

УДК 629.463.001.63  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/50>

**Фомін О.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Прокопенко П.М.**

Філія «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту»  
АТ «Укрзалізниця»

**Фоміна А.М.**

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

**Гулько Є.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

## ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ВАГОНА МОДЕЛІ 918 ТА МОЖЛИВОСТІ ПЕРЕОБЛАДНАННЯ (З ВПРОВАДЖЕННЯМ КОМПОЗИТИВ) ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ НАСИПНИХ ВАНТАЖІВ

*В статті висвітлено результати проведеного аналізу напружено-деформованого стану кузова вагону моделі 918 при (не типових) навантаженнях сипучим вантажем.*

*З метою забезпечення безперервності залізничних перевезень в сучасних складних умовах, пропонується за допомогою науково-прикладних підходів опрацювати можливість використання існуючих моделей вагонів для не типових, для них, видів перевезень. А саме розглянути можливість застосування рефрижераторних вагонів для перевезення насипних вантажів. Для проведення таких досліджень застосований системний підхід. Який включав: визначення дослідження особливостей впливу насипних вантажів на конструкції рухомого складу; аналіз конструкторської та технологічної документації для створення просторової 3-Д моделі вагону, що досліджується; створення за допомогою сучасного програмного комплексу розрахункової моделі; перевірка адекватності розробленої моделі та точності отриманих за її допомогою даних; прикладання не типових (відповідних дії сипучих вантажів) розрахункових навантажень; отримання та аналіз картин напружено-деформованих станів методом скінчених елементів.*

*Отримані результати аналізу напружено-деформованого стану кузова вагону моделі 918 при навантаженнях сипучим вантажем дозволили оцінити потенційні можливості таких перевезень. Також даний проведений аналіз дає можливість визначити можливість виконання окремих елементів кузова вагона з композитних матеріалів, що в свою чергу покращить показники динаміки, міцності та довговічності такої конструкції.*

*Такі результати доцільно використовувати при проведенні науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт з удосконалення (модернізації) існуючих секцій рефрижераторних вагонів для забезпечення можливості перевезення в них насипних вантажів. Що, в свою чергу, дозволить підвищити ефективність функціонування вітчизняного парку вантажних вагонів.*

**Ключові слова:** механічна інженерія, машинобудування, вантажні вагони, міцнісні розрахунки, композитні матеріали, міцність.

**Постановка проблеми.** Сучасні умови функціонування рухомого складу залізниць України є дуже складними. Сказане обґрунтовується необхідністю забезпечення потреб в залізничних вантажних перевезеннях існуючими зразками парку вагонів. Що вимагає їх застосування в не типових (не для перевезення визначених технічними умовами вантажів) умовах експлуатації. Зокрема виникає необхідність застосування секцій рефрижераторних вагонів для перевезення різного роду насипних вантажів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

В роботі [1] автори описують проблематику появи дефектів у вигляді тріщин на вертикальному листі хребтової балки вагонів самоскидів, ремонт яких не передбачено документацією на поточний ремонт. В науковій публікації приведено результати аналізу несправностей вагонів самоскидів, результати контрольних випробувань та дослідження міцності з метою підтвердження теорії виникнення тріщин на хребтовій балці розрахун-

ково-експериментальним методом в програмному пакеті SolidWorks Simulation.

Автори в публікації [2] автори розглядають питання спрямоване на розробку сучасної методики оцінки втомної довговічності нових залізничних вантажних вагонів. З метою оцінки втомної довговічності автори пропонують проводити прискорені стендові випробування з імітацією умов реальної експлуатації вантажних вагонів. Проте в роботі не описане питання оцінки втомної довговічності розрахунково-експериментальними методами модернізованих кузовів вантажних вагонів. В дослідженнях [3] та [4] авторські колективи запропонували підходи та методи щодо можливості розрахунків машинобудівних конструкцій на не типові навантаження. При цьому були отримані відповідні математичні моделі, графічні та аналітичні залежності. У роботі [5] проведено визначення динамічного навантаження несучих конструкцій основних типів вантажних вагонів з фактичними розмірами в основних умовах експлуатації. Також в роботі враховано два випадки навантаження несучих конструкцій вагонів – у вертикальній та поздовжній площинах. Результати роботи дають змогу розробити концептуальні основи відновлення ефективного функціонування застарілих вантажних вагонів.

