

Герліці Ю., Ловська А. О., Діжо Я., Рибін А. В.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОПЕРЕЧНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ КУЗОВА НАПІВВАГОНА ЗІ СТІНАМИ ІЗ СЕНДВІЧ-ПАНЕЛЕЙ

Для зменшення навантаженості обшивки кузова напіввагона, а відповідно і пошкоджень, пропонується виготовлення її секційною. При цьому кожна секція утворюється сендвіч-панелями. Конструкція панелі являє собою два металевих листи між якими знаходиться енергопоглинальний матеріал.

Для обґрунтування такого рішення проведено дослідження поперечної навантаженості кузова напіввагона комп'ютерним моделюванням. Дослідження проведено на прикладі універсального напіввагона моделі 12-757. Підлогу даної моделі напіввагона утворюють кришки розвантажувальних люків. У зв'язку з тим, що вони мають шарнірне з'єднання з кузовом при побудові просторової моделі вони не приймалися до уваги. Розрахунок реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation за методом скінчених елементів. При складанні розрахункової схеми кузова напіввагона враховано, що на нього діє вертикальне навантаження, поперечне, а також тиск насипного вантажу. Розрахунок здійснено за умови завантаження кузова кам'яним вугіллям, оскільки даний тип вантажу є одним із найбільш поширених при перевезеннях в напіввагонах. У якості матеріалу кузова застосовано сталь марки 09Г2С. Для моделювання енергопоглинального матеріалу в сендвіч-панелях застосовано зв'язок "пружина-демпфер". Скінчено-елементна модель утворювалася ізопараметричними тетраедрами. Для визначення їх оптимальної чисельності застосовано графоаналітичний метод. Встановлено, що максимальне прискорення кузова напіввагона на 4,3% нижче за те, що діє на типову конструкцію.

Результати проведених досліджень сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування сучасних конструкцій залізничних вагонів з покращеними техніко-економічними характеристиками та підвищенню ефективності використання залізничного транспорту.

Ключові слова: напіввагон, сендвіч-панель, динамічна навантаженість, моделювання динаміки, залізничні перевезення.

Актуальність дослідження. Залізничний транспорт є однією із основних галузей, яка забезпечує ефективність функціонування транспортної інфраструктури. При цьому визначальну роль у роботі залізничного транспорту відіграє рухомий склад.

Відомо, що найпоширенішим типом вагону у експлуатації є напіввагони. Особливість даного типу вагона полягає у відсутності даху. Тому, зазвичай, в напіввагонах перевозяться вантажі, які не потребують захисту від атмосферних опадів. За необхідності напіввагони оснащують зйомними дахами або використовують захисні теннти, що дозволяє розширити номенклатуру перевезених в них вантажів.

Постановка проблеми. Дослідження технічного стану кузовів напіввагонів в експлуатації показали, що одним з найбільш пошкоджуваних вузлів є обшивка бокових стін. Причиною пошкоджень обшивки можуть бути вантажно-розвантажувальні операції, а також податливість вантажів, що перевозяться у кузові. Наявність власного ступеня вільності вантажу може бути обумовлена як ненадійним закріпленням в кузові, так і особливостями самого вантажу. Така обставина викликає не тільки необхідність здійснення позапланових видів ремонту вагонів, а і загрожує безпеці руху вагона у складі залізничного поїзда. У зв'язку з цим, важливим є розробка та впровадження рішень, спрямованих на зменшення навантаженості кузовів напіввагонів при експлуатаційних режимах.

Теоретичний аналіз дослідження. Питання удосконалень кузовів напіввагонів є досить актуальними та розповсюдженими. Це підтверджується великою кількістю наукових публікацій. Так, наприклад, для зменшення динамічної навантаженості кузовів вантажних вагонів в наукових статтях [1, 2] автори запропонували використання сендвіч-панелей у якості обшивки бокових стін кузова залізничного вагона. Дане обґрунтування підтверджується відповідними розрахунками на міцність кузова, реалізованими за методом скінчених елементів. Разом з цим, дослідження, присвячені визначенню динамічної навантаженості кузова з урахуванням використання у якості обшивки бокових стін сендвіч-панелей, а також визначення їх параметрів в роботах не проводилося.

