

Ловська А.О.

Український державний університет залізничного транспорту

Рибін А.В.

Український державний університет залізничного транспорту

Мурад'ян А.О.

Одеський національний морський університет

Волошин І.О.

Одеський національний морський університет

АНАЛІЗ МІЦНОСТІ КУЗОВА НАПІВВАГОНА З ОБШИВКОЮ, УТВОРЕНОЮ ПРЯМОКУТНИМИ ГОФРАМИ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ ЗАЛІЗНИЧНИМ ПОРОМОМ

В статті висвітлено результати аналізу міцності кузова напіввагона з обшивкою, утвореною прямокутними гофрами при перевезенні залізничним поромом. Для забезпечення міцності обшивки стін кузова напіввагона запропоновано їх виготовлення з прямокутними гофрами. За рахунок того, що лист з такою конфігурацією гофр має більший момент опору ніж лист обшивки типової конструкції кузова, прогнозується покращення міцності обшивки.

Для дослідження міцності кузова напіввагона проведено його розрахунок при перевезенні залізничним поромом за умови бортової хитами. Даний режим експлуатації прийнято до уваги у зв'язку з тим, що при цьому має місце більша навантаженість конструкції кузова, ніж при експлуатації на магістральних коліях. Визначення динамічних навантажень, що діють на кузов вагона здійснено шляхом математичного моделювання його навантаженості. Розв'язок математичної моделі здійснено за методом Рунге – Кутти. Отримана величина прискорення, як складова динамічного навантаження, врахована при розрахунках на міцність кузова. Просторову модель кузова створено у програмному комплексі SolidWorks. Розрахунок на міцність реалізовано у SolidWorks Simulation за методом скінчених елементів. У якості розрахункового критерію обрано критерій Мізеса. Скінчено-елементну модель сформовано ізопараметричними тетраедрами. Результати розрахунків встановили, що напруження в кузові напіввагона не перевищують допустимих значень. При цьому в обшивці бокових стін максимальні напруження на 14,5% нижчі ніж у обшивці типового виконання.

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування сучасних конструкцій вантажних вагонів із покращеними техніко-економічними показниками.

Ключові слова: залізничний транспорт, напіввагон, несуча конструкція напіввагона, обшивка із прямокутних гофр, міцність кузова, залізнично-поромні перевезення.

Постановка проблеми. Забезпечення сталого розвитку залізничної галузі викликає необхідність впровадження в експлуатацію рухомого складу з покращеними техніко-економічними показниками. Вже тривалий час напіввагони є одними з найбільш поширених типів вагонів у експлуатації. Однак вони є і одними із найбільш пошкоджуваних типів вагонів. При цьому значна кількість пошкоджень в експлуатації припадає на обшивку їх кузовів. Типова обшивка кузова напіввагона

утворена металевими листами-виштамповками, які мають змінну за висотою товщину: за висотою 1/3 від нижнього об'язування обшивка має товщину 5 мм, а 2/3 від верхнього об'язування – 3 мм.

Найбільш частими пошкодженнями обшивки є деформації та розрив. Ці пошкодження обумовлені експлуатаційними навантаженнями, які діють на кузов вагона з вантажем під час руху у складі поїзда або під час вантажно-розвантажувальних робіт.

Наявність пошкоджень обшивки викликає не тільки необхідність здійснення позапланових видів ремонту вагонів, а і необхідність додаткових витрат на їх утримання в експлуатації. Тому виникає необхідність впровадження рішень, спрямованих на покращення міцності обшивки напіввагонів в експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Для виявлення сучасного стану питання забезпечення міцності обшивки кузовів напіввагонів у експлуатації проведено аналіз наявних наукових публікацій. Наприклад, в публікації [1] для зменшення пошкоджень обшивки стін напіввагона пропонується зміна геометрії нижньої частини листа. Наведено обґрунтування даного рішення результатами розрахунків на міцність кузова напіввагона. Однак при цьому авторами не запропоновано рішень щодо забезпечення міцності цілого листа обшивки, лише найбільш навантаженої його частини.

В роботі [2] покращення міцності обшивки кузова напіввагона досягається шляхом використання сендвіч-панелей. Вони містять енергопоглинальний матеріал, який сприяє зменшенню динамічних навантажень, що діють на стіни кузова і за рахунок цього зменшуються напруження, що виникають в бокових стінах. Разом із цим, таке рішення є досить вартісним. Це обмежує його впровадження у серійне виробництво.