Вантажні вагони в основному складаються зі зварних сталевих конструкцій, що піддаються змінним у часі навантаженням. Тому в роботі [6] авторами запропоновано декілька технічних кодів для оцінки втоми несучих конструкцій. Також у даній статті проведено порівняння досліджуваних кодів з оцінки втоми несучих конструкцій вантажного вагона. Отримані результати дають повний огляд впливу вибору конкретного технічного коду для оцінки та прогнозування втомної довговічності.

Наукові публікації [7, 8] присвячені розгляду особливостей впливу вантажів на різні типи конструкцій. При цьому більша увага приділена наливним вантажам а не насипним. В дослідження [9, 10] були представлені результати науково-дослідних робіт з впливу не типових навантажень на конструкції вантажних вагонів. При цьому розглядалися навантаження які виникають при транспортуванні вагонних конструкцій на поромках.

Стаття [11] присвячена діагностиці технічного стану несівних модулів транспорту. При цьому основна увага були приділена рушійним силам та рушійним моментам. В дослідженні [12] представлені результати рішення важливих науково-практичних питань для конструкцій напіввагонів.

Саме такі конструкції приймають основну участь в перевезеннях насипних вантажів. Однак на сьогодні парк таких вагонів не зовсім задовольняє потреби у сезонних перевезеннях. До того ж парк напіввагонів характеризується великою зношеністю та застарілістю.

Результати виконаного аналізу різного роду інформаційних джерел засвідчили, що питанням розгляду можливості перевезення сипучих вантажів в секціях рефрижераторних вагонів не приділено достатню увагу.

**Постановка завдання.** Метою статті є висвітлення результатів проведеного аналізу напружено-деформованого стану кузова вагону тип-918 при (не типових) навантаженнях сипучим вантажем. Такий аналіз проводився з метою дослідження можливості перевезення різних видів насипних вантажів (наприклад різного роду сировини, сільськогосподарської продукції, будівельних матеріалів, на інших) у існуючій конструкції секції рефрижераторного вагону та використання в його конструкції композитних матеріалів.

**Виклад основного матеріалу.** Рефрижераторний вагон представляє собою універсальний критий вагон, призначений для перевезення швидкопсувних вантажів, більшість з яких складають продукти харчування.

Для проведення оцінки напружено-деформованого стану (міцнісного розрахунку за Нормами) несучих конструкцій вагону моделі 918 методом кінцевих елементів у комп'ютерному пакеті SolidWorks побудовано відповідну 3D модель.

3D-модель кузова вагона моделі 918 побудована згідно конструкторської документації заводу-виробника і складається із більш ніж 550 деталей (рис. 1).

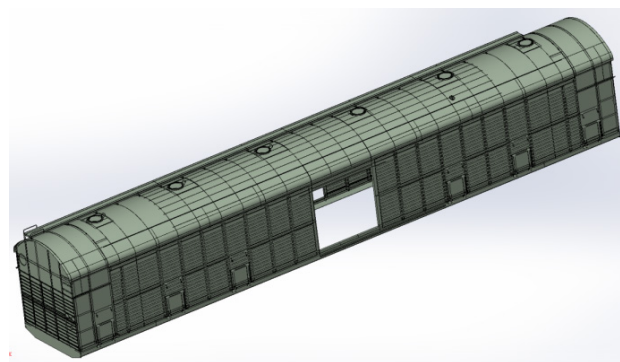


Рис. 1. 3D-модель кузова вагона

Для проведення розрахунків на міцність розроблено кінцево-елементну модель кузова вагона з розмірами кінцевих елементів 5 мм і 50 мм

Схему навантаження кузова вагона моделі 918 розроблено згідно [12]. Розрахунки виконувалися

