https://doi.org/10.33216/2222-3428-2026-30-11
УДК 629.463.1

Ловська А. О., Равлюк В. Г., Павлюченков М. В.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ХВИЛЬОПОДІБНИХ ЛИСТІВ У ЯКОСТІ ОБШИВКИ СТІН КУЗОВА УНІВЕРСАЛЬНОГО НАПІВВАГОНА

В матеріалах статті висвітлено результати обґрунтування застосування хвильоподібних листів у якості обшивки стін кузова універсального напіввагона. Таке рішення сприятиме покращення міцності обшивки, а також зменшенню тари напіввагона. Проведено порівняльний аналіз показників міцності хвильоподібних листів із типовими листами обшивки кузовів (виштамповками). Встановлено, що використання хвильоподібного листа у якості обшивки стін кузова напіввагона сприяє зменшенню напружень у ньому на 18,4%. При цьому маса хвильоподібного листа на 25% є нижчою у порівнянні із типовим листом.
Побудовано просторову модель кузова напіввагона та проведено його розрахунок на міцність. У якості прототипу обрано універсальний напіввагон моделі 12-757. При створенні моделі враховано елементи конструкції кузова, які жорстко взаємодіють між собою. Розрахунок на міцність реалізовано методом скінчених елементів у програмному комплексі SolidWorks Simulation. Розрахунковим критерієм обрано критерій Мізеса. Встановлено, що максимальні напруження в обшивці бокових стін дорівнюють близько 112 МПа. Ці напруження на 8,9 % нижче ніж у типовій конструкції. Максимальні переміщення в вузлах кузова напіввагона склали близько 3,5 мм і зафіксовані в середній частині верхнього обв'язування.
У зв'язку із тим, що матеріалом виготовлення хвильоподібних листів є сталь марки 09Г2С, то підтримання ресурсу напіввагона можливо здійснювати при існуючій ремонтній базі.
Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проєктування сучасних конструкцій залізничних вагонів, їх модернізацій, а також підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту на сучасному етапі розвитку транспортної галузі.
Ключові слова: *залізничний транспорт, універсальний напіввагон, удосконалення обшивки, хвильоподібний лист, міцність кузова.*

Актуальність дослідження. Розвиток економіки європейських країн є критично залежним від транспортної галузі. Вже тривалий час основна доля перевезень від їх загального об'єму, припадає на залізничний транспорт. Для успішного функціонування залізничного транспорту важливим є забезпечення його високоефективним рухомим складом. Вагонний парк є невід'ємною та важливою складовою рухомого складу. Тому питання створення та впровадження в експлуатацію сучасних конструкцій вагонів із покращеними характеристиками є досить актуальним питанням.

Постановка проблеми. Найбільшу частку вагонів із загального парку складають напіввагони. Цей тип вагонів пристосований до перевезень широкої номенклатури вантажів, що обумовлено відсутністю даху в їх конструкціях. Різноманітність перевозимих у напіввагонах вантажів зумовлює і те, що даний тип вагонів є одним із найбільш пошкоджуваних в експлуатації. Обшивка кузовів напіввагонів є часто пошкоджуваним елементом їх конструкції. В процесі експлуатації обшивка кузова зазнає дії постійного тиску від перевозимого вантажу, а також бокових сил, що діють на вагон в експлуатації. Це сприяє виникненню таких пошкоджень обшивки, як деформації або тріщини. При вантажно-розвантажувальних операціях можуть мати місце розриви обшивки. Такі пошкодження не тільки викликають необхідність ремонту кузову, втрату вантажів на шляху прямування, а і можуть стати причиною транспортних подій. Тому виникає необхідність впровадження рішень, спрямованих на покращення міцності обшивки кузовів напіввагонів у експлуатації.

Теоретичний аналіз дослідження.

Авторами статті проведено аналіз літературних джерел за тематикою дослідження, який дозволив виявити сучасний стан проблеми покращення міцності складових кузовів напіввагонів.

