DOI: https://doi.org/10.33216/2222-3428-2025-28-13
УДК 629.463.62

Ловська А. О., Діжо Я.

АНАЛІЗ МІЦНОСТІ УДОСКОНАЛЕНОЇ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ КОНТЕЙНЕРІВ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

В матеріалах статті висвітлено особливості розрахунку на міцність удосконаленої конструкції вагона-платформи. Суть удосконалення полягає у постановці в консольних частинах рами вагона-платформи спеціальних надбудов для обмеження повздовжніх переміщень контейнерів. Для обґрунтування запропонованого удосконалення проведено розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-платформи при I та III розрахункових режимах. Результати проведених розрахунків показали, що максимальні напруження в несучій конструкції вагона-платформи виникають при "ударі". Разом із цим, дані напруження на 7,3% нижчі за допустимі. Максимальні переміщення в вузлах несучої конструкції вагона-платформи склали 3,1 мм і зосереджені в повздовжніх балках рами.

Результати проведеного дослідження сприятимуть зменшенню пошкоджень транспортних засобів контейнерних перевезень в експлуатації, формуванню рекомендацій щодо їх проєктування, а також підвищенню рентабельності, в тому числі, в міжнародному сполученні.

Ключові слова: *залізничний транспорт, вагон-платформа, міцність конструкції, навантаженість конструкції, напружений стан, контейнерні перевезення.*

Актуальність дослідження. Одним із найважливіших факторів успішного розвитку економіки Європи є ефективне функціонування транспортної галузі. На разі найбільш використовуваною складовою транспортної галузі є залізничний транспорт. Даний вид транспорту функціонує як самостійно, так і у симбіозі з іншими видами транспорту. Одним із найбільш затребуваних серед таких симбіозів є контейнерні перевезення [1, 2]. Це можна пояснити мобільністю контейнерів як транспортних засобів. Перевезення контейнерів залізничним транспортом відбувається на вагонах-платформах. Закріплення контейнерів на вагонах-платформах здійснюється через фітинги. При на цьому на вагоні-платформі передбачені фітингові упори.

Постановка проблеми. На колії 1520 мм одним із найбільш неблагоприємних режимів навантаження вагонів, в тому числі, вагонів-платформ є маневрове співударяння. При цьому режимі на задній упор автозчепу вагона діє повздовжня сила у 3,5 МН. Важливо підкреслити, що у випадку, коли сила тертя між фітингами та фітинговими упорами стає меншою за динамічне навантаження, яке діє на контейнер, він набуває власного ступеня вільності у повздовжній площині. При цьому виникає ударна взаємодія фітинга о штир фітингового упору. Внаслідок цього може мати місце їх обоюдне пошкодження.

Така ситуація є досить неблагоприємною не тільки з точки зору необхідності здійснення позапланових видів ремонту транспортних засобів, а і безпеки руху. В випадку появи подібних пошкоджень на шляху прямування поїзда можуть мати місце аварії. Також це неблагоприємно і з екологічної точки зору, оскільки може сприяти розвалюванню вантажу. Якщо даний вантаж є небезпечним, то потрапляння його в навколишнє середовище викличе екологічну аварію. У зв'язку з цим, питання створення заходів, спрямованих на підвищення безпеки перевезень контейнерів залізничним транспортом є дуже важливими.

Теоретичний аналіз дослідження. Дослідження присвяченні удосконаленню несучих конструкцій вагонів-платформ для підвищення ефективності їх експлуатації – досить актуальні. Наприклад, в публікації [3] наведено результати досліджень стійкості короткобазної конструкції вагона-платформи при експлуатаційних режимах. При цьому автори застосували експериментальні методи досліджень. Визначено жорсткість несучої конструкції вагона-платформи в найбільш неблагоприємних перетинах конструкції. Але авторами не запропоновано рішень, спрямованих на адаптацію несучої конструкції вагона-платформи до перевезень контейнерів.

