

УДК 629.46

DOI: 10.20998/2411-0558.2026.02.07

*А. О. ЛОВСЬКА*, д-р техн. наук, проф., Український державний університет залізничного транспорту,

*А. В. РИБІН*, канд. техн. наук, доц., Український державний університет залізничного транспорту,

*В. Г. РАВЛЮК*, д-р техн. наук, проф., Український державний університет залізничного транспорту,

*Д. І. СКУРІХІН*, канд. техн. наук, доц., Український державний університет залізничного транспорту,

*В. В. БОНДАРЕНКО*, канд. техн. наук, доц., Український державний університет залізничного транспорту

## **ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ МІЦНОСТІ КУЗОВІВ ВАГОНІВ**

В статті наведено приклад застосування інформаційно-вимірювальних технологій при дослідженні міцності хребтової балки напіввагона. Особливістю запропонованої конструкції хребтової балки є те, що вона виготовлена із прямокутної труби. Дослідження проведено із використанням методу електричного тензометрування, реалізованого в лабораторних умовах на зразках зменшеного розміру. При цьому випробуванню підлягала консольна частина хребтової балки. Розбіжність між експериментальними та теоретичними розрахунками на міцність складала близько 3%.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування інноваційних конструкцій вантажних вагонів та підвищенню ефективності їх функціонування. Іл.: 9. Табл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

**Keywords:** напіввагон, несуча конструкція, хребтова балка, напружено-деформований стан балки, навантаженість балки.

Постановка проблеми. Забезпечення конкурентоспроможності залізничної галузі на сучасному етапі її розвитку зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію принципово нових конструкцій рухомого складу. При створенні такого рухомого складу повинні враховуватися особливі вимоги, пов'язані з забезпеченням його міцності та надійності

при експлуатаційних режимах навантаження. Це сприятиме зменшенню навантаженості складових несучих конструкцій, підвищенню ресурсу експлуатації, а як наслідок, зменшенню витрат на утримання [1].

Відомо, що одним з найбільш затребуваних типів вагонів в експлуатації є напіввагон. Основним несучим елементом вагону є рама. Під дією експлуатаційних навантажень вона випробовує знакозмінні напруження, які викликають появу тріщин в складових конструкції (рис. 1) та необхідність здійснення позапланових видів ремонту або, взагалі, виключення вагона з інвентарного парку. Тому з метою забезпечення міцності рами напіввагонів важливим є проведення досліджень щодо можливості зменшення навантаженості їх конструкцій в експлуатації.

**Аналіз літератури.** Питання удосконалень несучих конструкцій вантажних вагонів для забезпечення їх міцності в експлуатації є досить актуальними і висвітлюються в багатьох публікаціях. Результати оптимізації рами вагона за критерієм мінімуму матеріалоємності висвітлено в роботі [2]. Запропонована конструкція рами вагона розрахована на міцність за методом скінчених елементів. При цьому використано європейські стандарти щодо навантаженості несучої конструкції вагона в експлуатації. Разом із цим експериментальні дослідження міцності рами в роботі не проводилось.



*а*



*б*

Рис. 1. Пошкодження рами напіввагона  
а) тріщина в хребтовій балці; б) обрив зварювального шва

Дослідження міцності рами вагона при повздовжньому ударі здійснено в публікації [3]. Наведено можливі варіанти посилення рами вагона, а також елементів, які сприятимуть поглинанню енергії удару. Однак дослідження проведені стосовно рами пасажирського вагона, яка випробовує меншу навантаженість в експлуатації аніж вантажного.

Удосконалення рами вантажного вагона для покращення міцності при експлуатаційних режимах проводиться в публікації [4]. Авторами запропоновано посилення зони взаємодії хребтової балки зі шворневими ребрами жорсткості. Наведено результати розрахунку на міцність з урахуванням запропонованого удосконалення. Однак таке рішення сприяє покращенню міцності рами лише в завданій зоні, а не всієї конструкції.

В публікації [5] висвітлено особливості оптимізації несучих конструкцій вантажних вагонів з метою зменшення їх навантаженості при експлуатаційних режимах. Для цього запропоновано використання сендвіч-панелей в конструкції кузова. Безумовно таке рішення є доцільним та перспективним. Разом з цим, заходам щодо покращення міцності рами авторами не запропоновано.

Визначення причин виникнення дефектів в несучій конструкції вагона типу Sgmns проводиться в роботі [6]. На підставі проведеного аналізу виділено найбільш навантажені зони конструкції рами вагона та запропоновано заходи щодо її посилення. Проведено обґрунтування запропонованого удосконалення рами. Необхідно зазначити, що запропоновані заходи сприяють посиленню тільки найбільш навантаженої зони рами. До того ж таке рішення не сприяє зменшенню її навантаженості при експлуатаційних режимах.

В роботах [7, 8] наведено обґрунтування застосування піноалюмінію в хребтовій балці напіввагона для зменшення її навантаженості при експлуатаційних режимах. Дослідження проведені стосовно напіввагона, несучі елементи якого виготовлені з труб круглого перерізу. Наведено результати визначення динамічної навантаженості несучої конструкції напіввагона, а також її розрахунку на міцність. Встановлено, що така реалізація є доцільною. Однак автори обмежилися теоретичними розрахунками, тобто в роботах відсутнє експериментальне обґрунтування запропонованого рішення. Крім того, використання круглих труб у якості

несучих елементів кузовів напіввагонів має певні технологічні складнощі при їх виготовленні та технічному обслуговуванні.

Перспективи застосування інноваційних матеріалів для зменшення тари та покращення міцності несучих конструкцій вагонів розглянуто в роботі [9]. Наведено обґрунтування використання в якості матеріалу несучих конструкцій вагонів магнієвих сплавів. Також в роботі представлено результати розрахунків на міцність кузовів вагонів, виготовлених з даних матеріалів. Важливо сказати, що використання магнієвих сплавів для покращення міцності рами вагона, зокрема хребтової балки, як найбільш навантаженого вузла, в роботі не наведено.

Аналіз літературних джерел [2 – 9] дозволяє зробити висновок, що питання удосконалень рам вагонів для покращення міцності в експлуатації є актуальними. Однак при цьому не приділялося достатньої уваги питанням покращення міцності рам вагонів шляхом застосування новітніх профілів їх виконання.

**Мета статті.** Метою статті є висвітлення особливостей застосування інформаційно-вимірювальних технологій при дослідженні міцності складових вагонів на прикладі хребтової балки, утвореної прямокутною трубою. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

- провести експериментальне дослідження міцності хребтової балки;
- проаналізувати отримані результати.

**Викладення основного матеріалу статті.** Для покращення міцності несучих конструкцій напіввагонів запропоновано створення їх складових із замкнених профілів. Дослідження проведені на прикладі хребтової балки, як найбільш навантаженого елемента несучої конструкції (рис. 2).

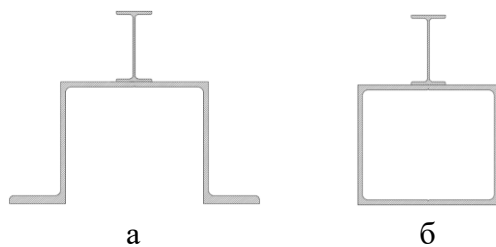


Рис. 2. Переріз хребтової балки

а) типова конструкція; б) удосконалена конструкція

Результати проведених теоретичних досліджень підтвердили доцільність запропонованих рішень [10]. Використання прямокутної труби для виготовлення хребтової балки вагона сприяє зменшенню її навантаженості на 5% у порівнянні із застосуванням типового профілю виконання.

Для підтвердження теоретичних результатів досліджень проведено експериментальне визначення напружено-деформованого стану хребтової балки напіввагона. У зв'язку зі складністю проведення експерименту на повномасштабній конструкції рами, випробуванню підлягала її консольна частина, як найбільш навантажена при дії повздовжніх експлуатаційних сил. При цьому застосовано метод електричного тензометрування.

Консольна частина рами імітувалася дослідними зразками, які представляють собою сталеві квадратні стрижні з геометричними розмірами  $a = 100$  мм,  $t = 3$  мм,  $h = 1000$  мм. Зразки були виготовлені з електрозварної труби із гнутих швелерів, сталь 09Г2С, з фактичною границею текучості 345 МПа.

При проведенні досліджень зразки мали масштаб зменшення 1:3. Кількість дослідних зразків-близнюків дорівнює трьом. До уваги прийнято найбільш неблагоприємний режим навантаження зразка – стиск.

Дослідження проводилися в дослідній лабораторії "Центру діагностики споруд транспортного призначення" при Українському державному університеті залізничного транспорту (м. Харків, Україна).

Для навантаження конструкцій використано гідравлічний прес ПММ-125. Для дослідження характеру деформування експериментальних зразків використано тензорезистори з базою 10 мм та опором 100 Ом (рис. 3), які попередньо пройшли тарирування. Тарирування тензорезисторів здійснювалося на сталевій консольній балочці, рівній опорі згину (рис. 4). На цю балку попередньо наклеювалися тензорезистори (рис. 5). На вантажний майданчик почергово вкладалися вантажі. Знімалися відповідні показання тензорезисторів із використанням реєструючої апаратури. Різниця відліків за приладом відповідала збільшенню відносних деформацій у крайніх точках балочки у розрізі. Обчисливши теоретично величину цієї відносної деформації,

знаючи геометричні розміри перерізу балочки та вагу вантажів, визначено ціну розподілу шкали приладу в одиницях відносної деформації.

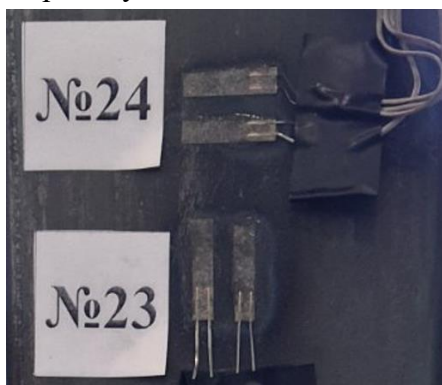


Рис. 3. Розміщення тензорезисторів на дослідному зразку



Рис. 4. Навантаження тарирувальної балки



Рис. 5. Розміщення тензорезисторів на тарирувальній балці

Монтаж тензорезисторів здійснено за мостовою схемою (рис. 6). При проведенні досліджень прийнято наступну схему обпирання експериментальних зразків. Один край елемента жорстко закріплено за

допомогою опорного стакану (рис. 7, а), а інший має вільне обпирання. Розміщення зразків в пресі наведено на рис. 7, б).

Місця наклеювання тензорезисторів (рис. 8) визначені за результатами скінчено-елементного моделювання зразків у програмному комплексі SolidWorks Simulation (рис. 9).

Показання тензорезисторів знімалися за допомогою тензометричної станції ВНП-8. Навантаження прикладали по 40 кН в інтервалі від 0 до 200 кН, при цьому кожний крок навантаження витримували не менше 5 хв. для зняття показань з тензорезисторів. Всі зразки доводилися до руйнування.

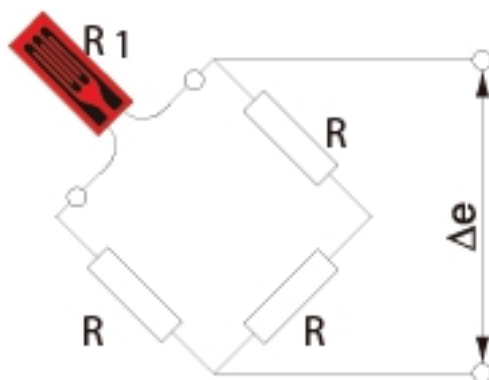


Рис. 6. Мостова схема підключення тензорезисторів

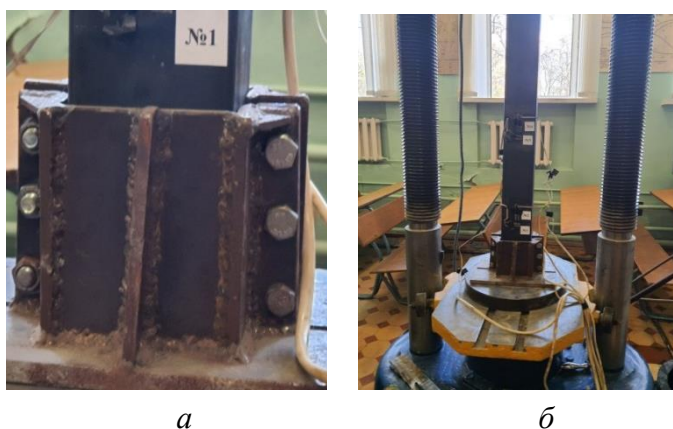


Рис. 7. Схема обпирання експериментальних зразків  
а) закріплення кінцевої частини елемента у стакані;

б) розміщення елемента в пресі



Рис. 8. Розміщення тензорезисторів на дослідному зразку

При випробуваннях дослідних зразків прийнято наступне маркування БХ Пі – балка хребтова пустотіла № зразку.

В таблиці 1 наведено чисельні значення напружень, які виникають в дослідному зразку БХ ПЗ при його навантаженні. Саме для цього зразка отримано найбільші напруження. Отже, напруження в дослідних зразках при дії на них навантаження у 200 кН не перевищують допустимих.

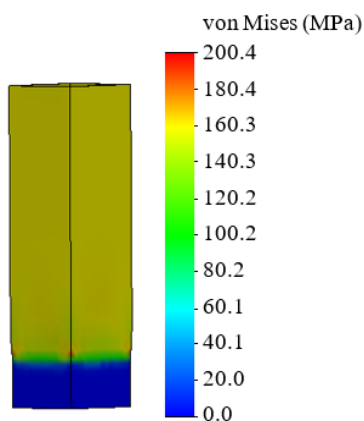


Рис. 9. Напружений стан дослідного зразка

Таблиця 1

Напруження в дослідному зразку БХ ПЗ

Навантаження, т	Напруження, МПа	
	Міст 1	Міст 2
40	45,2	39,6
80	87,4	78,7
120	124,5	119,2
160	165,7	161,3
200	206,6	200,1

Встановлено, що руйнування зразка БХ П1 відбувається при сприйнятті ним навантаження у 215 кН; зразка БХ П2 – 210 кН; БХ ПЗ – 230 кН.

Розбіжність між експериментальними та теоретичними розрахунками на міцність складала близько 3%.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування інноваційних конструкцій вантажних вагонів та підвищенню ефективності їх функціонування.

**Висновки.**

1. Проведено експериментальне дослідження напружено-деформованого стану зразків замкненого перерізу. При цьому застосовано метод електричного тензOMETрування. Дослідження проведені в лабораторних умовах на пресі. Підключення тензорезисторів здійснювалося за мостовою схемою. Стискання зразків проводилося в діапазоні 40 – 200 кН.

2. На підставі проведених досліджень встановлено, що максимальні напруження в пустотілому зразку при стисканні становить близько 206 МПа. Ці напруження є нижчими за допустимі. Отже міцність зразка дотримується.

Навантаження, при яких відбувалося руйнування зразків: БХ П1 – 215 кН; БХ П2 – 210 кН; БХ ПЗ – 230 кН.

Розбіжність між експериментальними та теоретичними розрахунками на міцність складала близько 3%.

**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.

**Список літератури:**

1. *G. L. Vatulia*. Experimental research of the stress-strain state of the energyabsorbing center sill of an open wagon / G. L. Vatulia, A. O. Lovska, A. V. Rybin, M. V. Pavliuchenkov, D. H. Petrenko // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2025. – Vol. 1499 012072. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012072>
2. *Emmanuel Matsika*. Selection and ranking of the main beam geometry of a freight wagon for lightweighting / Emmanuel Matsika, C. O'Neill, Marzio Grasso, Antonio De Iorio // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F. Journal of Rail and Rapid Transit. – 2016. – Vol. 232(2). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1177/0954409716677075>
3. *P. Hosseini-Tehrani*. Study on crashworthiness of wagon's frame under frontal impact / P. Hosseini-Tehrani, V. Bayat // International Journal of Crashworthiness. – 2011. – Vol. 16. – Issue 1. – P. 25 – 39. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1080/13588265.2010.499698>
4. *D.Ya. Antipin*. Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the OpenTop Wagon Frame by means of Computer Simulation / D.Ya. Antipin, D.Yu Racin, S.G. Shorokhov // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 150 – 154
5. *Hyun-Ah Lee*. Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels / Hyun-Ah Lee, Seong-Beom Jung, Hwan-Hak Jang, Dae-Hwan Shin, Jang Uk Lee, Kwang Woo Kim and Gyung-Jin Park // Journal of Rail and rapid transit. – 2016. – Vol. 11.
6. *Vladimir Milovanovic*. Identification causes of cracking on the underframe of wagon for containers transportation – Fatigue strength assessment of wagon welded joints / Vladimir Milovanovic, Vladimir Dunic, Dragan Rakic, Miroslav Zivkovic // Engineering Failure Analysis. – 2012. – Vol. 31. – P. 118–131.
7. *Fomin O.* Research into the Strength of an OpenWagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam / Fomin O., Gerlici J., Gorbunov M., Vatulia G., Lovska A., Kravchenko K. // Materials. – 2021. – Vol. 14 (12). – 3420. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/ma14123420>

8. Fomin O. Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills / Fomin O., Gorbunov M., Lovska A., Gerlici J., Kravchenko K. // *Materials*. – 2021. – Vol. 14(8). – 1915. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/ma14081915>
9. Woo Geun Lee. 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*. – 2016. – Vol. 232. – Issue 1. – P. 25 – 42.
10. Рибін, А. В. (2021). Удосконалення несучих конструкцій вантажних вагонів шляхом використання наповнювачів в їх складових: дисертація, Харків, 194 с.

### **References:**

1. Vatulia, G. L., Lovska, A. O., Rybin, A. V., Pavliuchenkov, M. V., Petrenko, D. H. (2025). “Experimental research of the stress-strain state of the energyabsorbing center sill of an open wagon”. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 1499 012072. available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012072>
2. Emmanuel Matsika, C. O'Neill, Marzio Grasso, Antonio De Iorio. (2016). “Selection and ranking of the main beam geometry of a freight wagon for lightweighting”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F. Journal of Rail and Rapid Transit*. Vol. 232(2). available at: <https://doi.org/10.1177/0954409716677075>
3. P. Hosseini-Tehrani, V. Bayat. (2011). “Study on crashworthiness of wagon's frame under frontal impact”. *International Journal of Crashworthiness*. Vol. 16. Issue 1. P. 25 – 39. available at: <https://doi.org/10.1080/13588265.2010.499698>
4. Antipin, D.Ya., Racin, D.Yu., Shorokhov, S.G. (2016). “Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the OpenTop Wagon Frame by means of Computer Simulation”. *Procedia Engineering*. Vol. 150. P. 150 – 154
5. Hyun-Ah Lee, Seong-Beom Jung, Hwan-Hak Jang, Dae-Hwan Shin, Jang Uk Lee, Kwang Woo Kim and Gyung-Jin Park. (2016). “Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels”. *Journal of Rail and rapid transit*. Vol. 11.
6. Vladimir Milovanovic, Vladimir Dunic, Dragan Rakic, Miroslav Zivkovic. (2012). “Identification causes of cracking on the underframe of wagon for containers transportation – Fatigue strength assessment of wagon welded joints”. *Engineering Failure Analysis*. Vol. 31. P. 118–131.
7. Fomin, O., Gerlici, J., Gorbunov, M., Vatulia, G., Lovska, A., Kravchenko, K. (2021). “Research into the Strength of an OpenWagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam”. *Materials*. Vol. 14 (12), 3420. available at: <https://doi.org/10.3390/ma14123420>
8. Fomin, O., Gorbunov, M., Lovska, A., Gerlici, J., Kravchenko, K. (2021). Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills. *Materials*. Vol. 14(8), 1915. available at: <https://doi.org/10.3390/ma14081915>

9. Woo Geun Lee, Woo Geun Lee, Jung-Seok Kim, Seung-Ju Sun, Jae-Yong Lim. (2016). "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*. Vol. 232. Issue 1. P. 25 – 42.

10. Rybin, A. V. (2021). Udoskonalennia nesuchykh konstruksii vantazhnykh vahoniv shliakhom vykorystannia napovniuvachiv v yikh skladovykh: dysertatsiia, Kharkiv, 194 s.

*Статтю представив д-р технічних наук, професор НТУ "ХПІ" Качанов П.О.*

*Надійшла (received) 13.01.2026*

*Стаття прийнята до друку 27.01.2026*

*Опублікована 27.03.2026*

**Lovska Alyona Oleksandrivna** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Professor at the Department of Wagon Engineering and Product Quality; tel.: (057) 730-10-35; e-mail: [alyonaLovskaya.vagons@gmail.com](mailto:alyonaLovskaya.vagons@gmail.com).  
ORCID ID: 0000-0002-8604-1764

**Rybin Andriy Viktorovych** – PhD, Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Associate Professor at the Department of Wagon Engineering and Product Quality; tel.: (057) 730-10-35; e mail: [rybinandrey2006@gmail.com](mailto:rybinandrey2006@gmail.com).  
ORCID ID: 0000-0003-4430-8018

**Ravlyuk Vasyl Grigorovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Head of the Department of Wagon Engineering and Product Quality; tel.: (057) 730-10-35; e mail: [ravvg@ukr.net](mailto:ravvg@ukr.net).  
ORCID ID: 0000-0003-4818-9482

**Skurikhin Dmytro Igorovich** – PhD, Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Associate Professor at the Department of Wagon Engineering and Product Quality; tel.: (057) 730-10-35; e mail: [skurikhin@i.ua](mailto:skurikhin@i.ua).  
ORCID ID: 0000-0002-1122-1234

**Bondarenko Vyacheslav Volodymyrovych** – PhD, Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Associate Professor at the Department of Wagon Engineering and Product Quality; tel.: (057) 730-10-35; e mail: [skurikhin@i.ua](mailto:skurikhin@i.ua).  
ORCID ID: 0000-0003-4019-4017

**УДК 629.46**

**Особливості застосування інформаційно-вимірювальних технологій при дослідженні міцності кузовів вагонів / Ловська А. О., Рибін А. В., Равлюк В. Г., Скуріхін Д. І., Бондаренко В. В.** Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2026. – № 2 (16). – С. 113 – 125.

В статті наведено приклад застосування інформаційно-вимірювальних технологій при дослідженні міцності хребтової балки напіввагона. Особливістю запропонованої конструкції хребтової балки є те, що вона виготовлена із прямокутної труби. Дослідження проведено із використанням методу електричного тензометрування, реалізованого в лабораторних умовах на зразках зменшеного розміру. При цьому випробуванню підлягала консольна частина хребтової балки. Розбіжність між експериментальними та теоретичними розрахунками на міцність складала близько 3%.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування інноваційних конструкцій вантажних вагонів та підвищенню ефективності їх функціонування. Іл.: 9. Табл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

**Ключові слова:** напіввагон, несуча конструкція, хребтова балка, напружено-деформований стан балки, навантаженість балки.

**UDC 629.46**

**Features of the application of information and measurement technologies in the study of the strength of wagon bodies / A. O. Lovska, A. V. Rybin, V. G. Ravlyuk, D. I. Skurikhin, V. V. Bondarenko** // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2026. – No. 2 (16). – P. 113 – 125.

The article provides an example of the application of information and measurement technologies in the study of the strength of the backbone beam of a gondola. A feature of the proposed design of the backbone beam is that it is made of a rectangular tube. The study was conducted using the method of electrical strain measurement, implemented in laboratory conditions on samples of reduced size. In this case, the cantilever part of the backbone beam was tested. The discrepancy between the experimental and theoretical calculations of the strength was about 3%.

The conducted research will contribute to the creation of developments in the design of innovative structures of freight cars and increasing the efficiency of their functioning. Figs.: 9. Tabl.: 1. Refs.: 10 item.

**Key words:** open wagon, supporting structure, backbone beam, stress-strain state of the beam, beam loading.