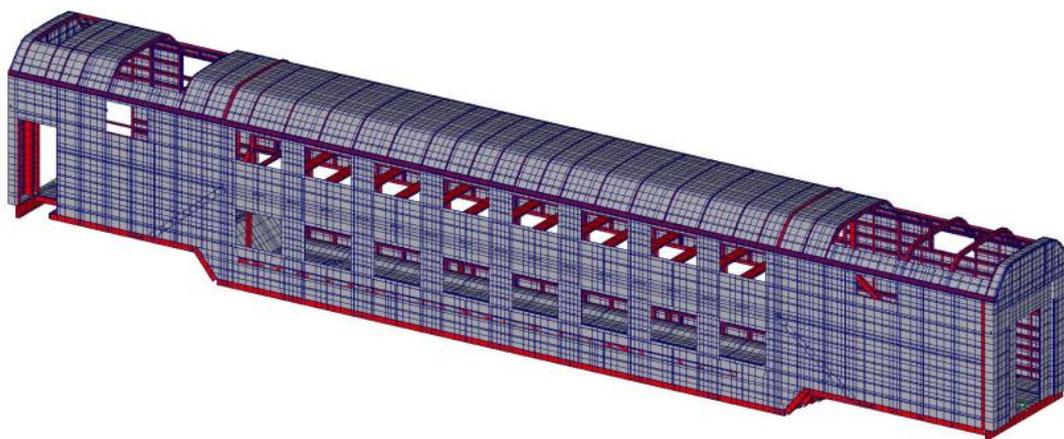


Рис. 2. Конечноэлементная расчетная схема кузова
Fig. 2. Finite element design diagram of the body

В схеме элементы подкрепляющего набора кузова описываются стержневыми элементами с абсолютно жесткими консолями. Обшивка кузова моделировалась пластинчатыми элементами. Гладкая обшивка с изотропными свойствами, гофрированная – ортотропными. Конечноэлементная модель сформирована 22,5 тыс. элементами, объединенными в 15,5 тыс. узлах.

Результаты оценки устойчивости обшивки крыши с различными вариантами ее конструктивного исполнения приведены в таблице.

Анализ результатов, приведенных в таблице 1 показал, что наиболее рациональным с точки зрения устойчивости является пятый вариант конструктивного ис-

полнения обшивки крыши. Для максимальной длины пролета 850 мм и шага гофров 112 мм можно рекомендовать применение третьего варианта. В то же время увеличение веса обшивки крыши может быть не столь значительным, за счет более рационального использования металла между гофрами.

На втором этапе исследования для подтверждения эффективности предложенных конструктивных решений крыши кузова двухэтажного вагона выполнены натурные стендовые испытания [3,4].

Натурные испытания проводились на базе АО НО «Тверской институт вагоностроения» в стенде для прочностных статических испытаний железнодорожного подвижного состава (рис. 3).

Roof sheathing stability assessment results

Параметр	Варианты гофрировки скатов крыши				
	№1	№2	№3	№4	№5
Площадь поперечного сечения F, мм ²	192	203	214	242	266
Момент инерции сечения I _x , мм ⁴	11814	10537	20838	21211	43515
Вес погонного метра*, кг	1,51	1,59	1,68	1,90	2,09
Модуль Юнга: E, Н/мм ²	2,0·10 ⁵				
Коэффициент эффективности длины β	1				
Длины пролетов, мм	L ₁ = 600; L ₂ = 900				
Гибкость λ:					
- предельная λ _{плд} ;	87	87	87	87	87
- для пролета длиной 600 мм;	77	93	61	64	47
- для пролета длиной 900 мм	115	125	91	96	70
Критическая сила, Н, (кг):					
- для пролета длиной 600 мм;	64712(6597)	57717(5883)	114141(11635)	116184(11847)	238356(24297)
- для пролета длиной 900 мм	28761(2932)	25652(2615)	50730 (5171)	51638(5264)	105936(10799)
Критические напряжения σ _{кр} , МПа:					
- для пролета длиной 600 мм;	260	260	260	260	260
- для пролета длиной 900 мм	150	126	238	214	309
Минимальная длина пролета, мм	682	627	858	814	≥900

*При расчете веса гофра учитывается его площадь + 20 толщин листа от нижних радиусовгиба.