Подібне рішення запропоновано в роботі [3], де також розглядається доцільність впровадження сендвіч-панелей у якості обшивки бокових стін напіввагона. Однак автори запропонували дане рішення з позиції покращення технічного обслуговування та ремонту вагона. В роботі відсутні результати міцнісного аналізу кузова з обшивкою із сендвіч-панелей.

В роботі [4] проводиться дослідження міцності кузова напіввагона з удосконаленою обшивкою торцевих стін. При цьому пропонується посилювати їх нижню частину, за висотою $1/3$ від нижнього обв'язування, горизонтальними гофрами. Наведено результати розрахунку на міцність кузова напіввагона із урахуванням такого удосконалення. Але дане рішення сприяє зменшенню навантаженої лише нижньої частини листа.

Шляхи удосконалень конструкцій вантажних вагонів висвітлено авторами статті [5]. З цієї метою проведено аналіз великого масиву наукових публікацій за даним питанням. Це дозволило виявити перспективні напрямки удосконалень їх конструкцій, в тому числі, кузовів. Однак при цьому не запропоновано рішень, щодо можливого

покращення міцності бокових стін кузовів напіввагонів.

Для покращення міцності стін кузова напіввагона в публікації [6] пропонується використання магнієвих та композитних сплавів для їх виготовлення. Наведено перспективи застосування таких матеріалів. Визначено проблеми застосування цих матеріалів на сучасному етапі розвитку залізничної галузі. Однак дана робота є оглядовою і в ній відсутні результати відповідних розрахунків на міцність кузова з зазначених матеріалів при експлуатаційних режимах навантажень.

В роботі [7] також пропонується впровадження перспективних матеріалів для виготовлення обшивки стін кузова вагона. При цьому прогнозується зменшення тари вагона в цілому. Наведено можливі варіанти створення такого кузова вагона, але дане впровадження є досить вартісним. Крім того, воно потребує налагодження відповідної бази щодо технічного обслуговування та ремонту вагона.

Аналіз наукових публікацій [1–7] дозволяє зробити висновок, що удосконалення обшивки кузовів напіввагонів є актуальною задачею, яка потребує подальшого розвитку та дослідження.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення міцності кузова напіввагона з обшивкою, утвореною прямокутними гофрами при перевезенні залізничним поромом. Це сприятиме зменшенню пошкоджень кузовів напіввагонів в експлуатації та витрат на їх утримання. Для досягнення зазначеної мети сформульовано такі завдання:

- провести дослідження динамічної навантаженої кузова напіввагона з обшивкою, утвореною прямокутними гофрами при перевезенні залізничним поромом;
- провести розрахунок на міцність кузова напіввагона.

Виклад основного матеріалу. Для забезпечення міцності обшивки стін кузова напіввагона запропоновано їх виготовлення з прямокутними гофрами (рис. 1). За рахунок того, що лист з такою конфігурацією гофр має більший момент опору ніж лист обшивки типової конструкції кузова, прогнозується покращення міцності обшивки. Товщина листа за умови забезпечення мінімальної матеріалоемності та забезпечення міцності повинна складати 1,8 мм. Маса такого листа дорівнює 67,26 кг. Це на 10,5% нижче за масу типового листа обшивки кузова. Кузов вагона адаптовано до перевезень на залізничному поромі. Для цього він оснащений вузлами для закріплення, які розміщуються на шворневих балках (рис. 1).