Особливості удосконаленої конструкції напіввагона з обшивкою бокових стін із зчленованих оболонок висвітлено у публікації [3]. При цьому несучі елементи кузова вагона виготовлені із круглих труб, а у якості енергопоглинального матеріалу в конструкції використовується піноалюміній. Обґрунтування такого конструкційного удосконалення вагона підтверджено математичним та комп'ютерним моделюванням його повздовжньої навантаженості. Авторами до уваги прийнято удар вагона в автозчеп при маневрах, силою у 3,5 МН. При цьому поза увагою авторів залишилися питання визначення поперечної навантаженості кузова напіввагона.

Авторським колективом роботи [4] проведені дослідження щодо обґрунтування впровадження композитних панелей у якості обшивки бокових стін. Використання таких панелей забезпечує зменшення тари кузова вагона, а також сприяє підвищенню його витривалості. Наведені в статті результати досліджень підтверджують доцільність використання такого впровадження з наукової точки зору. Однак авторами не проводилося визначення динамічної навантаженості кузова напіввагона з урахуванням запропонованого удосконалення.

Для покращення міцності обшивки бокових стін кузова напіввагона в статті [5] запропоновано посилення її найбільш навантаженої зони поперечними гофрами. Це сприяє підвищенню втомної міцності обшивки кузова на 3,7 % у порівнянні з типовою. Наведено результати розрахунків динаміки та міцності кузова напіввагона з

урахуванням даного удосконалення. Треба сказати, що використання поперечних гофр не сприяє зменшенню динамічної навантаженості кузова напіввагона в експлуатації.

В публікації [6] наведено обґрунтування застосування сендвіч-панелей у якості настилу підлоги залізничного вагона. З урахуванням запропонованого рішення динамічні навантаження, які діють на несучу конструкцію вагона зменшуються на 8,4% у порівнянні з типовою. При цьому прискорення, які діють на вантаж, розміщений на вагоні-платформі, зменшуються на 11,7%. Разом з цим, визначенню поперечної навантаженості вагона зі складовими із сендвіч-панелей в роботі уваги не приділялося.

Дослідження можливості застосування стільникових сендвіч-панелей у якості складових кузова вагона-хопера проводиться у публікації [7]. Наведено результати тестування вагона-хопера з урахуванням запропонованого удосконалення. Аналіз цих результатів підтверджує доцільність запропонованого впровадження. Важливо відмітити, що авторами не досліджувалися питання визначення динамічної навантаженості кузова вагона-хопера з обшивкою із сендвіч-панелей.

Проведений аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновок, що питання використання сендвіч-панелей в конструкціях залізничних вагонів є актуальними. Однак визначенню поперечної навантаженості кузовів вагонів з обшивкою бокових стін із сендвіч-панелей досі належної уваги не приділялося.

Мета статті: висвітлення особливостей комп'ютерного моделювання поперечної навантаженості кузова напіввагона з обшивкою бокових стін із сендвіч-панелей.

Задачі дослідження. Для досягнення зазначеної мети визначені такі задачі:

- сформулювати комп'ютерну модель для визначення поперечної навантаженості кузова напіввагона з обшивкою бокових стін із сендвіч-панелей;
- провести розрахунок поперечної навантаженості кузова напіввагона.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для зменшення навантаженості обшивки кузова напіввагона, а відповідно і пошкоджень, пропонується виготовлення її секційною. При цьому кожна секція утворюється сендвіч-панелями. Конструкція панелі являє собою два металевих листи між якими знаходиться енергопоглинальний матеріал (рис. 1).

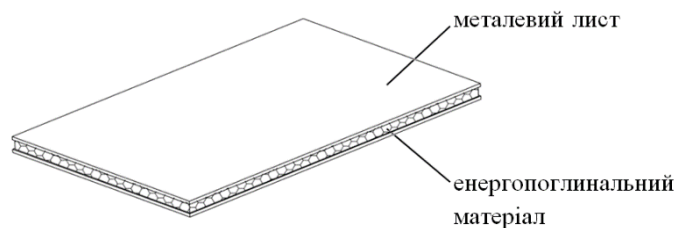


Рисунок 1 – Сендвіч-панель

З метою визначення динамічного навантаження, яке діє на кузов напіввагона з урахуванням використання у якості обшивки бокових стін сендвіч-панелей проведено комп'ютерне моделювання. До уваги прийнято коливання бічної хитавиці вагона, оскільки при цьому має місце найбільша навантаженість бокових стін.