Количество точек измерения напряжений, а также схемы их расположения устанавливались с учетом степени новизны и ответственности элементов кон-

струкции объекта испытаний, расчетов на прочность, опыта эксплуатации и проведенных ранее испытаний подобных объектов [5].



Рис. 3. Натурные стендовые испытания несущей конструкции кузова двухэтажного вагона

Fig. 3. Full-scale bench tests of the load-bearing structure of a double-decker car body

В процессе натуральных стендовых испытаний к металлоконструкции кузова прикладывались нормативные квазистатические нагрузки не менее трех раз каждая [6].

Кузов испытывался на воздействие:

- продольной сжимающей нагрузки, величиной 2,5 МН, приложенной к задним упорам автосцепного устройства, расположенным на хребтовой балке;
- продольной растягивающей нагрузки, величиной 1,5 МН, приложенной к пе-

Заключение

На основании полученных результатов комплекса натуральных испытаний и расчетов можно сделать вывод о рациональности предложенных конструктивных решений обшивки крыши двухэтажного пассажирского вагона, и его соответствии нормативным требованиям безопасности. Разработанные методические рекомендации успешно апробированы на ряде моделей двухэтажных и одноэтажных пасса-

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сорокина Е. В., Коршунов С. Д., Болдырев А. П., Лозбинец Ф. Ю. Исследование влияния избыточной солнечной радиации и боковой ветровой нагрузки на оценку прочности кузова двухэтажного вагона. // Транспортное машиностроение. 2023. № 7(19). С. 77-85.
2. Сорокина Е. В., Коршунов С. Д. Методика расчета критических напряжений гофров для учета влияния избыточной солнечной радиации на деформацию кузова вагона. // Материалы XVII Международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века: Идеи, требования, проекты», С-Петербург, 304 с, с. 258-263.
3. Коршунов С. Д., Смирнов А. А., Ромашов Д. А., Сорокина Е. В. Экспериментальная оценка статической прочности нового кузова двухэтажного пассажирского вагона. // Материалы XVII Международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века: Идеи, требования, проекты», С-Петербург, 304 с, с. 187-191.

REFERENCES

1. Sorokina EV, Korshunov SD, Boldyrev AP, Lozbinev FYu. Study of the effect of excessive solar radiation and lateral wind load on the assessment of the body strength of a double-deck car. Transport Engineering. 2023;7(19):77-85.
2. Sorokina EV, Korshunov SD. Method of calculating critical stresses of flutes to account for the ef-

fect of excessive solar radiation on the deformation of the car body. Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference: Rolling Stock of the XXI century: Ideas, Requirements, Projects; St. Petersburg. p.258-263.

редним упорам автосцепного устройства, расположенным на хребтовой балке;

- вертикальной нагрузки тары кузова, равной силе тяжести порожнего оборудованного экипированного кузова вагона с учетом веса металлоконструкции;

- вертикальной нагрузки брутто кузова, равной силе тяжести оборудованного экипированного кузова вагона с максимальной полезной нагрузкой с учетом веса металлоконструкции.

жирских вагонов отечественной постройки и показали удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных результатов. С учетом изложенного методика может быть рекомендована для использования при проектировании железнодорожного подвижного состава, работающего в условиях воздействия на вагоны как избыточной солнечной радиации, так и других внешних факторов.