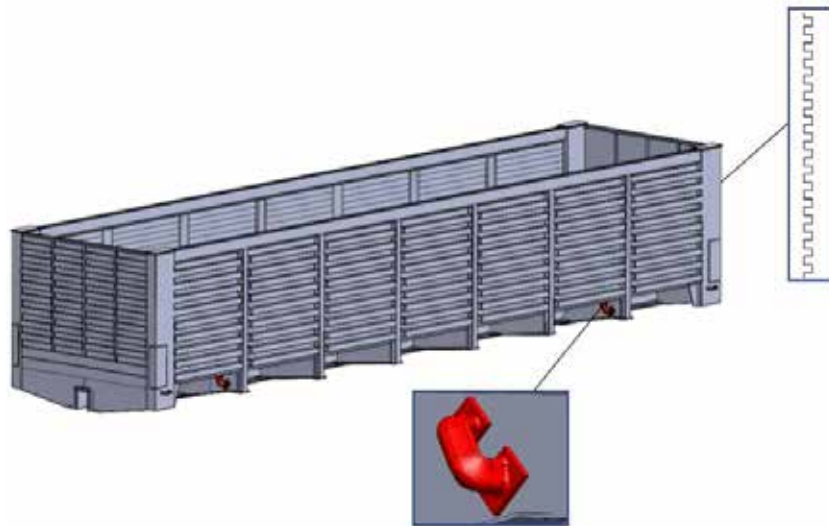


Рис. 1. Кузов напіввагона з обшивкою із листів, утворених прямокутними гофрами

Для дослідження міцності кузова напіввагона з обшивкою із листів, утворених прямокутними гофрами проведено його розрахунок при перевезенні залізничним поромом. Даний режим експлуатації прийнято до уваги у зв'язку із тим, що при цьому має місце більша навантаженість конструкції кузова, ніж при експлуатації на магістральних коліях. До уваги прийнято бортову хитавицю залізничного порому.

Визначення динамічних навантажень, які діють на кузов вагона при перевезенні залізничним поромом здійснено із використанням математичної моделі, сформованої у попередніх роботах авторів [8]:

$$\left(\frac{D}{12 \cdot g} (B^2 + 4z_g^2) \right) \ddot{q} + \left(\Lambda_0 \cdot \left(\frac{B}{2} \right)^2 \right) \dot{q} = \left((p' + F(t)) \cdot \left(\frac{B}{2} \right)^2 \right), \quad (1)$$

де D – водовитіснення залізничного порому; B – ширина корпусу залізничного порому; h – висота борта залізничного порому; Λ_0 – коефіцієнт, який характеризує опір коливанням залізничного порому; z_g – координата центру ваги залізничного порому; p' – навантаження від вітру на надводну проекцію залізничного порому; $F(t)$ – закон дії зусилля, яке збудує рух залізничного порому.

При цьому враховано, що вагон не має власного ступеня вільності та здійснює переміщення разом із залізничним поромом, тобто повторює його траєкторію переміщень.

Закон дії збудуючого зусилля завдано за троходією. Розрахунок проведено на прикладі порому типу «Герой Плевни» для акваторії Чорного моря. Розв'язок математичної моделі (1) здійснено за методом Рунге – Кутта при початкових умовах, рівних нулю. Встановлено, що максимальне при-

скорення, яке діє на несучу конструкцію напіввагона, що розміщений на крайній від фальшборта колії верхньої палуби залізничного порому складає 0,21g. Дана величина прискорення приведена із урахуванням горизонтальної складової прискорення вільного падіння, яке розраховано для кута крену 12,2°. Зазначений кут крену розраховано для випадку статичної дії вітру на бокову проекцію залізничного порому.

Визначене прискорення враховано при розрахунку на міцність кузова напіввагона. Просторову модель кузова створено у програмному комплексі SolidWorks [9]. Розрахунок на міцність реалізовано у SolidWorks Simulation за методом скінченних елементів. При цьому використано критерій Мізеса [10].

Розрахункову модель кузова наведено на рис. 2. Модель враховує, що на несучу конструкцію кузова діє вертикальне навантаження P_g . На стіни діє тиск від навалювального вантажу P_m . До вузлів закріплення ланцюгових стяжок прикладалась сила P_{cm} .

Тиск від насипного вантажу (кам'яне вугілля) розраховано за формулою [8]:

$$p = \gamma \cdot h' \frac{\cos^2(\rho + \alpha)}{\left[1 + \sqrt{\frac{\sin \rho \cdot \sin(\rho \pm \alpha)}{\cos \alpha}} \right]^2 \cos \alpha}, \quad (2)$$

де γ – об'ємна маса вантажу; h' – висота кузова напіввагону; ρ – кут внутрішнього тертя; α – кут нахилу напіввагона відносно повздовжньої осі.

В цій формулі знак “+” враховано при визначенні тиску на стіну з боку нахилу кузова, а “–” – з протилежного боку.