В роботі [4] для зменшення вертикальних навантажень, які діють на раму вагона-платформи запропоновано створення її підлоги із сендвіч-панелей. За рахунок такого удосконалення стає можливим зменшити вертикальну навантаженість несучої конструкції вагона-платформи на 8,4% у порівнянні із типовою конструкцією. Однак, авторами не проводилося досліджень щодо можливості перевезень контейнерів на такій конструкції вагона-платформи. Крім того, запропоноване удосконалення не сприяє зменшенню повздовжніх навантажень, які діють на перевозимий вантаж.

Авторами роботи [5] наведено аналіз основних проблем, пов'язаних із теоретичними дослідженнями міцністних якостей вагонів. Дослідження проведено на прикладі вагона-платформи із вертикальними стійками для кріплення вантажів. Визначено її напружений стан при експлуатаційних навантаженнях та наведено рекомендації щодо уточнення нормативів розрахунку. Разом з цим, авторами не проводилося досліджень повздовжньої навантаженості несучої конструкції вагона-платформи при перевезенні на ньому контейнерів.

Особливості комп'ютерного моделювання навантаженості високошвидкісного вагона-платформи для перевезень контейнерів висвітлено у публікації [6]. Автори закцентували свою увагу на визначенні аеродинамічних властивостей вагона-платформи, оскільки це впливає на швидкість доставки вантажів. Визначено опір руху вагона-платформи та наведено рекомендації щодо покращення її аеродинамічних якостей. Однак в роботі не розглянуто питань адаптації вагона-платформи до перевезень контейнерів.

Визначення міцності удосконаленої конструкції довгобазного вагона-платформи для перевезень контейнерів проводиться в роботі [7]. Особливістю конструкції вагона-платформи є наявність на повздовжніх балках рами вертикальних стійок, які передбачені для утримання контейнерів від перекидання. Проведений комплекс теоретичних досліджень підтверджено експериментальними. Однак при цьому автори не приділили уваги питанню дослідження повздовжньої навантаженості вагона-платформи.

В роботі [8] висвітлюються результати експериментальних досліджень витривалості та втомної міцності довгобазної конструкції вагона-платформи. Результати проведених досліджень дозволили виявити найбільш навантажені зони несучої конструкції вагона-платформи та запропонувати рішення щодо її удосконалення. Але дане удосконалення сприяє зменшенню вертикальної навантаженості рами вагона-платформи, а не повздовжньої.

В публікації [9] висвітлено особливості розрахунку на міцність вагона-платформи при експлуатаційних режимах. Автор наводить порівняльний аналіз розрахунку на міцність із застосуванням нечіткої логіки та еволюційних алгоритмів. Однак рішень, спрямованих на удосконалення несучої конструкції вагона-платформи з урахуванням отриманих результатів, в роботі не запропоновано.

Проведений аналіз літературних джерел доводить, що питання удосконалень вагонів-платформ з метою підвищення ефективності перевезень контейнерів залізничним транспортом є досить актуальними. Разом з цим ці питання потребують подальшого розвитку та досліджень.

Мета статті: провести аналіз міцності удосконаленої несучої конструкції вагона-платформи для перевезень контейнерів при експлуатаційних навантаженнях.

Задачі дослідження. Для досягнення зазначеної мети визначені такі задачі:

- сформувати розрахункову схему несучої конструкції вагона-платформи;
- провести розрахунок на міцність удосконаленої несучої конструкції вагона-платформи.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для зменшення пошкоджень транспортних засобів контейнерних перевезень пропонується удосконалення несучої конструкції вагона-платформи [10]. Дане удосконалення полягає у постановці в її консольних частинах вертикальних надбудов (рис. 1). Висота надбудов дорівнює половині висоти контейнера та обрана з технологічних міркувань.