Для покращення міцності обшивки стін напіввагонів можливим є застосування магнієвих сплавів для їх виготовлення. Авторами роботи [1] доведено, що таке рішення не тільки сприяє покращенню міцності кузовів вагонів, а і зменшує їх тару. В роботі [2] розглядається доцільність використання обшивки із композитного матеріалу для покращення міцності кузова напіввагона. Таку реалізацію автори розглядали на прикладі торцевої стіни кузова. Проведені розрахунки довели, що використання обшивки із композитного матеріалу сприяє покращенню її міцності. Разом із цим, використання новітніх матеріалів у якості обшивки кузовів підвищує собівартість виготовлення вагона. Тому серійність впровадження рішень, зазначених в роботах [1, 2] має відповідні складнощі.

В роботі [3] покращення міцності бокових стін вагона досягається шляхом впровадження у якості їх обшивки ламінованих композитних матеріалів. Авторами проведено розрахунки для визначення оптимальної товщини листів. Результати проведених розрахунків довели спроможність такої реалізації. Важливо сказати, що

запропонований матеріал виготовлення обшивки є досить високовартістним. Така обставина стримує його широке застосування у вагонних конструкціях.

Подібний недолік притаманний і для рішень, висвітлених у роботах [4, 5]. Авторами цих робіт запропоновано використання у якості обшивки стін вагонів композитних панелей. Безумовно це сприяє не тільки покращенню міцності обшивки кузова, а і зменшенню її маси. Однак використання таких панелей ускладнить процес технічного обслуговування вагонів, а також їх ремонту.

В роботі [6] для покращення міцності обшивки бокових стін запропоновано підсилення її нижньої частини гофрованим листом. Проведені розрахунки на міцність довели, що таке рішення сприяє збільшенню втомної міцності обшивки на 3,7% у порівнянні із типовою. Однак така реалізація має і свій недолік, який полягає у тому, що при використанні запропонованого рішення покращується міцність лише частини обшивки за висотою 1/3 від нижнього обв'язування.

В роботі [7] для покращення міцності кузова напіввагона запропоновано його виготовлення із високоміцністних сталей. Наведено переваги застосування такої сталі у вагонобудуванні. Автори представили результати оптимізаційних розрахунків щодо вибору товщини елементів конструкції вагона за умови використання даної марки сталі для їх виготовлення. Однак в роботі відсутній аналіз напружено-деформованого стану кузова вагона, який би дозволив виявити навантаженість обшивки кузова з урахуванням запропонованого авторами рішення.

Проведений аналіз наукових публікацій доводить, що питання удосконалень та оптимізації складових кузовів залізничних транспортних засобів є досить актуальними. Разом із цим, питання удосконалення обшивки бокових стін кузовів напіввагонів потребують подальшого розвитку та дослідження.

Мета статті: висвітлення результатів визначення доцільності застосування хвильоподібних листів для виготовлення обшивки стін напіввагонів.

Задачі дослідження:

- провести порівняльний аналіз показників міцності та маси хвильоподібних листів із типовими листами обшивки кузовів;

- провести розрахунок на міцність кузова напіввагона із обшивкою, утвореною хвильоподібними листами.

Викладення основного матеріалу дослідження. Одним із можливих варіантів покращення міцності обшивки в експлуатації є виготовлення її із хвильоподібних листів (рис. 1). Наявність хвиль у геометрії листа покращує його жорсткість, а відповідно і міцність. Тому основною гіпотезою дослідження є те, що використання хвильоподібних листів у якості обшивки кузовів напіввагонів, сприятиме покращенню його міцності в експлуатації. Для підтвердження цієї гіпотези проведено розрахунок на міцність типового листа обшивка та хвильоподібного.