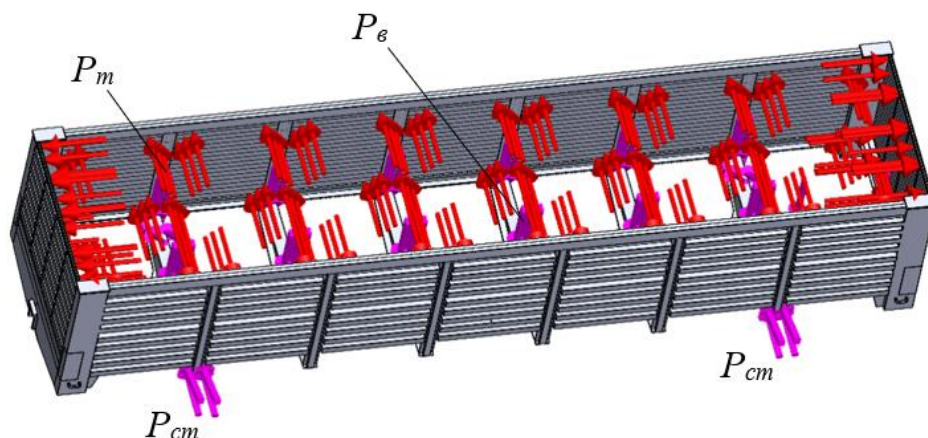


Рис. 2. Розрахункова схема кузова напіввагона

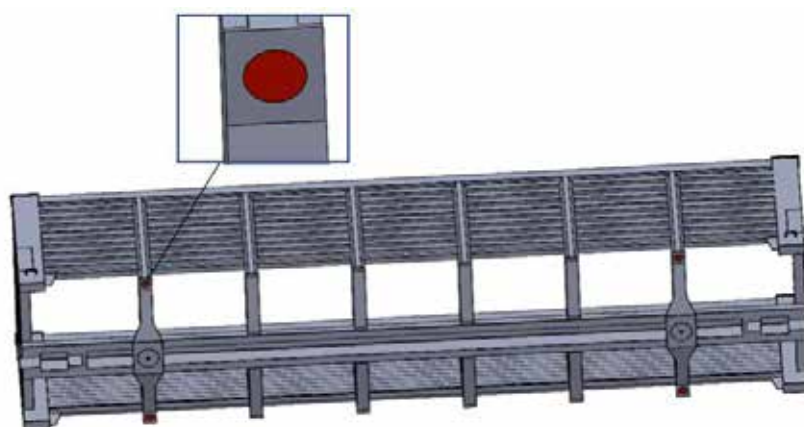


Рис. 3. Зони закріплення кузова на шворневих балках

При створенні скінчено-елементної моделі кузова використано тетраедри з максимальним розміром 40 мм та мінімальним 8 мм. Модель налічує 2002145 елементів та 3635686 вузлів. Закріплення моделі відбувалось в зонах обпирання кузова на візки, а також за кінцеві частини шворневих балок. Така схема обпирання обрана у зв'язку із тим, що при перевезенні вагонів на залізничних поромках під шворневі балки встановлюються механічні упор-домкрати, які розвантажують ресорне підвищення візка вагона при його перевезенні морем. Тому на кінцевих частинах шворневих балок встановлювались накладки, які за геометрією повторюють поверхню взаємодії упор-домкратів із ними (рис. 3). Матеріал конструкції – сталь 09Г2С з межею міцності 345 МПа.

На підставі проведених розрахунків отримано результати, наведені на рис. 4–6. Отже найбільш навантаженими зонами кузова є шворневі балки, а саме, зони їх взаємодії із вузлами для закріплення ланцюгових стяжок (рис. 4).

Максимальні напруження при цьому виникають у вузлах для закріплення вагона на палубі і складають 306,4 МПа (рис. 5), що нижче на 1,5% за допустимі. У якості допустимих прийнято напруження, які дорівнюють 310,5 МПа [11]. Тобто допустимі напруження прийнято рівними тим, що встановлені для I розрахункового режиму. В дійсності, розглянутий режим є наднормованим, тому питання встановлення допустимих напружень при заданій схемі навантаження кузова, будуть подальшим розвитком даного дослідження.

Максимальні переміщення в кузові зафіксовано у його верхньому об'язуванні з боку нахилу і складають близько 5,5 мм (рис. 6). Така дислокація полів переміщень пояснюється схемою навантаження кузова.

