

## УДК [629.463.65:539.3/.4]-047.37

А. О. ЛОВСЬКА<sup>1\*</sup>, В. Г. РАВЛЮК<sup>2</sup>, Д. І. СКУРІХІН<sup>3</sup>, А. В. РИБІН<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Інженерія вагонів та якість продукції», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Оборонний вал, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

<sup>2</sup>Каф. «Інженерія вагонів та якість продукції», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Оборонний вал, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта ravvg@ukr.net, ORCID 0000-0003-4818-9482

<sup>3</sup>Каф. «Інженерія вагонів та якість продукції», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Оборонний вал, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта skurikhin@i.ua, ORCID 0000-0002-1122-1234

<sup>4</sup>Каф. «Інженерія вагонів та якість продукції», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Оборонний вал, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта rybinandrey2006@gmail.com, ORCID 0000-0003-4430-8018

## Дослідження повздовжньої міцності рами напіввагона із рогатками в конструкції

**Мета.** Метою роботи є висвітлення результатів дослідження міцності рами напіввагона із рогатками в конструкції при сприйнятті повздовжніх навантажень. **Методика.** Для покращення міцності рами напіввагона при експлуатаційних режимах навантажень запропоновано удосконалення її конструкції шляхом встановлення в консольних частинах рогаток. Рогатки працюють за принципом розкосів в рамі вагона-платформи. При цьому розкоси, що утворюють рогатку, поєднують передні упори із шворневою балкою, а також задні упори із шворневою балкою. Профілем виконання рогатки є двотавр №14. Для обґрунтування запропонованого удосконалення проведено розрахунок на міцність рами напіввагона. Графічні роботи зі створення рами відтворено у програмному комплексі SolidWorks, а сам розрахунок – у SolidWorks Simulation, який реалізує метод скінчених елементів. Розрахунковим критерієм використано критерій Мізеса. Скінчено-елементну модель рами утворено ізопараметричними тетраедрами. При цьому розрахунок на міцність проведено на прикладі рами універсального напіввагона моделі 12–757. **Результати.** Виявлено, що найбільші напруження в рамі мають місце при I розрахунковому режимі (удар). Їх зосереджено в зоні взаємодії хребтової балки із шворневими. Важливо сказати, що отримані напруження нижчі за ті, що мають місце в типовій конструкції рами. При інших розрахункових схемах навантажень рами напруження в ній також є меншими за ті, що мають місце в типовій конструкції. Запропоноване удосконалення можливо реалізувати не тільки на стадії виготовлення напіввагона, а також і при його модернізаціях. **Наукова новизна.** Отримано закономірності розподілення напружень в рамі напіввагона із рогатками при експлуатаційних режимах. **Практична значимість.** Результати проведеного дослідження сприятимуть покращенню міцності несучих конструкцій напіввагонів в експлуатації та зменшенню витрат на їх утримання. Також проведене дослідження сприятиме створенню напрацювань щодо проектування вантажних вагонів із покращеними техніко-економічними показниками.

**Ключові слова:** напіввагон; удосконалення конструкції; навантаженість рами; міцність рами; залізничний транспорт

### Вступ

Забезпечення ефективності перевізного процесу вантажів залізничним транспортом зумовлює необхідність впровадження рішень щодо покращення техніко-економічних показників транспортних засобів. Для перевезень вантажів залізничним транспортом використовується широка різноманітність за конструкційними особливостями вагонів. Однак одним із найбільш використовуваних серед них залишають-

ся напіввагони. Це обумовлено їх універсальністю та можливістю адаптації до перевезень широкої номенклатури вантажів.

Найбільш навантаженим вузлом несучої конструкції напіввагона є рама. В процесі експлуатації вона сприймає значні навантаження, які можуть викликати її пошкодження. Одним із найбільш неблагоприємних пошкоджень рами є пошкодження хребтової балки, як основного несучого елемента рами. Такі пошкоджен-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ня на шляху прямування є досить небезпечними та можуть викликати аварію чи катастрофу, сприяючи не тільки загибелі людей, пошкодженню транспортних засобів, а і порушенню екологічної безпеки. У зв'язку із цим виникає необхідність створення та впровадження рішень, які сприятимуть зменшенню навантаженості рами напіввагона в експлуатації.