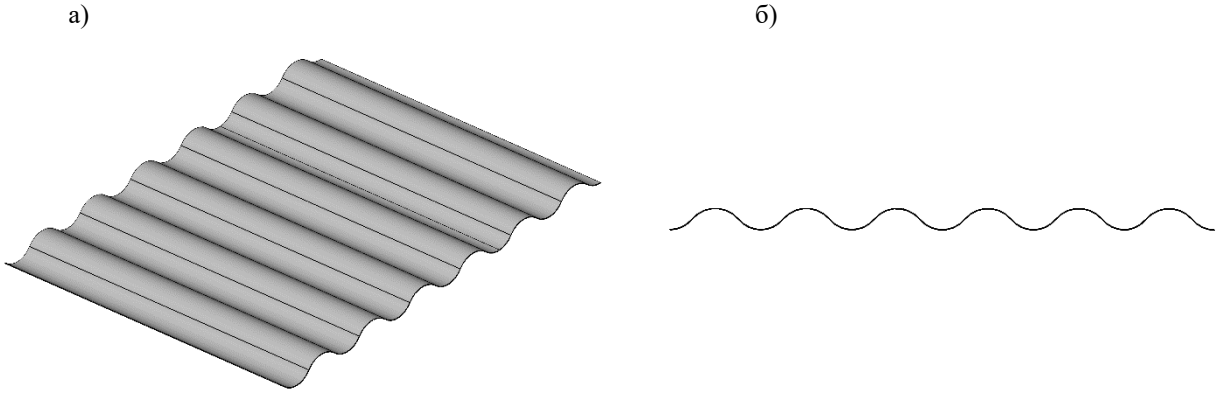


Рисунок 1 – Хвильоподібний лист обшивки а) просторова модель; б) вид збоку

Розрахунок на міцність реалізовано скінчено-елементним аналізом у програмному комплексі SolidWorks Simulation. Скінчено-елементну модель листа обшивки утворено пластинами. Чисельність елементів визначено графоаналітичним методом із перевіркою чутливості моделі. Закріплення листа здійснювалось за периметром. При створенні розрахункових схем враховано, що на листи діє тиск від насипного вантажу (кам'яне вугілля), який розподілено за законом трикутника з максимом у основи листа (рис. 2). Значення тиску знайдено із використанням формули

$$P = \gamma \cdot g \cdot H \cdot tg^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right), \quad (1)$$

де γ – щільність насипного вантажу;

H – висота бокової стіни;

φ – кут природнього відкосу вантажу;

g – прискорення вільного падіння.

а) б)

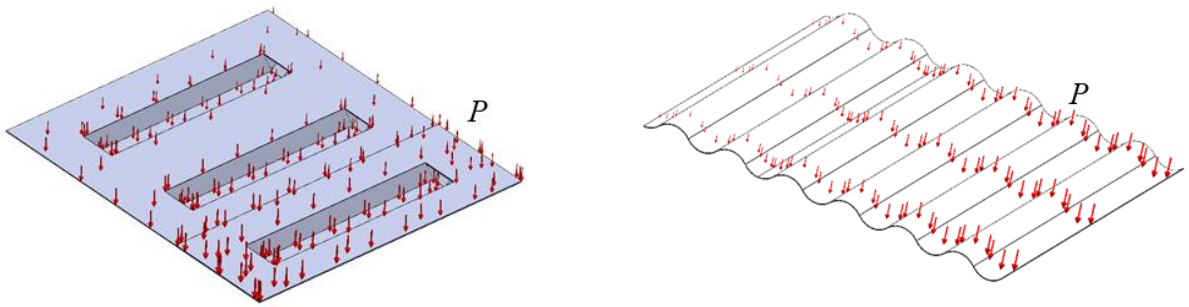


Рисунок 2 – Розрахункова схема листа обшивки а) типового; б) хвильоподібного

Матеріалом виготовлення листів є низьколегована сталь 09Г2С з допустимими напруження для III розрахункового режиму вагона – 210 МПа [8]. Результати розрахунку листів наведено на рис. 3.