Подальшим розвитком даного дослідження є питання втомної міцності кузова напіввагона з обшивкою, утвореною прямокутними гофрами. Також потребує дослідження аналіз міцності торцевої стіни кузова, яка також утворена такою



Рис. 4. Найбільш навантажені зони кузова напіввагона

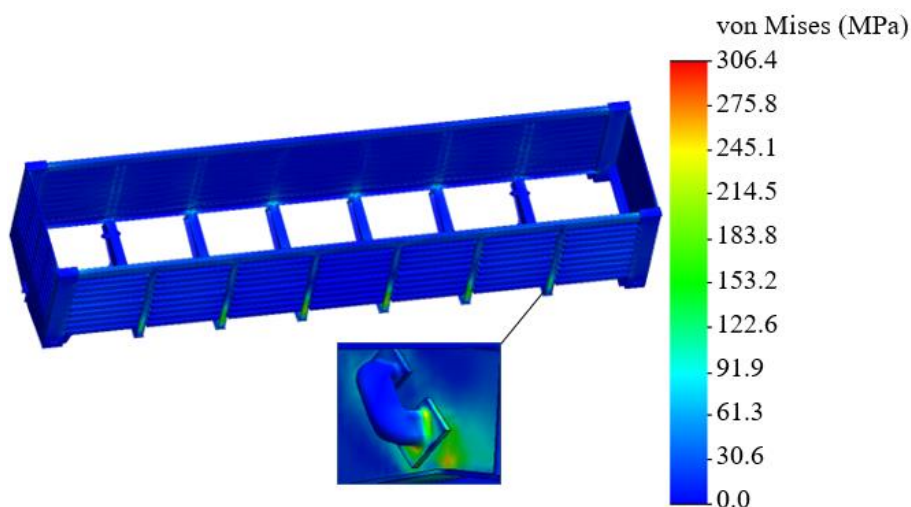


Рис. 5. Напружений стан кузова напіввагона

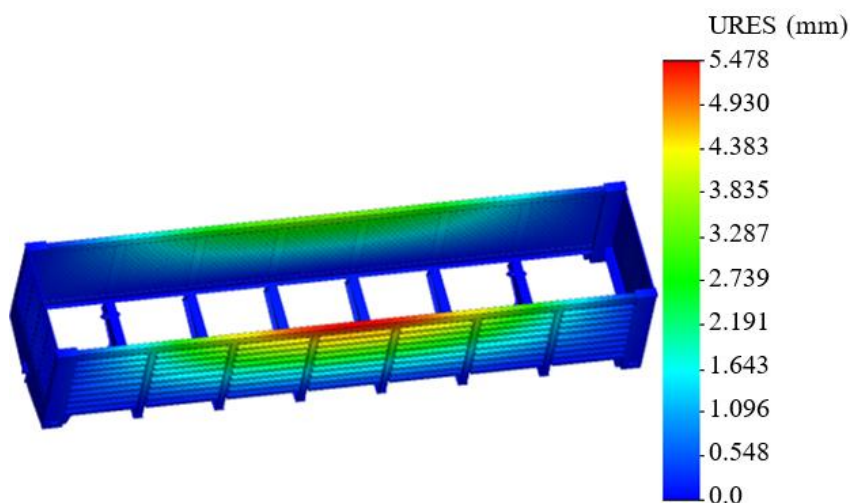


Рис. 6. Переміщення в вузлах кузова напіввагона

обшивкою. Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування сучасних конструкцій вантажних вагонів із покращеними техніко-економічними показниками.

Висновки. 1. Проведено дослідження динамічної навантаженості кузова напіввагона з обшивкою, утвореною прямокутними гофрами при перевезенні залізничним поромом. Встанов-

лено, що максимальне прискорення, яке діє на несучу конструкцію напіввагона, що розміщений на крайній від фальшборта колії верхньої палуби залізничного порому складає 0,21g. Зазначена величина прискорення приведена із урахуванням горизонтальної складової прискорення вільного падіння, яке розраховано для кута крену 12,2°.