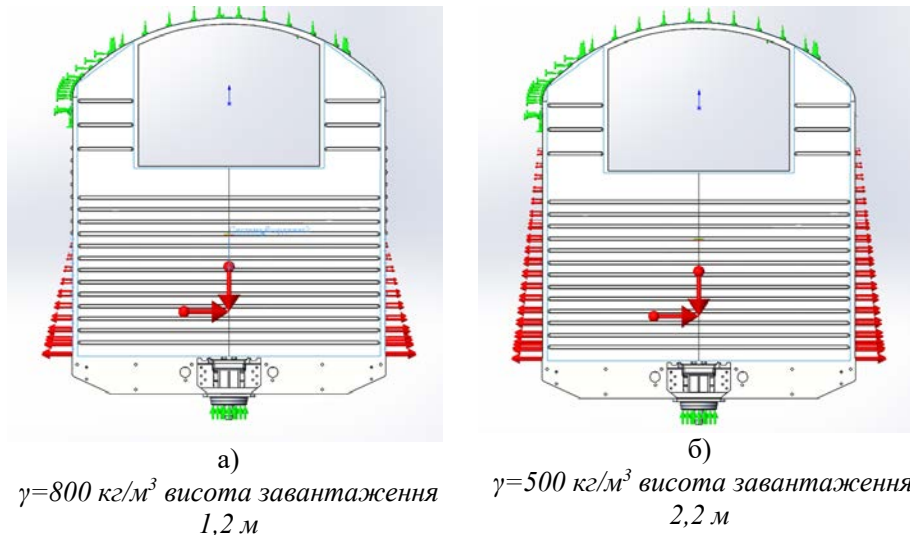


Рис. 2. Розрахункова схема для III режиму з сипучим вантажем

для найбільш невідного можливого поєднання одночасно діючих нормативних сил у відповідності зі встановленими розрахунковими режимами Перший – щоб врахувати максимальне навантаження на торцеву стінку та Третій – максимальне навантаження на бічну стінку.

Так як вагон буде використовуватись для перевезення сипучих вантажів, було прийнято рішення розраховувати бічні стінки на розпираючі навантаження.

Тиск розпору насипного вантажу на одиницю площі стінок кузова  $P_a$  Н/м<sup>2</sup> визначається за формулою:

$$P_a = (1 + k_{дн}) \cdot \rho \cdot g \cdot y \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right), \quad (1)$$

де  $k_{дн}$  – коефіцієнт вертикальної динаміки, приймається при розрахунку за I режимом  $k_{дн} = 0,1$  а за третім режимом  $k_{дн} = 0,353$ ;  $\gamma$  – насипна щільність вантажу (щільність вантажу перевезення) визначається за номінальною вантажопідйомністю (50 т) і об'ємом кузова в загальному випадку визначено (112 м<sup>3</sup>) і складає:

- а)  $\gamma=800$  кг/м<sup>3</sup> висота завантаження 1,2 м;
- б)  $\gamma=500$  кг/м<sup>3</sup> висота завантаження 2,2 м;

При мінімальній щільності висота завантаження складає 2.2 м і максимальна вага вантажу при цьому 39.2 т.

При максимальній щільності вантажа, найбільша висота завантаження 1,2 м, а максимальна вага вантажу – 49 т.

Розпір насипного вантажу по третьому режиму навантаження. Визначаємо активний (статичний) тиск на одиницю площі бокової стінки:

$$P_a = P_a = (1 + 0,353) \cdot 800 \cdot 9,81 \cdot y \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{3,14}{4} - \frac{0,157}{2}\right) = 9062 \cdot y \text{ Па}$$

$$P_a = P_a = (1 + 0,353) \cdot 500 \cdot 9,81 \cdot y \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{3,14}{4} - \frac{0,157}{2}\right) = 5664 \cdot y \text{ Па}$$

Розрахункова схема для третього режиму представлена на рисунку 2.

Допустимі напруження. При визначенні властивостей матеріалу, які потрібні для проведення розрахунків на міцність, застосовано деякі припущення. По-перше, матеріал, з якого виготовлена та чи інша деталь, вважається однорідним. Крім того, дійсні характеристики реального матеріалу, з якого виготовлені будь-яка конструкція, мають певні відхилення від характеристик, що наведені у довідниках.

Найбільш напружені зони рами кузова вагона за першим режимом представлені на рисунку 3.

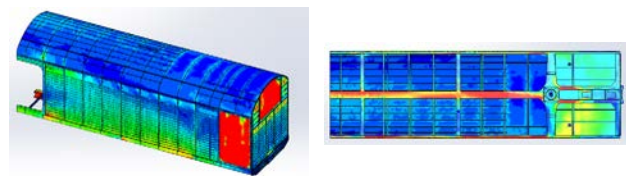


Рис. 3. Епюра розподілення напружень кузова при I режимі

Лист бічної стінки біля торцевої стінки кузова, котрий нічим не підкріплений, не витримує навантажень. Напруження в тому місці становить 800 МПа. Напруження в рамі кузова не перевищують 250 МПа.

На рисунку 4 наведено епюру еквівалентних напружень, що виникають в рамі кузова вагона від дії нормативного навантаження за третім режимом при скінчено-елементній моделі з розмірами 5 мм і 50 мм.

Також на рисунку 4 показано балки на бічних стінках, напруження в яких 320 МПа, що перевищує допустимі значення. Допустимі напруження



становлять 155 МПа, тому стійки бічних стінок, обшивки, не витримує даних навантажень.

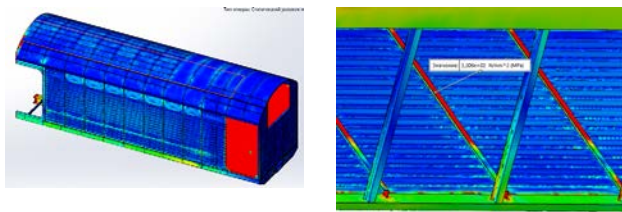


Рис. 4. Епіюра розподілення напружень III режим

На рисунку 5 показано еквівалентні напруження при розрахунку бічних стінок на розпираючі навантаження.

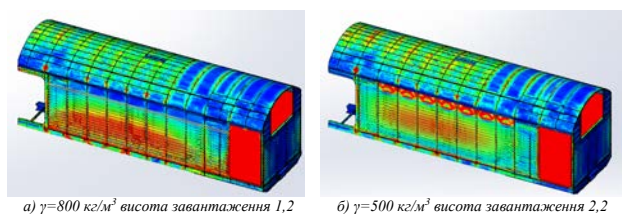


Рис. 5. Епіюра розподілення напружень за третім режимом

В результаті розрахунку навантаження на бічну стінку є надмірними. Обшивка, підкріплена тільки стійками, не може утримати навантаження від насипного вантажу. Необхідно посилити бокові стінки створюючи решітчастий каркас.

#### Висновки.

1. Розроблено 3-Д модель несучого модуля кузова вагону моделі 918, яка представляє собою суцільнометалеві несучі конструкції, що виконані із набору повздовжніх і поперечних елементів

жорсткості, перекритих тонкими гофрованими листами.

2. Результати аналізу епюри еквівалентних напружень, що виникають в рамі кузова вагона від дії нормативного навантаження за першим режимом засвідчили, що найбільші напружені зони рами кузова вагона знаходяться в листі бічної стінки біля торцевої стінки кузова, котрий нічим не підкріплений. При цьому напруження в тому місті становить 800 МПа, тобто значно перевищують рівень допустимих. Напруження в рамі кузова, при зазначеному розрахунковому випадку, не перевищують 250 МПа.

3. Результати аналізу епюри еквівалентних напружень, що виникають в рамі кузова вагона від дії нормативного навантаження за третім режимом засвідчили, що найбільші напружені зони рами кузова вагона знаходяться в балці на бічних стінках, і їх рівень становить 320 МПа, що перевищує допустимі значення. Допустимі напруження становлять 155 МПа, тому стійки бічних стінок, обшивки, не витримує даних навантажень.

4. Результати аналізу епюри еквівалентних напружень, які виникають при розпиранні навантаження, засвідчили, що навантаження є надмірними. Обшивка, підкріплена тільки стійками, не може утримати навантаження від насипного вантажу. Необхідно посилити бокові стінки створюючи решітчастий каркас.

Резюмуючи вищевикладені результатами дослідження, можна зробити висновок, що модернізація вагонів такого типу можлива лише за умови посилення конструкції кузова та виконання окремих його елементів з композитних матеріалів.