а) б)

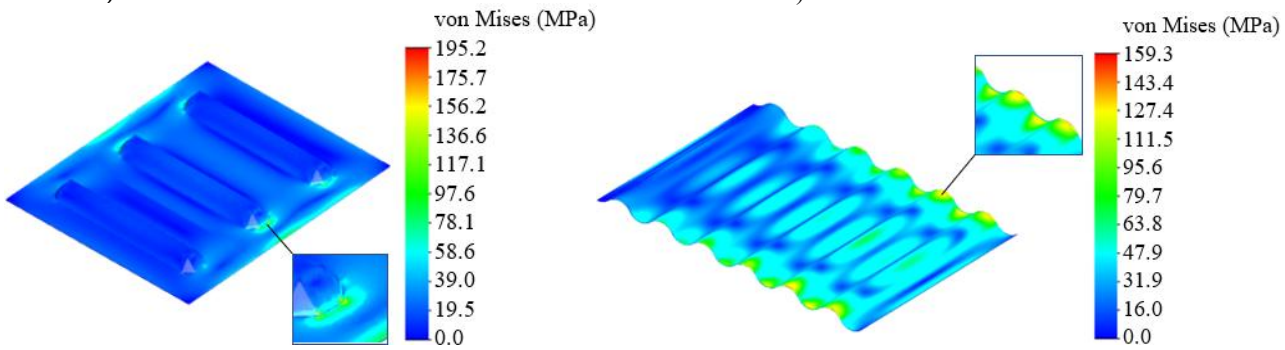


Рисунок 3 – Напружений стан листів обшивки а) типового; б) хвильоподібного

Отже максимальні напруження в типовому листі виникають в зоні взаємодії його середньої гофри з горизонтальною частиною. Ці напруження склали 195,2 МПа та є нижчими за допустимі. Максимальні напруження в хвильоподібному листі виникають у його нижній частині, а саме, зонах закріплення. Тут максимальні напруження склали 159,3 МПа, що нижче допустимих напружень на 24,1%. Отже використання хвиль дозволяє значно зменшити напруження, які виникають в листі у порівнянні із його типовою конфігурацією. Також використання хвиль сприяє зменшенню маси листа. Наприклад, розрахунок гофрованого листа проведено за умови, що його товщина складає 2,5 мм. При цьому маса такого листа дорівнює близько 75 кг.

Для дослідження міцності кузова напіввагона із обшивкою, утвореною хвильоподібними листами проведено розрахунок за методом скінчених елементів. Просторову модель кузова напіввагона наведено на рис. 4. При цьому прототипом обрано універсальний напіввагон моделі 12-757. При створенні моделі враховано елементи конструкції кузова, які жорстко взаємодіють між собою.

Скінчено-елементну модель утворено тетраедрами. Їх чисельність склала 403191 елемент з максимальним розміром 80 мм і мінімальним – 16 мм при чисельності вузлів – 133042.

Розрахункову схему кузова при I розрахунковому режимі (удар) як найбільш неблагоприємному з точки зору навантаження, наведено на рис. 5. Враховано, що на кузов діє вертикальне навантаження $P_в$. Воно зумовлене власною вагою кузова та вагою вантажу, розміщеного в ньому. До бокових стін прикладався тиск $P_б$ від насипного вантажу, а до торцевих стін – $P_т$ від насипного вантажу. Він розрахований за методикою, викладеною у [8]. До вертикальної стінки заднього упору автозчепу прикладено повздовжню силу $P_{уп}$. З протилежного боку ця сила врівноважена реакцією $P_р$.

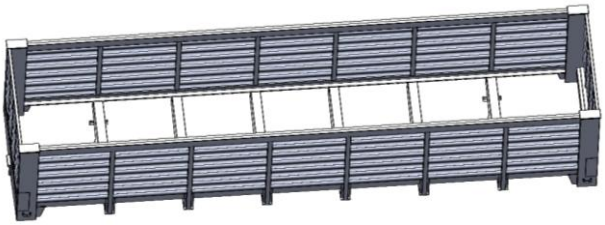


Рисунок 4 – Просторова модель кузова напіввагона із обшивкою, утвореною хвильоподібними листами

Закріплення моделі здійснювалось шляхом постановки на горизонтальні поверхні п’ятників жорстких зв’язків.