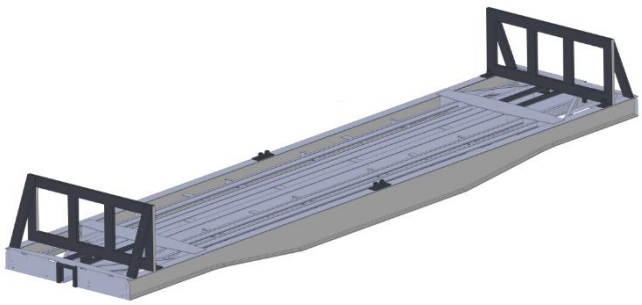

Рисунок 1 – Просторова модель удосконаленої несучої конструкції вагона-платформи

Обґрунтування запропонованого удосконалення здійснено на прикладі вагона-платформи моделі 13-401. Даний тип вагона-платформи обрано у якості прототипу, оскільки існує його модернізація під перевезення контейнерів шляхом постановки фітингових упорів (стаціонарних або відкидних) на повздовжні балки рами. Такі вагони вже декілька років успішно експлуатуються на коліях 1520 мм.

Для визначення міцності несучої конструкції вагона-платформи, обладнаної надбудовами для попередження переміщень контейнерів проведено розрахунок на методом скінчених елементів. Його реалізацію здійснено в SolidWorks Simulation [11, 12]. При цьому застосовано критерій Мізеса [13, 14], оскільки матеріал виготовлення несучої конструкції вагона-платформи – сталь марки 09Г2С, а це є ізотропний матеріал. Визначення оптимальної чисельності скінчених елементів моделі проведено графоаналітично. При цьому застосовано тетраедри.

Розрахунок на міцність здійснено для I та III режиму навантажень несучої конструкції вагона-платформи. У якості прикладу нижче наведено результати розрахунку для найбільш неблагоприємного режиму навантаження вагона-платформи – маневрове співударяння (I розрахунковий режим). При даному режимі на задній упор автозчепу діє повздовжня сила P_n у 3,5 МН [15] (рис. 2). З протилежного боку вагона-платформи ця сила врівноважується силами інерції мас вагона. При “стисканні” до задніх упорів автозчепу також прикладалося повздовжнє навантаження. При “ривку” або “розтягненні” повздовжнє навантаження прикладалося до передніх упорів.

Враховано, що на несучу конструкцію вагона-платформи діє вертикальне навантаження зумовлене власною вагою. Вагон-платформа завантажений двома контейнерами типорозміру 1СС. Кожний контейнер в свою чергу завантажений із використанням загальної вантажопідйомності.

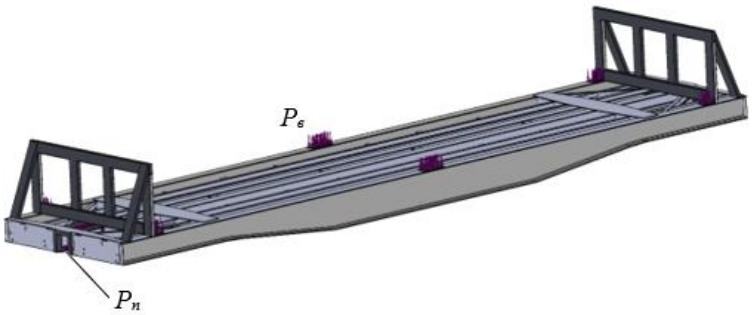

Рисунок 2 – Розрахункова схема несучої конструкції вагона-платформи

Результати розрахунку наведено на рис. 3, 4. З рис. 3 видно, що максимальні напруження в несучій конструкції вагона-платформи складають 287,8 МПа. Ці напруження зосереджені в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою.