4. Коршунов С.Д., Гончаров Д.И., Скачков А.Н., Самошкин С.Л., Жуков А.С. Методика расчетно-экспериментальных исследований кузовов современного подвижного состава. Известия ПГУПС, № 1, 2016.
5. Коршунов С.Д., Ворон О.А. «Комплексные испытания, оценка несущей способности и остаточного ресурса специализированного пассажирского вагона». / Коршунов С.Д., Ворон О.А., // Вестник РГУПС, 2014,-№ 1-с. 8-12.
6. Коршунов С.Д., Скачков А.Н., Самошкин С.Л., Смирнов А.А., Гончаров Д.И. Создание экспериментальной и методической базы для оценки соответствия прочности отечественных кузовов пассажирских вагонов европейской нормативной базе. // С. Д. Коршунов, А. Н. Скачков, С. Л. Самошкин, А. А. Смирнов, Д. И. Гончаров, // Вестник БГТУ, 2021, №8 (105), с. 67-76.

3. Korshunov SD, Smirnov AA, Romashov DA, Sorokina EV. Experimental evaluation of the static

strength of a new double-decker passenger car body. Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference: Rolling Stock of the XXI century: Ideas, Requirements, Projects; St. Petersburg. p.187-191.

4. Korshunov SD, Goncharov DI, Skachkov AN, Samoshkin SL, Zhukov AS. Methods of computational and experimental studies of modern bodies of rolling stock. Proceedings of Petersburg Transport University. 2016;1.

Информация об авторах:

Сорокина Елена Викторовна – ведущий инженер, АО НО «Тверской институт вагоностроения», Петербургское шоссе, д. 45-г, г. Тверь, Россия, 170003. Тел. 8 (4822) 55-93-07, email: sorokina.e@tiv.ru.

Коршунов Сергей Дмитриевич – кандидат технических наук, главный специалист, АО НО «Тверской институт вагоностроения», Петербургское шоссе, д. 45-г, г. Тверь, Россия, 170003. Тел. 8 (4822) 55-93-07, email: korshunov.s@tiv.ru.

Sorokina Elena Viktorovna – Lead Engineer, Tver Institute of Railway Car Building, 45-g, Peterburgskoe Highway, Tver, 170003, Russia. Department of Bodies and Components of Railway Equipment, Lead Engineer; phone: 8 (4822) 55-44-00; email: sorokina.e@tiv.ru .

Korshunov Sergey Dmitrievich - Candidate of Technical Sciences, Tver Institute of Railway Car Building, 45-g, Peterburgskoe Highway, Tver, 170003, Russia. phone: 8 (4822) 55-93-07; email: korshunov.s@tiv.ru .

5. Korshunov SD, Voron OA. Complex tests and evaluation of the bearing capacity and remaining life of a specialized car. RSTU Vestnik. 2014;1:8-12.
6. Korshunov SD, Skachkov AN, Samoshkin SL, Smirnov AA, Goncharov DI. Formation of experimental and methodological basis to estimate strength correspondence of domestic passenger car bodies to European standard basis. Bulletin of BSTU, 2021;8 (105):67-76.

Гончаров Дмитрий Игоревич – кандидат технических наук, начальник отдела АО НО «Тверской институт вагоностроения», Петербургское шоссе, д. 45-г, г. Тверь, Россия, 170003. Тел. 8 (4822) 55-91-40, email: goncharov.d@tiv.ru

Жуков Александр Сергеевич – кандидат технических наук, главный специалист, АО НО «Тверской институт вагоностроения», Петербургское шоссе, д. 45-г, г. Тверь, Россия, 170003. Тел. 8 (4822) 79-40-34, email: jukov.a@tiv.ru.

Goncharov Dmitry Igorevich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department at Tver Institute of Railway Car Building, 45-g, Peterburgskoe Highway, Tver, 170003, Russia. phone: 8 (4822) 55-91-40, e-mail: goncharov.d@tiv.ru .

Zhukov Aleksandr Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist, Tver Institute of Railway Car Building, 45-g, Peterburgskoe Highway, Tver, 170003, Russia. phone: 8 (4822) 79-40-34, e-mail: jukov.a@tiv.ru .

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 21.09.2023; принята к публикации 27.09.2023. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 11.09.2023; approved after review on 21.09.2023; accepted for publication on 27.09.2023. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.