Розрахунковим критерієм обрано критерій Мізеса. Такий вибір можна пояснити тим, що матеріал кузова – сталь марки 09Г2С, яка має ізотропні властивості.

а) б)

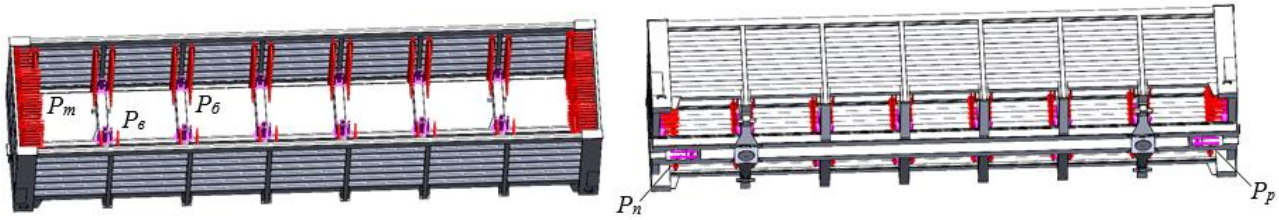


Рисунок 5 – Розрахункова схема кузова напіввагона а) вид 1; б) вид 2

Результати розрахунку наведено на рис. 6, 7. Максимальні напруження в кузові зафіксовано в хребтовій балці, а саме зоні, яка розміщується ближче до шворневої балки. Ці напруження склали 295,4 МПа. Вони не перевищують допустимі, які для даного розрахункового режиму дорівнюють 310,5 МПа [8]. Максимальні напруження в обшивці бокових стін склали близько 112 МПа, що на 8,9% нижче ніж у типовій конструкції.

Максимальні переміщення в вузлах кузова напіввагона зафіксовано в середній частині верхнього обв’язування. Вони склали близько 3,5 мм. Отже міцність кузова напіввагона при даному розрахунковому режимі дотримується.

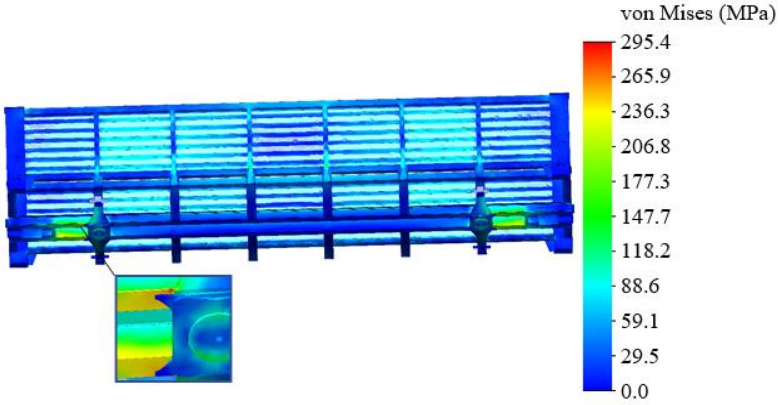


Рисунок 6 – Напружений стан кузова напіввагона

Також проведено розрахунок на міцність кузова і при інших схемах навантаження. Встановлено, що міцність його конструкції дотримується.

Важливо зазначити, що у зв’язку із тим, що матеріалом виготовлення хвильоподібних листів є сталь марки 09Г2С, то підтримання ресурсу напіввагона можливо здійснювати при існуючій ремонтній базі.

Подальшим розвитком даного дослідження є оптимізація геометричних параметрів листа обшивки.