Для виявлення стану питання удосконалення несучих конструкцій вагонів для зменшення їх навантаженості в експлуатації, проведено аналіз наукових публікацій. Так наприклад, в дослідженні, висвітленому у роботі [12], проводиться обґрунтування застосування балок із гофрованими стінками у якості профілю виконання хребтової балки вагона. Результати розрахунку кузова вагона на міцність, а також його модальний аналіз довели, що таке впровадження є виправданим. Однак дане дослідження проведено на прикладі рами пасажирського вагона. Тобто в даній роботі не приділялося уваги доцільності впровадження таких балок в раму напіввагона.

Для покращення міцності рами вантажного вагона у роботі [8] запропоновано створення її конструкції у вигляді «ящиків для яєць». Наведено обґрунтування запропонованого рішення та перспективи його використання в конструкціях вантажних вагонів. Однак авторами не розглядалась можливість його використання у конструкціях рам напіввагонів.

В роботі [11] для покращення міцності вантажних вагонів пропонується впровадження у якості матеріалу складових їх конструкцій новітніх матеріалів із покращеними характеристиками. Дослідження проведено на прикладі магнієвих сплавів. Доведено, що використання такого матеріалу сприяє не тільки зменшенню тари вагона, а і покращенню його міцнісних характеристик. Але авторами не розглянуто доцільність впровадження таких матеріалів для виготовлення рами вагона.

Подібний недолік має і робота [10], де у якості складових конструкції кузова вагона пропонується використання екструдованих алюмінієвих панелей. Безумовно таке рішення сприяє покращенню міцності кузова в експлуатації. Однак є досить вартісним та вимагає налагодження відповідної бази з технічного обслуговування та ремонту вагонів. Крім того, авторами не досліджувалась можливість вико-

ристання таких панелей для покращення міцності рами вагона.

Обґрунтування застосуванням стандартних тонкостінних сталевих профілів в конструкціях транспортних засобів залізничного призначення наводиться в роботі [9]. Також в роботі наведено приклади використання таких профілів. Зазначено перспективи їх застосування в машинобудуванні. Однак в роботі не зазначено рішень щодо удосконалення рами напіввагона, як найбільш поширеного типу вагона в експлуатації.

Для покращення міцності несучої конструкції вантажного вагона в роботі [4] запропоновано впровадження сендвіч складових у його конструкцію. Доцільність запропонованого удосконалення підтверджено тестуванням вагона, яке довело, що використання стільникових панелей сприяє покращенню міцності несучої конструкції кузова. Однак при цьому така реалізація не сприяє зменшенню навантаженості рами вагона. Можливо, впровадження стільникових панелей у якості складових підлоги вагона сприяло би покращенню міцності рами. Однак авторами таких досліджень не проводилося.

З метою покращення міцності несучої конструкції напіввагона при експлуатаційних навантаженнях в роботі [7] запропоновано використання проміжного адаптера між ним та вантажем. Даний адаптер виступає як знімний модуль, який передає рівномірнорозподілене навантаження на підлогу кузова від перевозимого вантажу. Результати розрахунку на міцність несучої конструкції напіввагона довели правильність висунутої гіпотези щодо покращення міцності кузова напіввагона. Однак дане рішення не сприяє покращенню міцності рами напіввагона, а лише кузова.

Для підвищення ефективності експлуатації напіввагона у роботі [5] запропоновано зміну геометрії його підлоги. За рахунок такого рішення досягнуто зниження тари напіввагона у порівнянні із типовою конструкцією, а відповідно і витрат на тягу. Разом із цим, таке удосконалення не сприяє покращенню міцності самої рами напіввагона.

Подібний недолік має і робота [6], де також запропоновано удосконалення конструкції підлоги кузова напіввагона з метою зменшення його тари та покращення міцності підлоги. Ре-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

зультати розрахунків на міцність довели ефективність такого удосконалення, але при цьому заходів щодо покращення міцності рами авторкою не запропоновано.

В роботі [13] висвітлено особливості розрахунку на міцність кузова напіввагона при деяких експлуатаційних режимах. Виявлено найбільш навантажені зони конструкції кузова напіввагона. Однак при цьому авторами роботи не запропоновано рішень, щодо покращення міцності несучої конструкції напіввагона.

Аналіз наукових публікацій свідчить про те, що наявні напрацювання з питань удосконалень вагонів здебільшого стосуються впровадження новітніх матеріалів в їх конструкції, зміни профілів їх виготовлення або удосконалення конструкційних складових кузова. Це вимагає значних капітальних вкладень на стадії виготовлення та експлуатації вагонів. Тому виникає необхідність у проведенні подальших досліджень, присвячених удосконаленню несучих конструкцій напіввагонів у експлуатації.