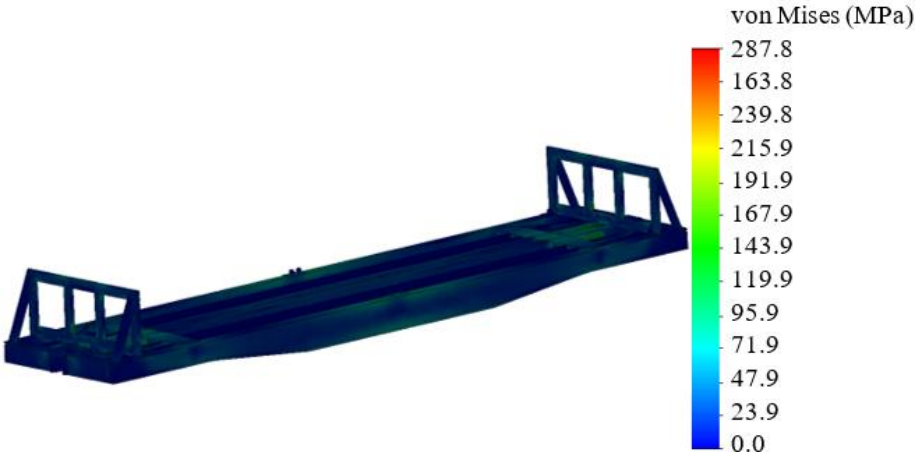

Рисунок 3 – Напружений стан несучої конструкції вагона-платформи

Треба сказати, що отримана величина напружень нижча за допустиме на 7,3%. При цьому, допустимі напруження матеріалу несучої конструкції вагона-платформи для даного розрахункового режиму дорівнюють 310,5 МПа [15]. При ІІІ розрахунковому режимі допустимі напруження прийнято рівними 210 МПа.

Максимальні переміщення в вузлах несучої конструкції вагона-платформи зосереджено в повздовжніх балках рами і складають 3,1 мм (рис. 4).

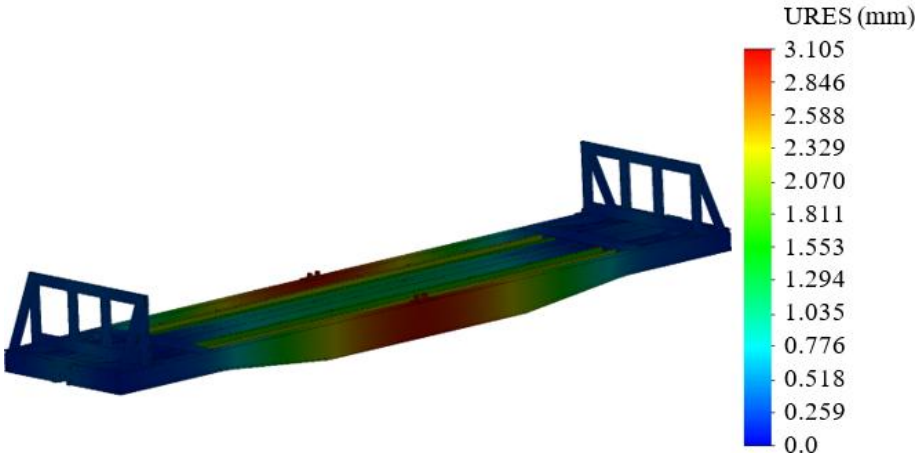

Рисунок 4 – Переміщення в вузлах несучої конструкції вагона-платформи

Результати розрахунку на міцність несучої конструкції вагона-платформи при інших схемах навантажень, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку на міцність несучої конструкції вагона-платформи

Показник міцності	Режим навантаження				
	I			III	
	удар	стиснення	ривок-роз-тягнен-ня	удар-стис-нення	ривок-роз-тяг-нення
Напруження, МПа	287,8	271,3	245,6	206,8	204,6
Переміщення в вузлах, мм	3,1	2,9	2,8	2,8	2,8

Аналізуючи дані, наведені в таблиці 1, можна зробити висновок, що міцність несучої конструкції вагона-платформи дотримується.

Результати проведеного дослідження сприятимуть зменшенню пошкоджень транспортних засобів контейнерних перевезень в експлуатації, формуванню рекомендацій щодо їх проєктування, а також підвищенню рентабельності, в тому числі, в міжнародному сполученні.

Висновки:

1. Сформовано розрахункову схему несучої конструкції вагона-платформи. Враховано, що на несучу конструкцію вагона-платформи діє вертикальне навантаження, зумовлене власною вагою конструкції та вагою від двох контейнерів, типорозміру 1СС. При “ударі” або “стисканні” до задніх упорів автозчепу прикладалося повздовжнє навантаження. При “ривку” або “розтягненні” повздовжнє навантаження прикладалося до передніх упорів.