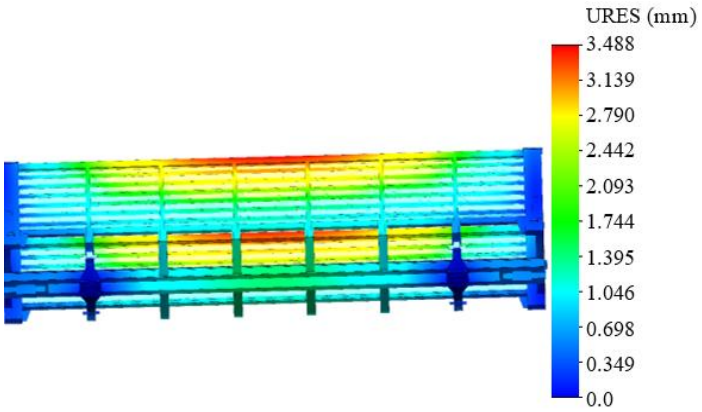


Рисунок 7 – Переміщення в вузлах кузова напіввагона

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проєктування сучасних конструкцій залізничних вагонів, їх модернізацій, а також підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту на сучасному етапі розвитку транспортної галузі.

Висновки:

1. Проведено порівняльний аналіз показників міцності та маси хвильоподібних листів із типовими листами обшивки кузовів. Встановлено, що використання хвильоподібного листа у якості обшивки стін кузова напіввагона сприяє зменшенню напружень у ньому на 18,4%. При цьому маса хвильоподібного листа на 25% є нижчою у порівнянні із типовим листом.

2. Проведено розрахунок на міцність кузова напіввагона із обшивкою, утвореною хвильоподібними листами. Встановлено, що при найбільш неблагоприємному режимі навантаження кузова (удар) максимальні напруження склали 295,4 МПа та виникають в хребтовій балці. Однак ці напруження є нижчими за допустимі. Максимальні напруження в обшивці бокових стін склали близько 112 МПа. Ці напруження на 8,9 % нижче ніж у типової конструкції. Максимальні переміщення в вузлах кузова напіввагона склали близько 3,5 мм і зафіксовані в середній частині верхнього обв'язування.

Подяка:

Дана публікація виконана в рамках науково-дослідної роботи "Підвищення безпеки руху залізничного рухомого складу шляхом впровадження інтегрованих технологій підтримки життєвого циклу" (№ДР 0125U001907), яка виконується за рахунок коштів державного бюджету України з 2025 р.

Література

1. Baier A., Majzner M. Application of feature based method in constructing innovative sheathing of railway wagons. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2012. Vol. 52. Issue 2. P. 91 – 98.
2. Woo Geun Lee, Jung-Seok Kim, Seung-Ju Sun, Jae-Yong Lim. The next generation material for lightweight railway car body structures: Magnesium alloys. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2018. Vol. 232. Issue 1. P. 25 – 42.
3. Andrzej Buchacz, Andrzej Baier, Krzysztof Herbuś, Krzysztof, Michał Majzner, Piotr Ociepka. Examination of a Cargo Space of a Freight Wagon Modified with Composite Panels. Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 809-810. P. 944 – 949. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.944
4. Marek Płaczek, Andrzej Wróbel, Maciej Olesiejuk. Modelling and arrangement of composite panels in modernized freight cars. MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 112. 06022. https://doi.org/10.1051/matecconf/201711206022
5. Alexandru Ionut Patrascu, Anton Hadar, Stefan Dan Pastrama. Structural Analysis of a Freight Wagon with Composite Walls. Materiale plastice. 2020. Vol. 57 (2). P. 140 – 151. https://doi.org/10.37358/MP.20.2.5360
6. Glib Vatulia, Alyona Lovska, Sergiy Myamlin, Andrij Rybin, Volodymyr Nerubatskyi, Denys Hordiienko. Determining patterns in loading the body of a gondola with side wall cladding made from corrugated sheets under operating modes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. №2/7 (122). P. 9 – 14. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.275547
7. Farida Galimova, Yaxyo Khurmatov, Mirzo Abdulloev, Bobur Jumabekov, Doston Sultonaliev, Dilorom Ergeshova. Modern Gondola with Lightweight Body. Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Vol. 247. P. 1043 – 1050. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_94
8. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних).