### Мета

Метою роботи є висвітлення результатів дослідження міцності рами напіввагона із рогатками в конструкції при сприйнятті повздовжніх навантажень.

– запропонувати рішення щодо зменшення повздовжньої навантаженості рами напіввагона в експлуатації;

– провести розрахунок на міцність рами напіввагона при основних експлуатаційних режимах навантаження.

### Методика

Для зменшення напружень в найбільш навантажених зонах рами напіввагона пропонується встановлення у її консольних частинах рогаток (рис. 1). Ці елементи працюють за принципом розкосів в рамі вагона-платформи, тобто знімають частину навантажень від хребтової балки та передають їх на шворневу балку.

Розкоси, що утворюють рогатку, поєднують передні упори із шворневою балкою, а також задні упори із шворневою балкою. Профілем виконання рогатки є двотавр №14, тобто як і профіль виконання розкосів рами вагона-платформи.

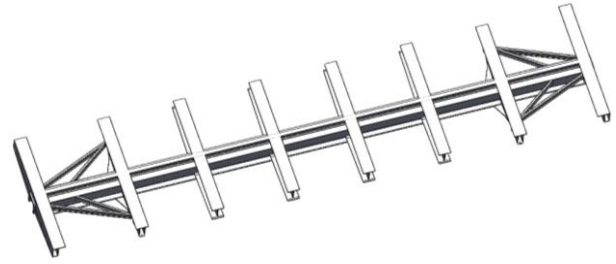


Рис. 1. Рама напіввагона із рогатками в кінцевих частинах

Fig. 1. Open wagon frame with crossbeams at the ends

Для обґрунтування впровадження рогаток, як конструкційного елемента рами напіввагона, проведено розрахунок на міцність. Графічні роботи із створення рами відтворено у SolidWorks, а сам розрахунок – у SolidWorks Simulation, який реалізує метод скінчених елементів [2, 3]. Розрахунковим критерієм використано критерій Мізеса. Такий вибір обґрунтовано тим, що матеріал конструкції рами має лінійні ізотропні властивості. Розрахунок проведено на прикладі рами напіввагона моделі 12–757. Розрахункову схему рами напіввагона наведено на рис. 2. Вона включає такі навантаження: вертикальне  $P_v$ , яке є сукупністю статичного і динамічного навантажень, а також повздовжнє  $P_n$ . Вертикальне навантаження розраховано за умови використання максимально-допустимої вантажопідйомності вагона та склало  $P_v = 929,5$  кН. Повздовжнє навантаження  $P_n$  враховувалося у відповідності до нормативного документу [1].

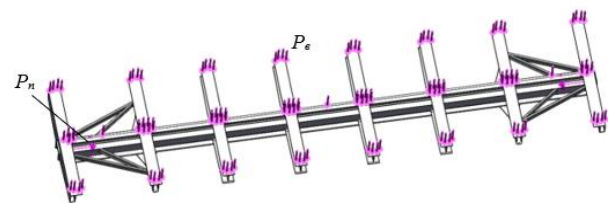


Рис. 2. Розрахункова схема рами напіввагона

Fig. 2. Design diagram of an open wagon frame

Повздовжнє навантаження прикладалося до упорів автозчепу (передніх або задніх), в залежності від досліджуваного розрахункового режиму. З протилежного боку рами це навантаження урівноважувалося силами інерції мас візків.

Закріплення моделі здійснено за горизонтальні поверхні п'ятників. Матеріалом рами

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

призначено сталь 09Г2С, яка є типовою для виготовлення рам напіввагонів. Дана марка сталі має допустимі напруження для I розрахункового режиму – 310,5 МПа, а для III – 210 МПа [1].

Скінчено-елементну модель рами наведено на рис. 3. Вона сформована тетраедрами. Даний тип елементу обрано у зв'язку із тим, що сітка створювалась на твердому тілі.

