

УДК 629.463.62

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/24>**Ловська А.О.**

Український державний університет залізничного транспорту

Рибін А.В.

Український державний університет залізничного транспорту

Агапов Є.Д.

Український державний університет залізничного транспорту

Гусак Д.О.

Український державний університет залізничного транспорту

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ З ПІДЛОГОЮ ІЗ СЕНДВІЧ-ПАНЕЛЕЙ

Для зменшення динамічної навантаженості вагона-платформи при експлуатаційних режимах запропоновано використання сендвіч-панелей у якості складових несучої конструкції, а саме, настилу підлоги. Особливістю сендвіч-панелей є те, що вони складаються з двох металевих листів між якими знаходиться енергопоглинальний матеріал з пружно-фрикційними властивостями.

З метою обґрунтування запропонованого удосконалення проведено математичне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи. До уваги прийнято поступальні переміщення вагона-платформи відносно вертикальної осі – коливання підсакування, як найбільш поширений тип коливань вагона у експлуатації.

Розрахунок здійснено на прикладі вагона-платформи моделі 13-401. Враховано, що вагон-платформа складається з чотирьох тіл: рама, два візки та вантаж, розміщений на рамі. Вантаж розглянуто як умовний з використанням повної корисної вантажопідйомності вагона-платформи.

При проведенні розрахунків враховано, що колія має пружні характеристики. Розв'язок математичної моделі здійснено в програмному комплексі MathCad. Результати проведених розрахунків довели, що використання сендвіч-панелей у якості складових конструкції вагона-платформи сприяє зменшенню її динамічної навантаженості на 7,2% у порівнянні з типовою конструкцією. Прискорення, які діють на вантаж, розміщений на вагоні-платформі, на 10,2% нижче за ті, що діють на нього з урахуванням типової схеми сприйняття навантажень.

Важливо сказати, що запропоновані рішення щодо конструкційного удосконалення вагона-платформи є доцільними не тільки на стадії виготовлення, а і модернізації вагонів-платформ.

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування сучасних конструкцій залізничних транспортних засобів та підвищенню ефективності функціонування транспортної галузі.

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-платформа, несуча конструкція, сендвіч-панель, динамічна навантаженість.

Вступ. Національна транспортна стратегія до 2030 року виділяє розвиток рухомого складу як один з найважливіших напрямків розвитку залізниць України. Забезпечення конкурентоспроможності залізничної галузі зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію сучасних конструкцій рухомого складу з покращеними техніко-економічними та експлуатаційними показниками. Крім того, конструкція такого рухомого складу повинна забезпечувати можливість зменшення витрат на його утримання.

Найбільш поширеним типом вагону у міжнародному сполученні є вагон-платформа. Його несуча конструкція представлена рамою. В процесі експлуатації вона випробовує циклічні знакозмінні навантаження, які сприяють погіршенню втомної міцності. Тому одним з актуальних питань при проектуванні сучасних конструкцій вагонів, в тому числі вагонів-платформ, є зменшення їх динамічної навантаженості в експлуатації. Це сприяло би покращенню їх втомної міцності, зменшенню витрат на утримання, забезпеченню схоронності перевозимих вантажів тощо.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання визначення динамічної навантаженості, міцності та удосконалень несучих конструкцій вагонів-платформ на даний час є досить поширеними. Так, наприклад, в роботі [1] наведено результати моделювання міцності несучої конструкції вагона-платформи. Особливість вагона полягає у тому, що він має понижену середню частину рами. Розрахунок на міцність реалізовано за методом скінчених елементів. Отримані результати підтверджені експериментальними дослідженнями, проведеними на базі Болгарського національного науково-дослідницького інституту. Однак в роботі не зазначено чи покращується втомна міцність несучої конструкції вагона-платформи з урахуванням запропонованих технічних рішень.

Особливості випробувань на кручення та згин несучої конструкції вагона-платформи висвітлюються в публікації [2]. Дослідження проведені експериментальним шляхом. Для визначення прогину несучої конструкції вагона-платформи використано метод електричного тензометрування. Однак комплекс випробувань, які використовують автори не висвітлює особливостей розрахунку на втомну міцність несучої конструкції вагона-платформи. Це може сприяти значній похибці отриманих результатів.

В статті [3] розглянуто конструкційні особливості вантажного вагона нового покоління для інтермодальних перевезень. Просторова модель несучої конструкції вагона-платформи спроектована в програмному комплексі PTC/Creo. Розрахунок на міцність здійснено в програмах ANSYS та ADAMS/Rail.