References

1 Baier A. (2012). Application of feature based method in constructing innovative sheathing of railway wagons / Baier A., Majzner M. // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – Vol. 52. Issue 2. P. 91 – 98.

2 Woo Geun Lee. (2018). The next generation material for lightweight railway car body structures: Magnesium alloys / Woo Geun Lee, Jung-Seok Kim, Seung-Ju Sun, Jae-Yong Lim // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – Vol. 232. Issue 1. P. 25 – 42.

3 Andrzej Buchacz. (2015). Examination of a Cargo Space of a Freight Wagon Modified with Composite Panels / Andrzej Buchacz, Andrzej Baier, Krzysztof Herbuś, Krzysztof, Michał Majzner, Piotr Ociepka // Applied Mechanics and Materials. – Vol. 809-810. P. 944 – 949. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.944

4 Marek Płaczek. (2017). Modelling and arrangement of composite panels in modernized freight cars / Marek Płaczek, Andrzej Wróbel, Maciej Olesiejuk // MATEC Web of Conferences. – Vol. 112. 06022. https://doi.org/10.1051/matecconf/201711206022

5 Alexandru Ionut Patrascu. (2020). Structural Analysis of a Freight Wagon with Composite Walls / Alexandru Ionut Patrascu, Anton Hadar, Stefan Dan Pastrama // Materiale plastice. – Vol. 57 (2). P. 140 – 151. https://doi.org/10.37358/MP.20.2.5360

6 Glib Vatulia. (2023). Determining patterns in loading the body of a gondola with side wall cladding made from corrugated sheets under operating modes / Glib Vatulia, Alyona Lovska, Sergiy Myamlin, Andrij Rybin, Volodymyr Nerubatskyi, Denys Hordiienko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – №2/7 (122). P. 9 – 14. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.275547

7 Farida Galimova. (2021). Modern Gondola with Lightweight Body / Farida Galimova, Yaxyo Khurmatov, Mirzo Abdulloev, Bobur Jumabekov, Doston Sultonaliev, Dilorom Ergeshova // Lecture Notes in Networks and Systems. – Vol. 247. P. 1043 – 1050. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_94

8 DSTU 7598:2014. Vagoni vantazhni. Zagal'ni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih).

The materials of the article highlight the results of the justification of the use of corrugated sheets as a wall covering for the body of a universal open wagon. Such a solution will help improve the strength of the covering, as well as reduce the weight of the open wagon. A comparative analysis of the strength indicators of corrugated sheets with typical body covering sheets (stampings) was carried out. It was found that the use of corrugated sheets as a wall covering for the body of an open wagon helps reduce stresses in it by 18.4%. At the same time, the mass of the corrugated sheet is 25% lower compared to the typical sheet.

A spatial model of the open wagon body was built and its strength calculation was performed. A universal open wagon model 12-757 was chosen as the prototype. When creating the model, the elements of the body structure that rigidly interact with each other were taken into account. The strength calculation was implemented using the finite element method in the SolidWorks Simulation software package. The Mises criterion was chosen as the design criterion. It was found that the maximum stresses in the side wall cladding are about 112 MPa. These stresses are 8.9% lower than in the typical design. The maximum displacements in the open wagon body nodes were about 3.5 mm and were recorded in the middle part of the upper strapping.

Due to the fact that the material for manufacturing the corrugated sheets is steel grade 09G2S, the gondola life can be maintained with the existing repair base.

The conducted research will contribute to the creation of recommendations for the design of modern railway wagon designs, their modernization, as well as increasing the efficiency of rail transport operation at the current stage of development of the transport industry.

Key words: *rail transport, universal open wagon, improvement of cladding, corrugated sheets, body strength.*

Ловська А. О. – д.т.н., професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту.

Равлюк В. Г. – д.т.н., професор, завідувач кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту.

Павлюченков М. В. – к.т.н., доцент кафедри теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Стаття надійшла до редакції: 25.06.2025 р.
Стаття прийнята до друку: 14.09.2026 р.
Стаття опублікована: 08.11.2026 р.