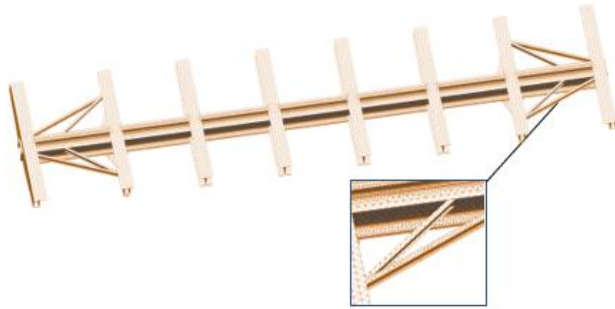


Рис. 3. Скінчено-елементна модель рами напіввагона

Fig. 3. Finite-element model of an open wagon frame

Скінчено-елементна модель утворена 356 016 елементами, максимальний розмір яких дорівнює 75 мм, а мінімальний – 15 мм, і 115 345 вузлами.

### Результати

Результати розрахунку рами при I розрахунковому режимі (р. р.) наведено нижче. Найбільші напруження в рамі мають місце при I р. р. (удар). При цьому максимальні напруження в рамі склали 287,4 МПа (рис. 4) і виникають в зоні взаємодії хребтової балки із шворневими. Ці напруження на 6% нижчі за ті, що мають місце в типовій конструкції рами і на 7,4 % за допустимі.

Максимальні напруження в рамі при «стисненні» склали 272,3 МПа (рис. 5). Вони також виникають в зоні взаємодії хребтової балки із шворневими. Однак дані напруження на 5,2 % нижчі за ті, що мають місце в типовій конструкції рами і на 12,3 % за допустимі.

При «ривку-розтягненні» максимальні напруження в рамі склали 264,5 МПа (рис. 6). Вони виникають в зоні хребтової балки між передніми та задніми упорами. Розраховані напруження на 5,7 % нижчі за ті, що мають місце в типовій конструкції рами і на 14,8% за допустимі.

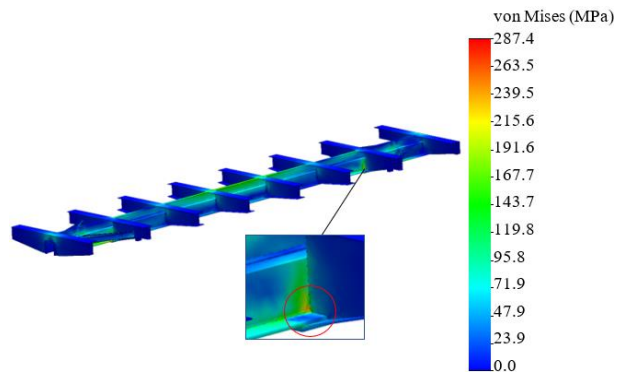


Рис. 4. Напружений стан рами напіввагона (удар, I р. р.)

Fig. 4. Stress state of an open wagon frame (impact, Mode I)

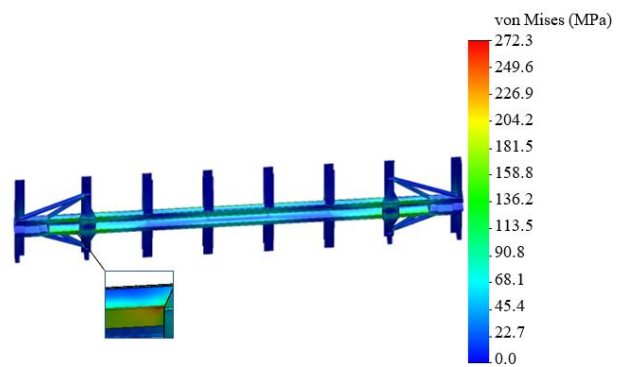


Рис. 5. Напружений стан рами напіввагона (стиснення, I р.р.)

Fig. 5. Stress state of an open wagon frame (compression, Mode I)

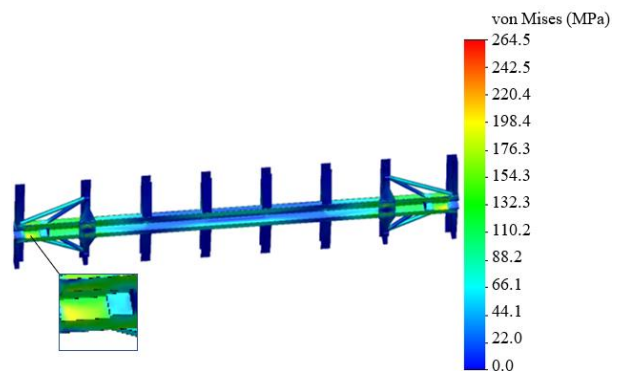


Рис. 6. Напружений стан рами напіввагона (ривок-розтягнення, I р. р.)