2. Проведено розрахунок на міцність кузова напіввагона. Максимальні напруження, зафіксо-

вані в кузові, виникають у вузлах для закріплення на палубі і складають близько 306 МПа. Ці напруження не перевищують допустимі та є нижчими за них на 1,5%. В обшивці бокових стін максимальні напруження склали близько 194 МПа, що на 14,5% нижче ніж у обшивці типового виконання.

Максимальні переміщення в кузові зафіксовано у його верхньому обв'язуванні з боку нахилу і складають близько 5,5 мм.

Список літератури:

1. Vatulia Glib, Lovska Alyona, Myamlin Sergiy, Rybin Andriy, Nerubatskyi Volodymyr, Hordiienko Denys. 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. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.275547
2. Gerlici J., Lovska A., Vatulia G., Dizo J. A study of the transverse loading of an open wagon body with sandwich-panel walls. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. P. 66–73. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.04.011
3. Płaczek M., Wróbel A., Buchacz A. A concept of technology for freight wagons modernization. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 161. DOI: 10.1088/1757-899X/161/1/012107.
4. Ловська А. О. Дослідження міцності кузова напіввагона з удосконаленою обшивкою торцевих стін. *Розвиток транспорту*. 2023. № 2(17). С. 7–15. DOI: 10.33082/td.2023.2-17.01
5. Sulym Andrii, Safronov Oleksandr, Strynzhna Andrii, Khozia Pavlo. Ways of improving of freight car design. *Transport systems and technologies*. 2024. Vol. (43). P. 47–60. DOI: 10.32703/2617-9059-2024-43-4
6. Paul Thomas, Chin Wei Lai, Mohd Rafie Johan. Prospective of Magnesium and Alloy-based Composites for Lightweight Railway Rolling Stocks. *Applied Science and Engineering Progress*. 2022. Vol. 15. No. 2. 5716. P. 1–10. DOI: 10.14416/j.asep.2022.02.006
7. 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.
8. Lovska A., Gerlici J., Dizo J., Ishchuk V. The strength of rail vehicles transported by a ferry considering the influence of sea waves on its hull. *Sensors*. 2024. Vol. 24(1), 183. DOI: 10.3390/s24010183
9. Пустульга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks: навч. посібник. Луцьк: Вежа, 2018. 172 с.
10. Golovanevskiy V., Kondratiev A. Elastic Properties of Steel-Cord Rubber Conveyor Belt. *Experimental Techniques*. 2021. Vol. 45, Iss. 2. P. 217–226. DOI: 10.1007/s40799-021-00439-3
11. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 162 с.

Lovska A.O., Rybin A.V., Muradian A.O., Voloshyn I.O. ANALYSIS OF THE STRENGTH OF AN OPEN WAGON BODY WITH A LINING FORMED BY RECTANGULAR CORRUGATIONS DURING TRANSPORTATION BY RAIL FERRY

The article highlights the results of the analysis of the strength of the open wagon body with a lining formed by rectangular corrugations during transportation by rail ferry. To ensure the strength of the open wagon body wall lining, it is proposed to manufacture them with rectangular corrugations. Due to the fact that a sheet with such a configuration of corrugations has a greater moment of resistance than a sheet of lining of a typical body design, an improvement in the strength of the lining is predicted.

To study the strength of the open wagon body, its calculation was carried out during transportation by rail ferry under the condition of side sway. This operating mode was taken into account due to the fact that in this case the body structure is loaded more heavily than during operation on main tracks. Determination of dynamic loads acting on the open wagon body was carried out by mathematical modeling of its loading. The mathematical model was solved using the Runge-Kutta method. The obtained acceleration value, as a component of the dynamic load, was taken into account in the calculations of the strength of the body. The spatial model of the body was created in the SolidWorks software package. The strength calculation was implemented in SolidWorks Simulation using the finite element method. The Mises criterion was chosen as the calculation criterion. The finite element model was formed by isoparametric tetrahedra. The results of the calculations established that the stresses in the open wagon body do not exceed the permissible values.

At the same time, the maximum stresses in the side wall cladding are 14.5% lower than in the cladding of the typical design.

The conducted research will contribute to the creation of recommendations for the design of modern freight wagon structures with improved technical and economic indicators.

Key words: *railway transport, open wagon, supporting structure of open wagon, cladding made of rectangular corrugations, body strength, rail-ferry transportation.*

Дата надходження статті: 07.07.2025

Дата прийняття статті: 15.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025