#### Список літератури:

1. Koshel O., Sapronova S., Kara S. Revealing patterns in the stressed-strained state of load-bearing structures in special rolling stock to further improve them. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023.4 (7 (124)). Pp. 30–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285894>
2. Li X., Fang J., Zhang Q., Zhao S., Guan X. Study on Key Technology of Railway Freight Car Body Fatigue Test. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2020. 20 (1). Pp. 261–269. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00828-7>
3. Sokolov V., Porkuian O., Krol O., Stepanova O. Design Calculation of Automatic Rotary Motion Electrohydraulic Drive for Technological Equipment. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. 1. Pp. 133-142. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_14)
4. Krol O., Sokolov V. Modeling of Spindle Node Dynamics Using the Spectral Analysis Method. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. 1. Pp. 35-44. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_4)
5. Fomin O., Lovska A. Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 2, 7 (110). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>
6. Vega B., Perez J. Comparative analysis of fatigue strength of a freight wagon frame. *Welding in the World*. 2023. 68. Pp. 321–332. <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01577-5>

7. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Lohinov O., Ocheretna V. Integral Approach to Vulnerability Assessment of Ship's Critical Equipment and Systems. *Transactions on Maritime Science*. 2023. 12 (1). <https://doi.org/10.7225/toms.v12.n01.002>
8. Yakovlieva A., Boichenko S. Energy Efficient Renewable Feedstock for Alternative Motor Fuels Production: Solutions for Ukraine. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2020. 298. Pp. 247 – 259. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_16)
9. Fomin O., Lovska A., Píštěk V., Kučera P. Dynamic load computational modelling of containers placed on a flat wagon at railroad ferry transportation // *Vibroengineering Procedia*. 2019. 29. Pp. 118-123 <https://doi.org/10.21595/vp.2019.21132>
10. Fomin O., Lovska A., Radkevych V., Horban A., Skliarenko I., Gurenkova O. The dynamic loading analysis of containers placed on a flat wagon during shunting collisions// *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. 14 (21). Pp. 3747-3752. [http://www.arpnjournals.org/jeas/research\\_papers/rp\\_2019/jeas\\_1119\\_7989.pdf](http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2019/jeas_1119_7989.pdf)
11. Gubarevych O., Goolak S., Melkonova I., Yurchenko M. Structural diagram of the built-in diagnostic system for electric drives of vehicles. *Diagnostyka*. 2022. 23(4). 2022406. <https://doi.org/10.29354/diag/156382>
12. Okorokov A., Fomin O., Lovska A., Vernigora R., Zhuravel I., Fomin V. Research into a possibility to prolong the time of operation of universal semi-wagon bodies that have exhausted their standard resource. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 3/7(93). Pp. 20-26 <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131309>

**Fomin O.V., Prokopenko P.M., Fomina A.M., Gunko E.V. RESEARCH OF THE STRENGTH OF THE WAGON MODEL 918 AND THE POSSIBILITY OF CONVERSION (with the introduction of composites) FOR THE TRANSPORTATION OF BULK CARGO**

*The article highlights the results of the stress-deformation analysis of the 918 model wagon body under (non-typical) loads with bulk cargo.*

*In order to ensure uninterrupted railway transportation in today's complex conditions, it is proposed to use scientific and applied approaches to develop the possibility of using existing models of wagons for types of transportation that are not typical for them. Namely, to consider the possibility of using refrigerated wagons for the transportation of bulk cargo. A systematic approach is used to conduct such research. Which included: determination of the study of the specifics of the impact of bulk cargo on rolling stock structures; analysis of design and technological documentation to create a spatial 3-D model of the wagon under investigation; creation of a calculation model using a modern software complex; checking the adequacy of the developed model and the accuracy of the data obtained with its help; application of non-typical (corresponding to the action of bulk cargo) calculated loads; obtaining and analyzing pictures of stress-strain states by the finite element method.*

*The obtained results of the analysis of the stress-deformation state of the body of the 918 wagon under loads with bulk cargo made it possible to assess the potential possibilities of such transportation. Also, this analysis makes it possible to determine the possibility of making individual elements of the car body from composite materials, which in turn will improve the dynamics, strength and durability of such a structure.*

*It is expedient to use such results when carrying out research and development works on the improvement (modernization) of existing sections of refrigerated wagons to ensure the possibility of transporting bulk cargo in them. Which, in turn, will increase the efficiency of the domestic fleet of freight wagons.*

**Key words:** *mechanical engineering, mechanical engineering, freight wagons, strength calculations, composite materials, strength.*