Fig. 6. Stress state of an open wagon frame (tensile-compressive, Mode I)

При «ударі – стисненні» (III р.р.) максимальні напруження в рамі склали 198,5 МПа (рис. 7). Їх дислокація має місце в зоні взаємо-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

дії хребтової балки із шворневими. Розраховані напруження на 2,3 % нижчі за ті, що виникають в типовій конструкції рами і на 5,5 % за допустимі.

При «ривку – розтягненні» (III р. р.) максимальні напруження в рамі склали 187,6 МПа (рис. 8). Вони зосереджені між передніми та задніми упорами. Розраховані напруження на 2,4 % нижчі за ті, що виникають в типовій конструкції рами і на 10,7 % за допустимі.

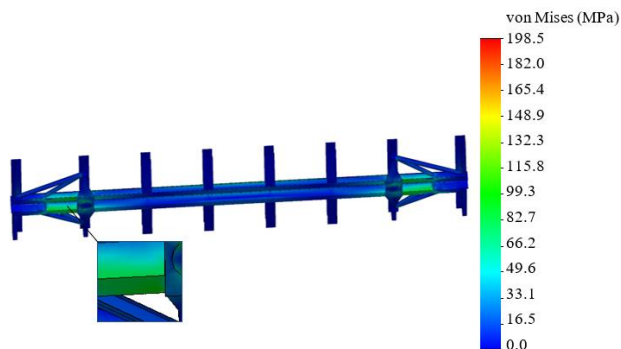


Рис. 7. Напружений стан рами напіввагона (удар – стиснення, III р.р.)

Fig. 7. Stress state of an open wagon frame (impact – compression, Mode III)

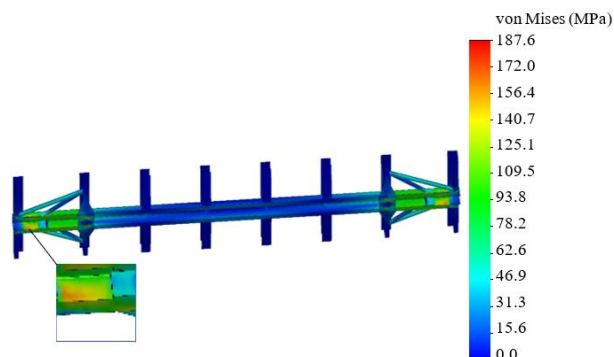


Рис. 8. Напружений стан рами напіввагона (ривок – розтягнення, III р. р.)

Fig. 8. Stress state of an open wagon frame (tensile stress, Mode III)

Отже запропоноване рішення щодо удосконалення рами напіввагона сприяє зменшенню її навантаженості у порівнянні із типовою конструкцією на 2,4–6 %.

### Наукова новизна та практична значимість

Отримано закономірності розподілення напружень в рамі напіввагона із рогатками при експлуатаційних режимах. Дані закономірності є новими оскільки конструкція рами напіввагона із рогатками є авторським доробком. На запропоновану конструкцію рами сформовано та подано заявку на отримання патенту України.

Результати проведеного дослідження сприятимуть покращенню міцності несучих конструкцій напіввагонів в експлуатації та зменшенню витрат на їх утримання. Також проведене дослідження сприятиме створенню напрацювань щодо проєктування вантажних вагонів із покращеними техніко-економічними показниками.

### Висновки

1. Запропоновано рішення щодо зменшення повздовжньої навантаженості рами напіввагона в експлуатації шляхом встановлення у консольних частинах рогаток. Рогатки працюють за принципом розкосів в рамі вагона-платформи, тобто знімають частину навантажень від хребтової балки та передають їх на шворневу балку. Розкоси, що утворюють рогатку, поєднують передні упори із шворневою балкою, а також задні упори із шворневою балкою. Профілем виконання рогатки є двотавр №14, тобто як і профіль виконання розкосів рами вагона-платформи.

2. Проведено розрахунок на міцність рами напіввагона при основних експлуатаційних режимах навантаження. Виявлено, що найбільші напруження в рамі мають місце при I розрахунковому режимі (удар) і складають 287,4 МПа. Їх зосереджено в зоні взаємодії хребтової балки із шворневими. Важливо сказати, що отримані напруження на 6 % нижчі за ті, що мають місце в типовій конструкції рами і на 7,4 % за допустимі. При інших розрахункових схемах навантажень рами напруження в ній також є меншими за ті, що мають місце в типовій конструкції.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проєктування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). [Чинний від 2015-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 250 с.

2. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. *Комп'ютерна графіка: SolidWorks* : навч. посіб. Херсон : Олді-плюс, 2018. 252 с.
3. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. *Інженерна графіка в SolidWorks* : навч. посіб. Луцьк : Вежа, 2018. 172 с.
4. Al-Sukhon A., ElSayed M. S. Design optimization of hopper cars employing functionally graded honeycomb sandwich panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2021. Vol. 236, Iss. 8. P. 920–935. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097211049640>
5. Bulakh M. Estimate and Extend the Time between Overhauls for the Railcar Body. *Eksploatacja i Niezawodność–Maintenance and Reliability*. 2025. Vol. 27, Iss. 2. Art. 195021. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein/195021>
6. Bulakh M., Klich L., Baranovska O., Baida A., Myamlin S. Reducing Traction Energy Consumption with a Decrease in the Weight of an All-Metal Gondola Car. *Energies*. 2023. Vol. 16, Iss. 18. Art. 6733. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16186733>
7. Gerlici J., Lovska A., Vatulia G., Pavliuchenkov M., Kravchenko O., Solcansky S. Situational adaptation of the open wagon body to container transportation. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, Iss. 15. Art. 8605. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13158605>
8. Jeong D. Y., Tyrell D. C., Carolan M. E., Perlman A. B. Improved Tank Car Design Development: Ongoing Studies on Sandwich Structures. *2009 Joint Rail Conference*. ( Pueblo, Colorado 4–5 March 2009). Pueblo, Colorado, 2009. P. 89–98. DOI: <https://doi.org/10.1115/jrc2009-63025>
9. Kuczek T. Application of manufacturing constraints to structural optimization of thin-walled structures. *Engineering Optimization*. 2015. Vol. 48, Iss. 2. P. 351–360. DOI: <https://doi.org/10.1080/0305215x.2015.1017350>
10. Lee H.-A., Jung S.-B., Jang H.-H., Shin D.-H., Lee J. U., Kim K. W., Park G.-J. Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2015. Vol. 230, Iss. 4. P. 1283–1296. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409715593971>
11. Lee W. G., Kim J.-S., Sun S.-J., Lim J.-Y. 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, Iss. 1. P. 25–42. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716646140>
12. Lovska A., Gerlici J., Dižo J. Research of the possibility of using beams with corrugated walls in a passenger rail car frame. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, Iss. 1. Art. 26833. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12783-0>
13. Rao P. K. V., Rama Prudhvi Varma G., Sri Vivek K. Structural dynamic analysis of freight railway wagon using finite element analysis. *Materials Today: Proceedings*, 2022. Vol. 66, Part 3. P. 967–974. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.770>

A. O. LOVSKA<sup>1\*</sup>, V. G. RAVLYUK<sup>2</sup>, D. I. SKURIKHIN<sup>3</sup>, A. V. RYBIN<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Oboronnyi Val Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail [alyonalovskaya.vagons@gmail.com](mailto:alyonalovskaya.vagons@gmail.com), ORCID 0000-0002-8604-1764

<sup>2</sup>Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Oboronnyi Val Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail [ravgv@ukr.net](mailto:ravgv@ukr.net), ORCID 0000-0003-4818-9482

<sup>3</sup>Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Oboronnyi Val Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail [skurikhin@i.ua](mailto:skurikhin@i.ua), ORCID 0000-0002-1122-1234

<sup>4</sup>Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Oboronnyi Val Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail [rybinandrey2006@gmail.com](mailto:rybinandrey2006@gmail.com), ORCID 0000-0003-4430-8018

## Research of the Long Strength of an Open Wagon Frame with Slingshots in the Structure

**Purpose.** The purpose of the work is to highlight the results of the study of the strength of the open wagon frame with slings in the structure when perceiving longitudinal loads. **Methodology.** To improve the strength of the open wagon frame under operational load conditions, it is proposed to improve its design by installing slings in the cantilever parts. The slings work on the principle of braces in the frame of the flat wagon. In this case, the braces that form the sling connect the front stops with the pivot beam, as well as the rear stops with the pivot beam. The sling profile is an I-beam No. 14. To substantiate the proposed improvement, a calculation of the strength of the open wagon frame was performed. Graphic work on creating the frame was reproduced in the SolidWorks software pack-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

age, and the calculation itself was performed in SolidWorks Simulation, which implements the finite element method. The Mises criterion was used as the calculation criterion. The finite element model of the frame is formed by isoparametric tetrahedra. In this case, the strength calculation was carried out on the example of the frame of the universal open wagon model 12–757. **Findings.** It was found that the greatest stresses in the frame occur at the first design mode (impact). They are concentrated in the zone of interaction of the backbone beam with the pivots. It is important to note that the stresses obtained are lower than those found in a typical frame design. With other calculation schemes of frame loads, the stresses in it are also less than those that occur in the typical design. The proposed improvement can be implemented not only at the stage of manufacturing the open wagon, but also during its modernization. **Originality.** The regularities of stress distribution in the frame of an open wagon with slingshots under operating conditions were obtained. **Practical value.** The results of the conducted research will contribute to improving the strength of the supporting structures of open wagon in operation and reducing the costs of their maintenance. The conducted research will also contribute to the creation of developments in the design of freight wagons with improved technical and economic indicators.

**Keywords:** open wagon; design improvement; frame loading; frame strength; railway transport

## REFERENCES

1. *Vahony vantazhni. Zahalni vymohy do rozrakhunkiv ta proektuvannia novykh i moderni-zovanykh vahoniv kolii 1520 mm (nesamokhidnykh)*, 250 DSTU 7598:2014. (2015). (in Ukrainian)
2. Koziar, M. M., Feshchuk, Yu. V., & Parfeniuk, O. V. (2018). *Kompiuterna hrafika: SolidWorks*. Kherson, Ukraine: Oldi-plus. (in Ukrainian)
3. Pustiulha, S. I., Samostian, V. R., & Klak, Yu. V. (2018). *Inzhenerna hrafika v SolidWorks*. Lutsk, Ukraine: Vezha. (in Ukrainian)
4. Al-Sukhon, A., & ElSayed, M. S. (2021). Design optimization of hopper cars employing functionally graded honeycomb sandwich panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 236(8), 920-935. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097211049640> (in English)
5. Bulakh, M. (2025). Estimate and Extend the Time between Overhauls for the Railcar Body. *Eksplotacja i Niezawodność–Maintenance and Reliability*, 27(2), 195021. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein/195021> (in English)
6. Bulakh, M., Klich, L., Baranovska, O., Baida, A., & Myamlin, S. (2023). Reducing Traction Energy Consumption with a Decrease in the Weight of an All-Metal Gondola Car. *Energies*, 16(18), 6733. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16186733> (in English)
7. Gerlici, J., Lovska, A., Vatulia, G., Pavliuchenkov, M., Kravchenko, O., & Solčanský, S. (2023). Situational adaptation of the open wagon body to container transportation. *Applied Sciences*, 13(15), 8605. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13158605> (in English)
8. Jeong, D. Y., Tyrell, D. C., Carolan, M. E., & Perlman, A. B. (2009, March). Improved Tank Car Design Development: Ongoing Studies on Sandwich Structures. In *2009 Joint Rail Conference* (pp. 89-98). Pueblo, Colorado, USA. DOI: <https://doi.org/10.1115/jrc2009-63025> (in English)
9. Kuczek, T. (2015). Application of manufacturing constraints to structural optimization of thin-walled structures. *Engineering Optimization*, 48(2), 351-360. DOI: <https://doi.org/10.1080/0305215x.2015.1017350> (in English)
10. Lee, H.-A., Jung, S.-B., Jang, H.-H., Shin, D.-H., Lee, J. U., Kim, K. W., & Park, G.-J. (2015). Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(4), 1283-1296. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409715593971> (in English)
11. Lee, W. G., Kim, J.-S., Sun, S.-J., & Lim, J.-Y. (2018). 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*, 232(1), 25-42. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716646140> (in English)
12. Lovska, A., Gerlici, J., & Dižo, J. (2025). Research of the possibility of using beams with corrugated walls in a passenger rail car frame. *Scientific Reports*, 15(1), 26833. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12783-0> (in English)
13. Rao, P. K. V., Rama Prudhvi Varma, G., & Sri Vivek, K. (2022). Structural dynamic analysis of freight railway wagon using finite element analysis. *Materials Today: Proceedings*, 66(3), 967-974. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.770> (in English)

Надійшла до редколегії: 02.05.2026

Прийнята до друку: 06.07.2026

Дата публікації: 30.09.2026