Дослідження проведено на прикладі напіввагона моделі 12-757. Підлогу даної моделі напіввагона утворюють кришки розвантажувальних люків. У зв'язку з тим, що вони мають шарнірне з'єднання з кузовом при побудові просторової моделі вони не приймалися до уваги.

Просторову модель кузова напіввагона побудовано в SolidWorks (рис. 2).

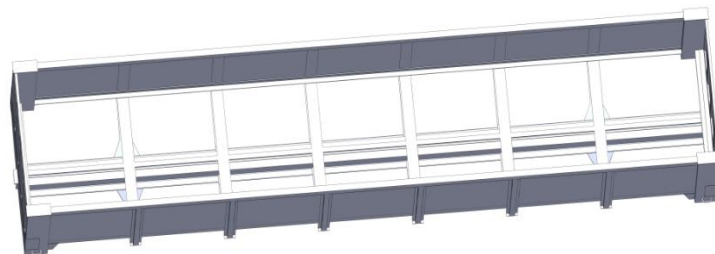


Рисунок 2 – Просторова модель кузова напіввагона зі стінами із сендвіч-панелей

Модель враховує складові кузова, які жорстко взаємодіють між собою. Розрахунок на міцність проведено за методом скінчених елементів в SolidWorks Simulation. Розрахункова схема кузова напіввагона враховує такі навантаження: вертикальне P_v та поперечне P_n , яке включає тиск розпору насипного вантажу, відцентрове та вітрове (рис. 3).

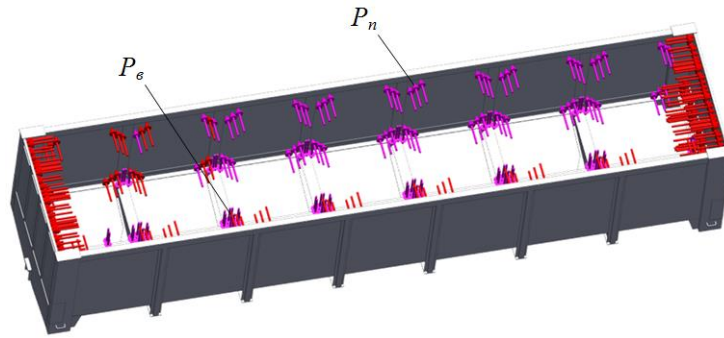


Рисунок 3 – Розрахункова схема кузова напіввагона зі стінами із сендвіч-панелей

Розрахунок здійснено за умови завантаження кузова кам'яним вугіллям, оскільки даний тип вантажу є одним із найбільш поширених при перевезеннях в напіввагонах.

Тиск розпору вантажу на стіни визначено за формулою [8]:

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

де γ – щільність насипного вантажу;
 H – висота бокової стіни;
 φ – кут природнього відкосу вантажу;
 g – прискорення вільного падіння.

Для моделювання енергопоглинального матеріалу в сендвіч-панелях застосовано зв'язок “пружина-демпфер” (рис. 4). Розрахунок реалізовано при жорсткості енергопоглинального матеріалу в сендвіч-панелі 2,5 кН/м та коефіцієнті в'язкого опору близько 3,0 кН · с/м. Дані параметри визначено шляхом математичного моделювання динамічної навантаженості кузова напіввагона.

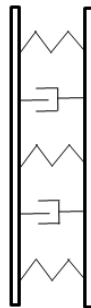


Рисунок 4 – Схема пружно-в'язкого зв'язку між листами в сендвіч-панелі

Обпирання кузова на візки моделювалося постановкою жорстких зв'язків на п'ятниках та ковзунах.

Скінчено-елементна модель утворювалася ізопараметричними тетраедрами. Їх чисельність склала 351885 одиниць, а вузлів – 116577 (рис. 5). При цьому для визначення їх оптимальної чисельності застосовано графоаналітичний метод.