2. Проведено розрахунок на міцність удосконаленої несучої конструкції вагона-платформи. Встановлено, що максимальні напруження в несучій конструкції вагона-платформи мають місце при “ударі” і складають 287,8 МПа, що нижче за допустимі на 7,3%. Максимальні переміщення в вузлах несучої конструкції вагона-платформи склали 3,1 мм і зосереджені в повздовжніх балках рами.

Література

1. Alyona Lovska. Simulation of loads on the carrying structure of an articulated flat car in combined transportation. International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 7 (4.3). P. 140 – 146. https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19724
2. 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(15). 8605. https://doi.org/10.3390/app13158605
3. Apurba Das, Gopal Agarwal. Investigation of Torsional Stability and Camber Test on a Meter Gauge Flat Wagon. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Proceedings of the 63rd Congress of ISTAM 2018. 2018. P. 271 – 280. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0772-4
4. Alyona Lovska, Volodymyr Nerubatskyi, Andrii Okorokov, Roman Vernyhora, Iryna Zhuravel. Determining loading patterns in the bearing structure of a railroad flatcar with a floor made from sandwich panels. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. №3/7 (123). P. 6 – 13. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.278267
5. V. Stoilov, S. Slavchev, V. Maznichki1, S. Purgic. Analysis of some problems in the theoretical wagon strength studies due to the imperfection of the European legislation. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 618. 012045 https://doi.org/10.1088/1757-899X/618/1/012045
6. Dan Tian, Zhang Ji-min, Wang Yong-qiang. Aerodynamic Simulation of High Speed Container Flat Wagon. Applied Mechanics and Materials. 2011. Vol. 52 – 54. P. 1614 – 1619. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.52-54.1614
7. Ishchenko V. M., Fedosov-Nikonov D. V. Long Wheelbase Flat Wagons: Structural Strength. Metallurgical and Mining Industry. 2017. No. 8. P. 26 – 31.
8. Андрій Сулим, Олег Орлов. Дослідження міцності довгобазного вагона-платформи шляхом проведення вібраційних випробувань. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2022. Вип. 40. С. 138 – 148. https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-12
9. Zhongliang Yang. Comparative Analysis of Strength Calculation for Railway’s FlatCar Body Using Fuzzy Logic and Evolutionary Algorithms. Mobile Information Systems. 2022. Vol.2022. 5899657. https://doi.org/10.1155/2022/5899657
10. Gerlici J., Lovska A., Kozáková K. Research into the Longitudinal Loading of an Improved Load-Bearing Structure of a Flat Car for Container Transportation. Designs. 2025. Vol. 9(1) 12. https://doi.org/10.3390/designs9010012
11. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. Комп’ютерна графіка: SolidWorks: Навчальний посібник. Херсон, 2018. 252 с.
12. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks: Навчальний посібник. Луцьк, 2018. 172 с.
13. Vatulia G. L., Lovska A. O., Krasnokutskyi Ye. S. Research into the transverse loading of the container with sandwich-panel walls when transported by rail. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1254. 012140. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012140
14. Alyona Lovska, Iraida Stanovska, Valeriia Kyryllova, Andrii Okorokov, Roman Vernigora. Determining the vertical load on a container with a floor made of sandwich panels transported by a flat wagon. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. №6/7 (132). P. 6 – 14. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.311324
15. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних).

References

1 Alyona Lovska. (2018). Simulation of loads on the carrying structure of an articulated flat car in combined transportation // International Journal of Engineering & Technology. – Vol. 7 (4.3). P. 140 – 146. https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19724

2 Gerlici J. (2023). Situational adaptation of the open wagon body to container transportation / Gerlici J., Lovska A., Vatulia G., Pavliuchenkov M., Kravchenko O., Solcansky S. // Applied Sciences. – 2023. Vol. 13(15). 8605. https://doi.org/10.3390/app13158605

3 Apurba Das. (2018). Investigation of Torsional Stability and Camber Test on a Meter Gauge Flat Wagon. Lecture Notes in Mechanical Engineering / Apurba Das, Gopal Agarwal // Proceedings of the 63rd Congress of ISTAM 2018. P. 271 – 280. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0772-4