Конструкційні особливості довгобазного вагона-платформи для інтермодальних перевезень зазначено в статті [4]. Наведено результати розрахунку на міцність та динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-платформи.

Однак в даних роботах не запропоновано рішень, спрямованих на зменшення динамічної навантаженості вагона-платформи.

Моделювання міцності несучої конструкції вагона-платформи для інтермодальних перевезень різних транспортних засобів проводиться у роботі [5]. При цьому розрахунки здійснено на основі стандартів PN-EN.

В роботі [6] висвітлюються особливості проектування, аналізу та проектної розробки залізничних вагонів нового покоління. Дослідження проведено для Індійської залізниці. При цьому використані міжнародні стандарти для різних

умов завантаження, дотримання оптимальних габаритів вагонів тощо. Однак при проектуванні даних конструкцій вагонів не враховано заходів щодо покращення втомної міцності при експлуатаційних режимах навантаження.

Дослідження динамічної навантаженості несучої конструкції вагона проводиться у роботі [7]. До уваги прийнято випадок використання різних типів візків під вагонами. Проведено аналіз впливу технічних характеристик візків на динамічні показники вагона. При цьому в роботі не проводилося дослідження впливу технічних характеристик візків на втомну міцність несучих елементів вагонів.

В публікації [8] запропоновано конструкцію довгобазного вагона-платформи з пружно-фрикційними складовими в рамі. Проведені розрахунки динамічної навантаженості, міцності, а також втомної міцності довели, що таке удосконалення є доцільним. Разом з цим впровадження пружно-фрикційних складових в раму вагона-платформи ускладнює процес його технічного обслуговування та ремонту.

Отже, проведений аналіз останніх літературних джерел за тематикою дослідження доводить, що питання удосконалень несучої конструкції вагона-платформи для зменшення динамічної навантаженості в експлуатації є актуальними.

Мета та основні завдання статті. Метою статті є наукове обґрунтування впровадження сендвіч-панелей в несучу конструкцію вагона-платформи. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

- сформувати математичну модель динамічної навантаженості вагона-платформи з підлогою із сендвіч-панелей у вертикальній площині;
- визначити прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи та вантаж, розміщений на ньому.

Виклад основного матеріалу. Для зменшення впливу динамічних навантажень на міцність несучої конструкції вагона-платформи, а також схоронність вантажів, що перевозяться на ньому, пропонується виготовлення підлоги із сендвіч-панелей. Особливістю сендвіч-панелі є те, що вона складається з двох металевих листів між якими знаходиться енергопоглинальний матеріал з пружно-фрикційними характеристиками (рис. 1). Використання сендвіч-панелі у якості проміжного адаптера між рамою вагона та вантажем, буде сприяти поглинанню динамічних навантажень, які виникають при коливаннях підскакування та зменшувати їх вплив на вантаж.

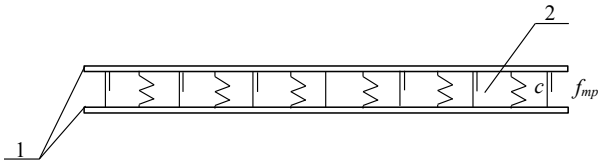


Рис. 1. Конструкційна схема сендвіч-панелі
1 – металеві листи; 2 – матеріал з пружно-фрикційними властивостями

Для обґрунтування запропонованого рішення здійснено математичне моделювання динамічної навантаженості вагона-платформи у вертикальній площині. Розрахункова схема вагона-платформи наведена на рис. 2.

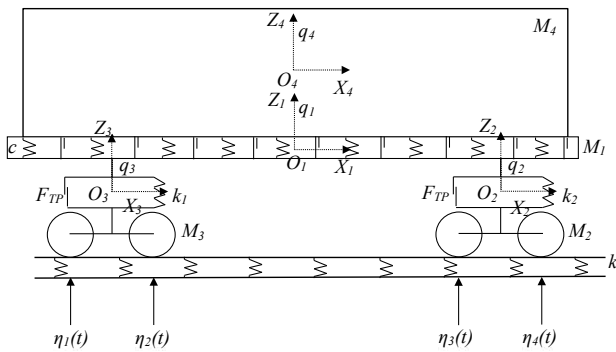


Рис. 2. Розрахункова схема вагона-платформи

Розрахунок здійснено на прикладі вагона-платформи моделі 13-401 (рис. 3 [9]).