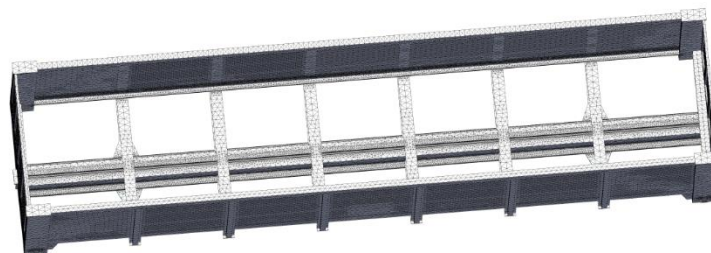


Рисунок 5 – Скінчено-елементна модель кузова напіввагона

У якості матеріалу кузова застосовано сталь марки 09Г2С. Результати розрахунку наведено на рис. 6.

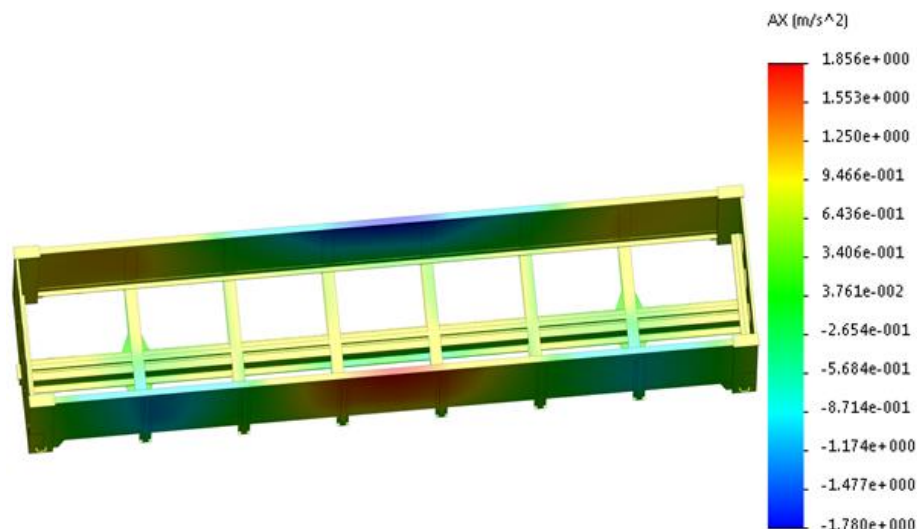


Рисунок 6 – Поля розподілень прискорень в несучій конструкції кузова напіввагона

Максимальні прискорення виникають у середній частині бокової стіни і складають $1,85 \text{ м/с}^2$. В консольних частинах кузова максимальне прискорення склало $1,28 \text{ м/с}^2$. Таке розподілення полів прискорень пояснюється тим, що закріплення кузова відбувалося за п'ятники. Важливо сказати, що з урахуванням запропонованого удосконалення, прискорення, які діють на кузов напіввагона, на 4,3% нижче за ті, що діють на типову конструкцію кузова. Це доводить доцільність застосування сендвіч-панелей у якості обшивки стін кузова напіввагона.

Висновки:

Проведено комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості кузова напіввагона з обшивкою бокових стін із сендвіч-панелей. Встановлено, що максимальні прискорення, які діють на кузов напіввагона складають $1,85 \text{ м/с}^2$ і зосереджені в середній частині бокової стіни. Дане прискорення на 4,3% нижче за те, що діє на типову конструкцію напіввагона.

Результати проведених досліджень сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування сучасних конструкцій залізничних вагонів з покращеними техніко-економічними характеристиками та підвищенню ефективності використання залізничного транспорту.