4 Alyona Lovska. (2023). Determining loading patterns in the bearing structure of a railroad flatcar with a floor made from sandwich panels / Alyona Lovska, Volodymyr Nerubatskyi, Andrii Okorokov, Roman Vernyhora, Iryna Zhuravel // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – №3/7 (123). P. 6 – 13. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.278267

5 V. Stoilov. (2019). Analysis of some problems in the theoretical wagon strength studies due to the imperfection of the European legislation / V. Stoilov, S. Slavchev, V. Maznichki1, S. Purgic // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – Vol. 618. 012045 https://doi.org/10.1088/1757-899X/618/1/012045

6 Dan Tian, Zhang. (2011). Aerodynamic Simulation of High Speed Container Flat Wagon / Dan Tian, Zhang Ji-min, Wang Yong-qiang // Applied Mechanics and Materials. – Vol. 52-54. P. 1614 – 1619. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.52-54.1614

7 Ishchenko V. M. (2017). Long Wheelbase Flat Wagons: Structural Strength / Ishchenko V. M., Fedosov-Nikonov D. V. // Metallurgical and Mining Industry. – No. 8. P. 26 – 31.

8 Andrij Sulim. (2022). Doslidzhennya micnosti dovgobaznogo vagona-platformi shlyahom provedennya vibracijnih vi-probuvan / Andrij Sulim, Oleg Orlov // Zbirnik naukovih prac DUIT. Seriya «Transportni sistemi i tehnologiyi». – Vip. 40. S. 138 – 148. https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-12

9 Zhongliang Yang. (2022). Comparative Analysis of Strength Calculation for Railway's FlatCar Body Using Fuzzy Logic and Evolutionary Algorithms /Zhongliang Yang // Mobile Information Systems. – Vol. 2022. 5899657. https://doi.org/10.1155/2022/5899657

10 Gerlici J. (2025). Research into the Longitudinal Loading of an Improved Load-Bearing Structure of a Flat Car for Container Transportation / Gerlici J., Lovska A., Kozáková K. // Designs. – Vol. 9(1) 12. https://doi.org/10.3390/designs9010012

11 Kozyar M. M., Feshuk Yu. V., Parfenyuk O. V. Komp'yuterna grafika: SolidWorks: Navchalnij posibnik. Herson, 2018. 252 s.

12 Pustyulga S. I., Samostyan V. R., Klak Yu. V. Inzhenerna grafika v SolidWorks: Navchalnij posibnik. Luck, 2018. 172 s.

13 Vatulia G. L. (2023). Research into the transverse loading of the container with sandwich-panel walls when transported by rail / Vatulia G. L., Lovska A. O., Krasnokutskyi Ye. S. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – Vol. 1254. 012140. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012140

14 Alyona Lovska. (2024). Determining the vertical load on a container with a floor made of sandwich panels transported by a flat wagon / Alyona Lovska, Iraida Stanovska, Valeriia Kyryllova, Andrii Okorokov, Roman Vernigora. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – №6/7 (132). P. 6 – 14. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.311324

15 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 features of the calculation of the strength of the improved flat wagon structure. The essence of the improvement is to install special superstructures in the cantilever parts of the flat wagon frame to limit the longitudinal movements of containers. To substantiate the proposed improvement, a calculation of the strength of the flat wagon supporting structure was carried out in the I and III design modes. The results of the calculations showed that the maximum stresses in the flat wagon supporting structure arise during an "impact". At the same time, these stresses are 7.3% lower than the permissible ones. The maximum displacements in the nodes of the flat wagon supporting structure were 3.1 mm and are concentrated in the longitudinal beams of the frame. The results of the study will contribute to reducing damage to container transport vehicles in operation, forming recommendations for their design, as well as increasing profitability, including in international traffic.

Keywords: railway transport, flat wagon, structural strength, structural loading, stress state, container transport.

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

Діжо Я. – PhD, доцент кафедри транспорту та підйомно-транспортної техніки Жилінського університету в Жиліні.