Рис. 3. Вагон-платформа моделі 13-401

Враховано, що вагон-платформа складається з чотирьох тіл: рама, два візки та вантаж, розміщений на рамі. Вантаж розглянуто як умовний з використанням повної корисної вантажопідйомності вагона-платформи. При проведенні розрахунків враховано, що колія має пружні характеристики [10].

Система диференціальних рівнянь руху вагона-платформи має вигляд

$$\begin{cases} M_1 \cdot \ddot{q}_1 + C_{1,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{1,2} \cdot \dot{q}_2 + C_{1,3} \cdot \dot{q}_3 = -F_{TP} \cdot (\text{sign}(\delta_1) + \text{sign}(\delta_2)) + F_z, \\ M_2 \cdot \ddot{q}_2 + C_{2,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{2,2} \cdot \dot{q}_2 + B_{2,2} \cdot \dot{q}_2 = F_{TP} \cdot \text{sign}(\delta_1) + k(\eta_1 + \eta_2), \\ M_3 \cdot \ddot{q}_3 + C_{3,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{3,3} \cdot \dot{q}_3 + B_{3,3} \cdot \dot{q}_3 = F_{TP} \cdot \text{sign}(\delta_2) + k(\eta_3 + \eta_4), \\ M_4 \cdot \ddot{q}_4 = M_4 \cdot g - F_z, \end{cases} \quad (1)$$

де M_1 – маса несучої конструкції вагона-платформи; M_2, M_3 – маса, відповідно, першого та другого візка; C_{ij} – характеристики пружності елементів коливальної системи, які визначаються значеннями коефіцієнтів жорсткості пружин ресорного підвішування k_T ; k – жорсткість колії; B_{ij} – дисипативні коефіцієнти; F_{TP} – сила тертя у ресорному комплекті візка; δ_i – деформації пружних елементів ресорного підвішування; η_i – нерівність колії; F_z – сила, що виникає при переміщенні вантажу відносно рами вагона-платформи.

Сила, що виникає при переміщенні вантажу відносно рами вагона-платформи визначається

$$F_z = c \cdot (q_1 - q_4) + f_{mp} (\text{sign}(\dot{q}_1) - \text{sign}(\dot{q}_4)), \quad (2)$$

де c – жорсткість енергопоглинального матеріалу; f_{mp} – коефіцієнт тертя.

Розв’язок системи диференціальних рівнянь (1) здійснено в програмному комплексі MathCad [11, 12]. Початкові умови прийняті рівними нулю [13, 14]. Результати розрахунків наведено на рис. 4–6. Встановлено, що максимальні прискорення, які діють в центрі мас вагона-платформи, виникають в момент проходження ним рейкової нерівності і дорівнюють $6,5 \text{ м/с}^2$ (рис. 4).

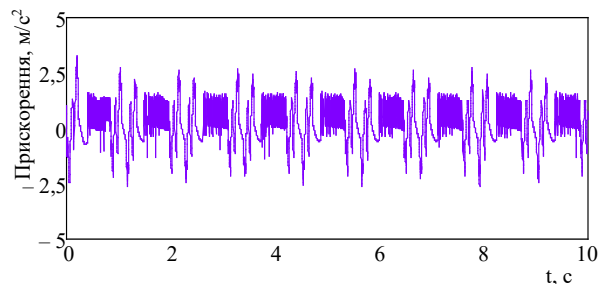


Рис. 4. Прискорення вагона-платформи в центрі мас

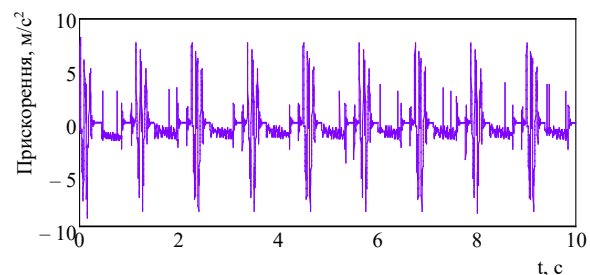


Рис. 5. Прискорення візка

Рис. 5. Прискорення візка

Впродовж подальшого коливального процесу величина прискорення зменшується і становить близько $5,0 \text{ м/с}^2$. Отримана величина прискорення на $6,2\%$ нижча за те, що діє на типову конструкцію вагона-платформи. Прискорення візка склало $9,2 \text{ м/с}^2$

(рис. 5). Прискорення, яке діє на вантаж, розміщений на вагоні-платформі дорівнює $2,08 \text{ м/с}^2$ (рис. 6). Отримана величина прискорення на 10,2% нижче за те, що діє на вантаж з урахуванням типової схеми сприйняття навантажень.

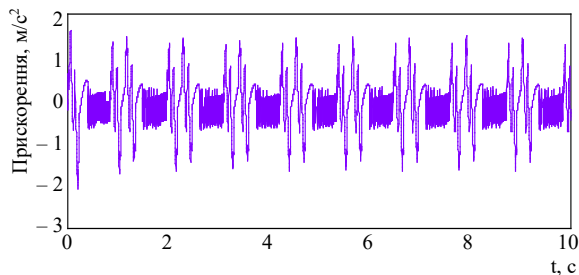


Рис. 6. Прискорення, яке діє на вантаж

Запропоновані рішення щодо конструкційного удосконалення вагона-платформи є доцільними не тільки на стадії виготовлення, а і модернізацій вагонів-платформ.

Важливо сказати, що впровадження сендвіч-панелей у несучу конструкцію вагонів-платформ вимагає дотримання стандартів безпеки та використання сучасних систем діагностики і технічного обслуговування. Такі системи діагностики дозволяють виявляти та діагностувати несправності в конструкції вагона, включаючи втомні тріщини, деформації, знос та інші дефекти, які можуть виникнути під час експлуатації.

Аналіз існуючих діагностичних інструментів для виявлення несправностей у вантажних вагонах, дозволив визначити найбільш ефективні серед них, які доцільно застосувати на вагонах-платформах з підлогою із сендвіч-панелей. До них відносяться датчики акустичної емісії, які можуть виявити несправності, що виникають, до того, як вони стануть критичними, і вихрострумова дефектоскопія, яка використовується для виявлення поверхневих і приповерхневих дефектів в металевих компонентах. Також корисними є такі методи діагностики, як ультразвукове тестування, рентгенографія та візуальний огляд.

Одним з ефективних методів діагностики конструкції вагона є використання датчиків контролю. Ці датчики виявляють і вимірюють вібрації та частоту коливань на різних рівнях. Якщо ці вимірювання відрізняються від нормативних значень, це може вказувати на потенційні несправності в конструкції вагона.

Тому наступним напрямком досліджень є розв'язок технічних питань, пов'язаних з впровадженням в несучу конструкцію вагона-платформи підлоги із сендвіч-панелей, а також наукове обґрунтування використання найсучасніших датчиків моніторингу його технічного стану.

Висновки.

1. Сформовано математичну модель динамічної навантаженості вагона-платформи з підлогою із сендвіч-панелей. До уваги прийнято вертикальні переміщення вагона-платформи. Модель враховує рух вагона-платформи стиковою нерівністю, яка має пружні властивості. При цьому сендвіч-панелі мають пружно-фрикційні властивості.

2. Визначено прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи та вантаж, розміщений на ньому. Максимальні прискорення, які діють в центрі мас вагона-платформи, виникають в момент проходження ним рейкової нерівності і дорівнюють $6,5 \text{ м/с}^2$. Впродовж подальшого коливального процесу величина прискорення зменшується і становить близько $5,0 \text{ м/с}^2$. Отримана величина прискорення на 6,2% нижче за те, що діє на типову конструкцію вагона-платформи. Прискорення візка дорівнює $9,2 \text{ м/с}^2$. Прискорення, яке діє на вантаж склало $2,08 \text{ м/с}^2$, що на 10,2% нижче за те, що діє на нього з урахуванням типової схеми сприйняття навантажень.

Розглянуто можливі варіанти діагностики несучої конструкції вагона-платформи з підлогою із сендвіч-панелей в експлуатації.

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування сучасних конструкцій залізничних транспортних засобів та підвищенню ефективності функціонування транспортної галузі.

Список літератури:

1. Stoilov V., Simić G., Purgić S., Milković D., Slavchev S., Radulović S., Maznichki V. Comparative analysis of the results of theoretical and experimental studies of freight wagon Sdggmrss-twin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 664. 012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/664/1/012026>
2. Šťastniak Pavol, Kurčík Pavol, Pavlík Alfréd. Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 235(2). 00030. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500030>
3. Das Apurba, Agarwal Gopal. Investigation of Torsional Stability and Camber Test on a Meter Gauge Flat Wagon // Computer Science. 2020. MARTCH. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0772-4_24

4. Fabian Peter, Gerlici Juraj, Masek Jaroslav, Marton Peter. Versatile, efficient and long wagon for intermodal transport in Europe // Communications. 2013. Vol. 2. P. 118 – 123.
5. Krason W. Niezgodna T. FE numerical tests of railway wagon for intermodal transport according to PN-EU standards // Bulletin of the Polish Academy of Sciences technical sciences. 2014. Vol. 62, No. 4. P. 843–851. <https://doi.org/10.2478/bpasts-2014-0093>
6. Nandan Shivendra, Trivedi Rishikesh, Kant Satyajeet, Ahmad Javed, Maniraj M. Design, analysis and prototype development of railway wagons on different loading conditions // Preprint, 2020, March.
7. Myamlin Sergey, Povilas Lingaitis Leonas, Dailydka Stasys, Vaičiūnas Gediminas, Bogdevičius Marijonas, Bureika Gintautas. Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie // Transport. 2015. Vol. 30(1). P. 88–92. <https://doi.org/10.3846/16484142.2015.1020565>
8. S. Panchenko, O. Fomin, G. Vatulia, O. Ustenko, A. Lovska. Determining the load on the long-based structure of the platform car with elastic elements in longitudinal beams. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. № 1/7 (109). P. 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224638>
9. Сайт о вагонном парке и вагонном хозяйстве // <https://vagon.by/gallery/image/1122>
10. Дьомін Ю. В., Черняк Г. Ю. Основи динаміки вагонів: навч. посіб. Київ: КУЕТТ. 2003. 269 с.
11. Сяєв А. В. Вступ до системи MathCad: навчальний посібник. Дніпропетровськ. 2004. 108 с.
12. Богач І. В., Краковецький О. Ю., Килик Л. В. Чисельні методи розв'язання диференціальних рівнянь засобами MathCad: Навчальний посібник. Вінниця. 2020. 106 с.
13. Sergii Panchenko, Juraj Gerlici, Glib Vatulia, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov, Kateryna Kravchenko. The Analysis of the Loading and the Strength of the FLAT RACK Removable Module with Viscoelastic Bonds in the Fittings. Applied Sciences. 2023. Vol. 13(1). 79. <https://doi.org/10.3390/app13010079>
14. A. Koshlan, O. Salnikova, M. Chekhovska, R. Zhyvotovskiy, Y. Prokopenko, T. Hurskiy, A. Yefymenko, Y. Kalashnikov, S. Petruk, A. Shyshatskiy. Development of an algorithm for complex processing of geospatial data in the special-purpose geoinformation system in conditions of diversity and uncertainty of data. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 5. No. 9 (101). P. 16–27. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.180197>.

Lovska A.O., Rybin A.V., Agapov E.D., Husak D.O. MATHEMATICAL MODELING OF THE VERTICAL LOADING OF A FLAT WAGON WITH A FLOOR OF SANDWICH PANELS

To reduce the dynamic loading of the flat wagon under operating conditions, it is proposed to use sandwich panels as components of the supporting structure, namely the flooring. A feature of sandwich panels is that they consist of two metal sheets, between which there is an energy-absorbing material with elastic-friction properties.

In order to substantiate the proposed improvement, mathematical modeling of the dynamic loading of the supporting structure of the flat wagon was carried out. The translational movements of the flat wagon relative to the vertical axis were taken into account – bouncing oscillations, as the most common type of oscillations of the wagon in operation.

The calculation was made on the example of a flat wagon model 13-401. It is taken into account that the flat wagon consists of four bodies: a frame, two bogies and a load placed on the frame. The cargo is considered as conditional using the full payload capacity of the flat wagon.

When carrying out calculations, it was taken into account that the path has elastic characteristics. The solution of the mathematical model was carried out in the MathCad software package. The results of the calculations proved that the use of sandwich panels as components of the flat wagon structure helps to reduce its dynamic loading by 7.2% compared to the standard design. The accelerations acting on the load placed on the flat wagon are 10.2% lower than those acting on it, taking into account the typical load perception scheme.

It is important to say that the proposed solutions for the structural improvement of the flat wagon are expedient not only at the stage of manufacture, but also at the stage of modernization of flat wagon.

The conducted studies will contribute to the creation of recommendations for the design of modern structures of railway vehicles and to improve the efficiency of the transport industry.

Key words: transport mechanics, flat wagon, load-bearing structure, sandwich panel, dynamic loading.