Література

1. M. Płaczek, A. Wróbel, A. Buchacz. A concept of technology for freight wagons modernization. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. No. 16. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012107>.
2. Hyun-Ah Lee, Seong-Beom Jung, Hwan-Hak Jang, Dae-Hwan Shin, Jang Uk Lee, Kwang Woo Kim and Gyung-Jin Park. Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels. Journal of Rail and rapid transit. 2016. No. 11.
3. Fomin O., Gerlici J., Gorbunov M., Vatulia G., Lovska A., Kravchenko K. Research into the Strength of an OpenWagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam. Materials. 2021. Vol. 14 (12), 3420. <https://doi.org/10.3390/ma14123420>.
4. Andrzej Wróbel, Marek Płaczek, Andrzej Buchacz. An Endurance Test of Composite Panels. Solid State Phenomena. 2017. Vol. 260. P. 241 – 248. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.260.241>.
5. Glib Vatulia, Alyona Lovska, Sergiy Myamin, Andriy Rybin, Volodymyr Nerubatskyi, Denys Hordiienko. Determining patterns in loading the body of a gondola with side wall cladding made from corrugated sheets under operating modes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 2/7 (122). P. 6 – 14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.275547>
6. 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. Vol. 3/7 (123). P. 6 – 13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.278267>
7. Ayman Al-Sukhon, Mostafa SA ElSayed. 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(8). <https://doi.org/10.1177/09544097211049640>.
8. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних).

References

1. M. Płaczek.(2016). A concept of technology for freight wagons modernization / M. Płaczek, A. Wróbel, A. Buchacz // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – No. 16. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012107>.
2. Hyun-Ah Lee. (2016). 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. – No. 11.

- 3 Fomin O. (2021). Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam / Fomin O., Gerlici J., Gorbunov M., Vatulia G., Lovska A., Kravchenko K. // *Materials*. – Vol. 14 (12), 3420. <https://doi.org/10.3390/ma14123420>.
- 4 Andrzej Wróbel. (2017). An Endurance Test of Composite Panels / Andrzej Wróbel, Marek Płaczek, Andrzej Buchacz // *Solid State Phenomena*. – Vol. 260. P. 241 – 248. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.260.241>.
- 5 Glib Vatulia. (2023). Determining patterns in loading the body of a gondola with side wall cladding made from corrugated sheets under operating modes / Glib Vatulia, Alyona Lovska, Sergiy Myamin, Andriy Rybin, Volodymyr Nerubatskyi, Denys Hordiienko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – Vol. 2/7 (122). P. 6 – 14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.275547>
- 6 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*. – Vol. 3/7 (123). P. 6 – 13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.278267>
- 7 Ayman Al-Sukhon. (2021). Design optimization of hopper cars employing functionally graded honeycomb sandwich panels / Ayman Al-Sukhon, Mostafa SA ElSayed // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F. Journal of Rail and Rapid Transit*. – Vol. 236(8). <https://doi.org/10.1177/095440972111049640>.
- 8 DSTU 7598:2014. Vagoni vantazhni. Zagal'ni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih).

In order to reduce the load on the paneling of the open wagon body, and accordingly the damage, it is proposed to make it sectional. At the same time, each section is formed by sandwich panels. The design of the panel is two metal sheets between which there is an energy-absorbing material.

To justify such a decision, a study of the transverse load of the open wagon body was carried out by computer simulation. The study was carried out on the example of a universal open wagon model 12-757. The floor of this open wagon model is formed by the covers of the unloading hatches. Due to the fact that they have a hinged connection with the body, they were not taken into account when building the spatial model. The calculation was implemented in the SolidWorks Simulation software complex using the finite element method. When drawing up the calculation diagram of the open wagon body, it is taken into account that the vertical load, transverse load, as well as the pressure of the bulk cargo act on it. The calculation was made on the condition that the body is loaded with hard coal, since this type of cargo is one of the most common when transported in semi-trailers. 09G2S steel is used as the body material. To model energy-absorbing material in sandwich panels, the "spring-damper" connection is used. The finite-element model was formed by isoparametric tetrahedra. To determine their optimal number, the grapho-analytical method was used. It was established that the maximum acceleration of the body of an open wagon is 4.3% lower than that acting on a typical design.

The results of the conducted research will contribute to the creation of studies on the design of modern structures of railway wagons with improved technical and economic characteristics and increase the efficiency of the use of railway transport.

Key words: open wagon, sandwich panel, dynamic load, dynamics simulation, railway transportation.

Герліці Ю. – Dr. Ing., професор кафедри транспорту та підйомно-транспортної техніки Жилінського університету в Жиліні.

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.

Рибін А. В. – к.т.н., доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту.