

УДК 629.463.65

DOI: 10.34029/2311-4061-2021-141-4-30-37

Д-р техн. наук Фомін О. В.

Д-р техн. наук Горбунов М. І.

Д-р техн. наук Ловська А. О.

Магістр Рибін А. В.

ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ КОНЦЕПТУ НЕСІВНОЇ КОНСТРУКЦІЇ НАПІВВАГОНА З ВИПУКЛОЮ ОБШИВКОЮ ТА НАПОВНЮВА- ЧЕМ В ХРЕБТОВІЙ БАЛЦІ

Ключові слова: транспортна механіка, напіввагон, несівна конструкція, хребтова балка, динамічна навантаженість, міцність.

У відповідності до Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року (№ 430-р від 30 травня 2018 р.) для підвищення ефективності перевізного процесу у міжнародному сполученні необхідним є впровадження в експлуатацію високоефективних транспортних засобів з покращеними техніко-економічними, експлуатаційними та екологічними характеристиками. Оскільки основний сегмент перевізного процесу у стратегії відводиться залізничному транспорту, то до сучасних конструкцій вагонів повинні пред'являтися особливі умови. Зокрема це стосується їх несівних конструкцій.

На сучасному етапі розвитку залізничного транспорту при створенні несівних конструкцій вагонів важливим є урахування принципів мультифункціональності, тобто можливості виконання їх складовими елементами або вузлами більш ніж однієї функції одночасно. Також важливим питанням є збільшення корисного об'єму кузовів вагонів з метою підвищення об'ємів перевезень вантажів залізницею у поїзді. Це сприятиме покращенню техніко-економічних характеристик вагонів, підвищенню ефективності їх експлуатації, а також утриманню лідерських позицій залізничної галузі на ринку транспортних послуг.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Визначення можливих шляхів покращення техніко-економічних показників залізничних вантажних вагонів висвітлюється у публікації [1]. Реалізація поставленої задачі досягається за рахунок підвищення осьового навантаження вагона. Однак при проектуванні даної конструкції вагону не передбачено заходів щодо зменшення його динамічної навантаженості в експлуатації.

Визначення перспективної концепції модернізації вантажних вагонів розглянуто у роботі [2]. Для збільшення терміну експлуатації несівних конструкцій вагонів запропоновано використання в них композитних матеріалів. Реалізацію даного рішення пропонується здійснювати шляхом використання панелей з скловолокна та епоксидної смоли. Однак в роботі не запропоновано заходів щодо зменшення навантаженості рами вагона, як найбільш навантаженого вузла несівної конструкції.

В роботі [3] досліджено перспективи застосування інноваційних матеріалів для зменшення тари вантажних вагонів. Обґрунтовано використання в якості матеріалу несівних конструкцій вагонів магнієвих сплавів. Наведені результати розрахунків доцільності застосування даного матеріалу в металоконструкціях кузовів. Важливо сказати, що при цьому не досліджено можливості збільшення корисного об'єму кузовів вагонів.

Особливості оптимізації несівної конструкції вагону, виготовленого з алюмінієвих панелей наведено в роботі [4]. Встановлено, що впровадження алюмінієвих панелей сприятиме поліпшенню техніко-економічних показників вагонів.

В публікації [5] наведено результати обґрунтування покращення техніко-економічних показників вантажних вагонів шляхом впровадження високоміцних сталей в їх несівні конструкції. Проведено експериментальне уточнення умов міцності зварних з'єднань вагонів із високоміцних матеріалів.

Разом з цим в даних роботах не приділено уваги дослідженню можливості збільшення корисного об'єму кузовів вантажних вагонів,

а також зменшенню їх динамічної навантаженості в експлуатації.

В роботах [6, 7] проведені дослідження щодо можливості зменшення динамічної навантаженості несівних конструкцій вагонів при найбільш неблагоприємних режимах навантаження. Запропоновані заходи підтверджені теоретичними розрахунками на динамічну навантаженість та міцність їх несівних конструкцій. Однак при цьому авторами не проводилися дослідження щодо можливості підвищення корисного об'єму кузовів даних конструкцій вагонів.

Аналіз літературних джерел [1–7] дозволяє зробити висновок, що питання створення вантажних вагонів з урахуванням принципів мультифункціональності їх несівних конструкцій потребують подальшого дослідження та розвитку.

Визначення мети та задачі дослідження

Метою даної роботи є висвітлення результатів визначення навантаженості концепту несівної конструкції напіввагона з випуклою обшивкою та наповнювачем в хребтовій балці при маневровому співударянні, як найбільш несприятливому режимі в експлуатації. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

- запропонувати концепт несівної конструкції напіввагона з випуклою обшивкою;
- провести визначення основних показників міцності несівної конструкції напіввагона;
- визначити динамічну навантаженість концепту несівної конструкції напіввагона з урахуванням використання наповнювача в хребтовій балці;
- провести визначення основних показників міцності несівної конструкції напіввагона з наповнювачем в хребтовій балці.

Матеріали та методи досліджень

Для визначення основних показників міцності концепту несівної конструкції напіввагона з випуклими стінами використаний метод скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation. Оптимальна кількість елементів скінчено-елементної моделі несівної конструкції напіввагона визначена з використанням графоаналітичного методу [8, 9]. Кількість вузлів сітки склала 13746, а елементів – 53647. При цьому максимальний розмір еле-

менту дорівнює 100 мм, мінімальний – 20 мм. Кількість елементів в колі дорівнює 11. Співвідношення збільшення розміру елемента склало 1,8. Запропонована несівна конструкція напіввагона розраховувалася на втомну міцність в програмному комплексі SolidWorks Simulation.

Для визначення навантаженості несівної конструкції напіввагона з випуклими стінами та наповнювачем в хребтовій балці застосовувалося математичне моделювання. Для цього використано математичну модель, наведену у роботі [10], яка описує динамічне навантаження несівної конструкції вагона-платформи з контейнерами-цистернами. Дану модель було доопрацьовано шляхом урахування існуючих переміщень несівної конструкції напіввагону у повздовжній площині. Крім того, при доопрацюванні моделі враховано силу тертя, яка виникає між п'ятниками та підп'ятниками вагону та зумовлену дією повздовжньої сили на задній упор автозчепу [11].

Чисельне значення повздовжньої сили на несівну конструкцію напіввагона прийнято рівним 3,5 МН [12, 13]. Прийнято, що несівна конструкція вагона спирається на типові візки 18-100. При математичному моделюванні динамічної навантаженості несівної конструкції напіввагона враховано, що наповнювач має пружно-в'язкі властивості. Розв'язок відповідних диференціальних рівнянь здійснений за методом Рунге-Кутта, в програмному комплексі MathCad. Початкові умови розрахунку прийняті рівними нулю.

При визначенні міцності концепту несівної конструкції напіввагона з наповнювачем в хребтовій балці проведено розрахунок на міцність за методом скінчених елементів. Оптимальна кількість елементів скінчено-елементної моделі несівної конструкції напіввагона визначена з використанням графоаналітичного методу. Кількість вузлів сітки склала 102321, а елементів – 309859. При цьому максимальний розмір елемента дорівнює 100 мм, мінімальний – 20 мм. Кількість елементів в колі дорівнює 9. Співвідношення збільшення розміру елемента склало 1,7. При цьому розрахункова схема була ідентична до тієї, що наведена на рисунку 1. Наявність наповнювача в хребтовій балці моделювалася шляхом постановки відповідних зв'язків.

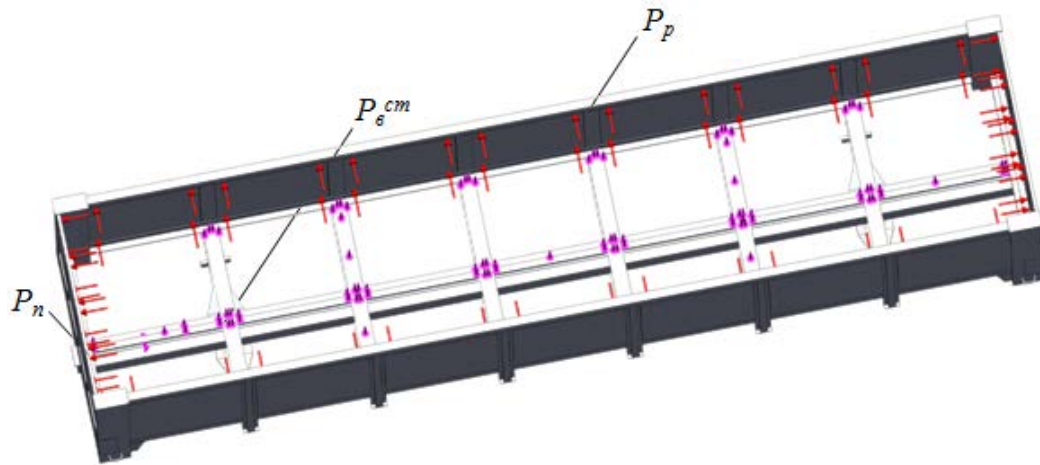


Рис. 1 – Розрахункова схема несівної конструкції напіввагона

Створення концепту несівної конструкції напіввагона з випуклою обшивкою та визначення основних показників його міцності

Для підвищення об'ємів перевезень вантажів у напіввагонах пропонується концепт несівної конструкції з випуклими стінами (рис. 2). Така конфігурація бокових стін до-

зволяє підвищити корисний об'єм кузова на 8 % у порівнянні з вагоном-прототипом [14].

Величина прогибу бокових та торцевих стін визначена з технологічних міркувань, а саме, за умови збереження габариту напіввагона у відповідності до прототипу (рис. 3). У якості базової конструкції обраний напіввагон моделі 12-757, побудови ПАТ “КВБЗ” (Україна).



Рис. 2 – Несівна конструкція напіввагона з випуклими стінами

При цьому обшивка вагону має змінну за висотою товщину, яка варіює від 4 мм (нижня частина) до 3,5 мм (верхня частина). Тобто обшивка має парусоподібну конфігурацію.

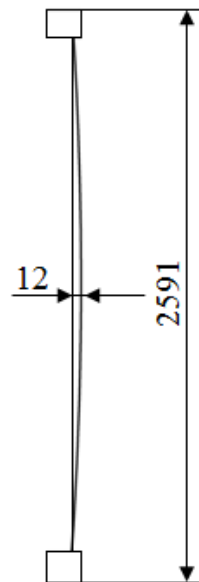


Рис. 3 – Переріз бокової стіни напіввагона

Товщина листа обшивки визначена за умови забезпечення міцності несівної конструкції напіввагона при найбільш несприятливих режимах навантаження.

Для обґрунтування запропонованого рішення проведені розрахунки на міцність несівної конструкції. При побудові моделі враховано елементи кузову, які жорстко взаємодіють між собою, тобто в моделі до уваги не приймалися кришки розвантажувальних люків, оскільки вони мають шарнірне з'єднання з кузовом.

При складанні розрахункової схеми враховані такі навантаження: вертикальне статичне навантаження P_g^{cm} , тиск розпору насипного вантажу P_p , а також повздовжнє навантаження P_n , що діють на несівну конструкцію від автозчепного пристрою (см. рис. 1). В якості насипного вантажу розглянуте кам'яне вугілля. При цьому враховано, що тиск розпору насипного вантажу на бокові стіни напіввагона діє за законом трикутника. На торцеві стіни тиск розпору прикладався за законом трапеції [15].

Активний тиск розпору насипного вантажу визначався за формулою [15]

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

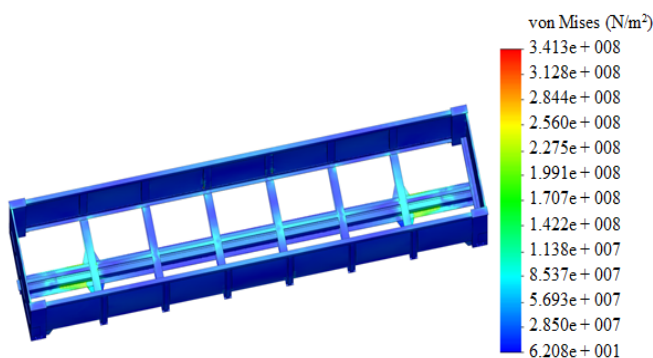


Рис. 4 – Напружений стан несівної конструкції напіввагона

Результати розрахунку на міцність несівної конструкції напіввагона стосовно інших розрахункових режимів показали, що її міцність забезпечується.

Запропонована несівна конструкція напіввагона також була розрахована на втомну міцність, за результатами її статичного аналізу, наведеними на рисунку 4. При цьому база випробувань складала 10^7 циклів. Крива втоми отримана на підставі модуля пружності сталі марки 09Г2С, за допомогою опцій програмного комплексу SolidWorks Simulation (CosmosWorks), яка показала що

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

Закріплення моделі здійснювалося у зонах обпирання несівної конструкції вагону на ходові частини. В якості матеріалу несівної конструкції вагону застосована сталь марки 09Г2С, зі значенням межі міцності $\sigma_B=490$ МПа та межі плинності $\sigma_T=345$ МПа [12, 13].

Результати розрахунку на міцність несівної конструкції напіввагона показали, що максимальні еквівалентні напруження виникають при I-му розрахунковому режимі (удар) у зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою та складають близько 340 МПа (рис. 4). Тобто не перевищують допустимі значення [12, 13]. Максимальні переміщення у несівній конструкції напіввагона виникають у середній частині його та дорівнюють 3,7 мм (рис. 5).

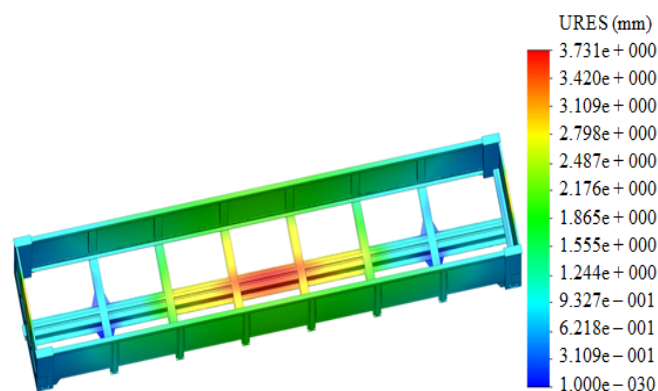


Рис. 5 – Переміщення в вузлах несівної конструкції напіввагона

втомна міцність несівної конструкції запропонованого напіввагону забезпечується.

Визначення навантаженості концепту несівної конструкції напіввагона з урахуванням використання наповнювача в хребтовій балці

Для зменшення динамічної навантаженості концепту напіввагона з випуклими стінами пропонується впровадження замкненої конструкції хребтової балки з наповнювачем (рис. 6 та 7).

З метою визначення навантаженості несівної конструкції напіввагона з урахуванням

МОДЕЛІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

заходів щодо його удосконалення складено розрахункову схему напіввагона, наведену на рисунку 8.

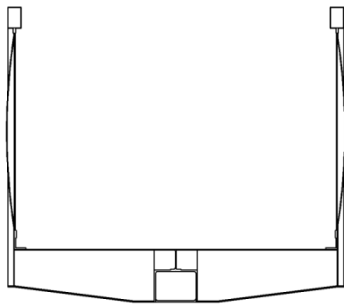


Рис. 6 – Переріз несівної конструкції напіввагона з випуклими стінами та замкненою хребтовою балкою

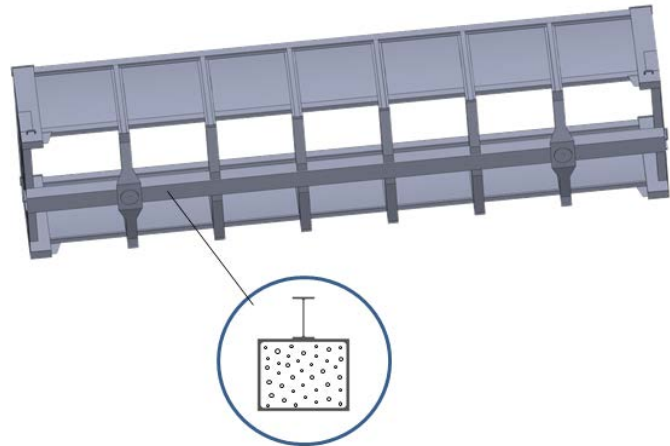


Рис. 7 – Просторова модель несівної конструкції напіввагона з випуклими стінами та замкненою хребтовою балкою, заповненою наповнювачем

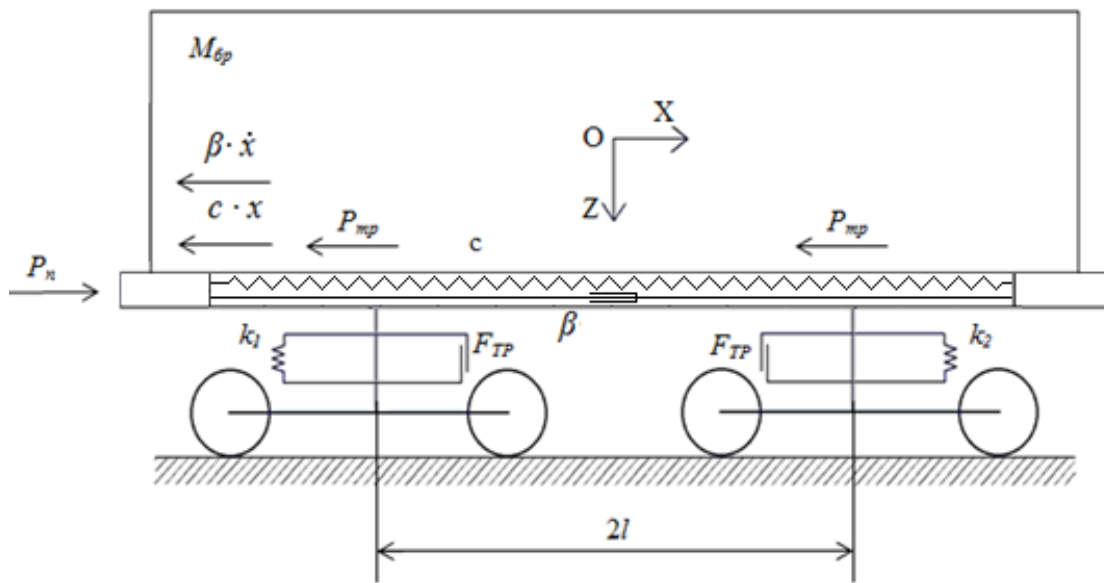


Рис. 8 – Розрахункова схема напіввагона

Рівняння руху мають вигляд:

$$M_{\text{оп}} \cdot \ddot{x} + (M_B \cdot h) \cdot \ddot{\varphi} = P_n - 2P_{\text{mp}} - \beta \cdot \dot{x} - c \cdot x, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} I_B \cdot \ddot{\varphi} + (M_B \cdot h) \cdot \ddot{x} - g \cdot \varphi \cdot (M_B \cdot h) = \\ = l \cdot F_{\text{TP}} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + \\ + l(k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \end{aligned} \quad (3)$$

$$M_B \cdot \ddot{z} = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{\text{TP}} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2), \quad (4)$$

при цьому

$$\Delta_1 = z - l \cdot \varphi; \quad \Delta_2 = z + l \cdot \varphi,$$

де: $M_{\text{бр}}$ – маса бруто вагона; M_B – маса несівної конструкції вагона; I_B – момент інерції вагона; P_n – величина повздовжньої сили на задній упор автотягача; P_{mp} – сили тертя, які виникають між п'ятниками рами та

підп'ятниками візків; c – жорсткість матеріалу, яким заповнена хребтова балка; β – коефіцієнт в'язкого опору матеріалу, яким заповнена хребтова балка; l – половина бази вагона; F_{TP} – значення сили сухого тертя у ресорному комплекті вагону; k_1, k_2 – жорсткість пружин ресорного підвищення візків

вагона; x, φ, z – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому, кутовому навколо поперечної осі та вертикальному переміщенню вагона.

Розв'язок диференціальних рівнянь здійснений у вигляді:

$$F(t, y) = \begin{bmatrix} y_2 \\ y_4 \\ y_6 \\ \frac{P_n - 2P_{mp} - \beta \cdot y_2 - c \cdot y_1 - (M_B \cdot h) \cdot \dot{y}_4}{M_{op}} \\ l \cdot F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + l (k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2) - (M_B \cdot h) \cdot \dot{y}_2 + \\ + g \cdot y_3 \cdot (M_B \cdot h) \\ \frac{I_B}{M_B} \\ \frac{k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2)}{M_B} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$Z = \text{rkfixed}(Y0, tn, tk, n, F).$$

де: $Y0$ – вектор, який містить початкові умови, tn, tk – величини, які визначають початкову та кінцеву змінну інтегрування, n' – фіксоване число кроків, F – символічний вектор.

При цьому

$$y_1 = q_1, y_3 = q_3, y_5 = q_5, y_2 = \dot{y}_1, y_4 = \dot{y}_3, y_6 = \dot{y}_5.$$

Початкові переміщення та швидкості руху вагона прийняті рівними нулю [16, 17].

Результати проведених розрахунків показали, що максимальні прискорення, які діють на несівну конструкцію напіввагона, складають $36,9 \text{ м/с}^2$ (рис. 9). Дана величина прискорення на 4 % нижча за ту, що отримана для несівної конструкції без наповнювача. При цьому коефіцієнт в'язкого опору матеріалу, яким заповнена хребтова балка, повинен мати значення близько $118 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$, а жорсткість – близько 80 кН/м .

Результати розрахунку на міцність концепту несівної конструкції напіввагона наведені на рисунках 10 та 11. Максимальні еквівалентні напруження при цьому зафіксовані в зоні з'єднання хребтової балки зі шворневою та склали близько 315 МПа (рис. 10).

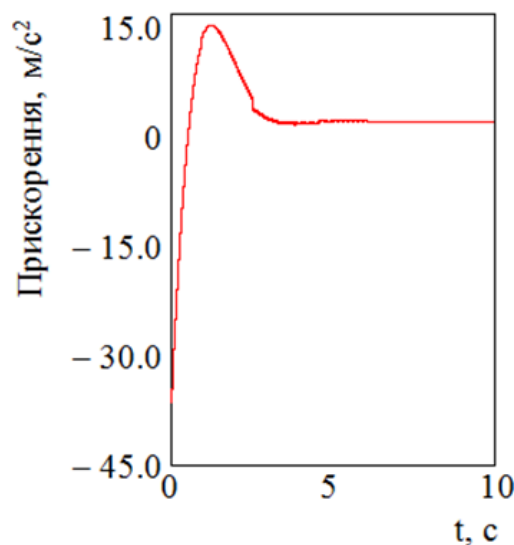


Рис. 9 – Прискорення, які діють в центрі мас концепту несівної конструкції напіввагона

Отримана величина максимальних еквівалентних напружень в несівній конструкції напіввагона на 7 % нижча за ту, що отримана для конструкції без наповнювача у хребтовій балці. Максимальні переміщення зафіксовані в середній частині несівної конструкції напіввагона, які склали $3,4 \text{ мм}$ (рис. 11).

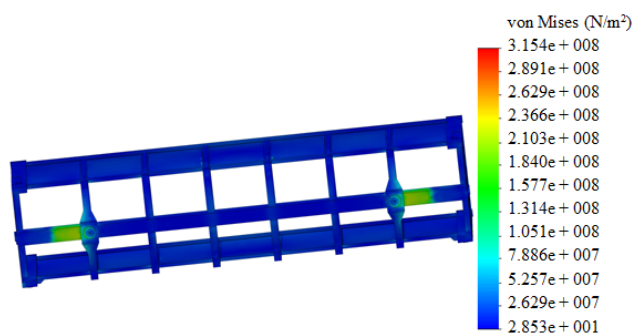


Рис. 10 – Напружений стан несівної конструкції напіввагона

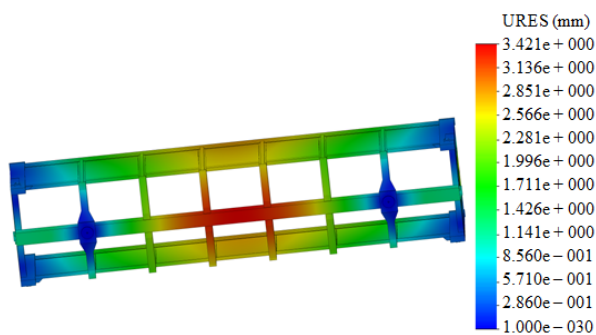


Рис. 11 – Переміщення в вузлах несівної конструкції напіввагона

Результати розрахунку на міцність несівної конструкції напіввагона проведені і стосовно інших експлуатаційних режимів. Встановлено, що міцність несівної конструкції напіввагона з випуклою обшивкою та наповнювачем у хребтовій балці забезпечується на всіх режимах його експлуатації.

Висновки

1. Запропонований концепт несівної конструкції напіввагона з випуклою обшивкою бокових стін дозволяє підвищити корисний об'єм кузова на 8 % у порівнянні з вагоном-прототипом.

2. Максимальні еквівалентні напруження при I-му розрахунковому режимі (удар) зосереджені у зоні з'єднання хребтової балки зі шворневою та складають близько 340 МПа і не перевищують допустимі рівні. За результатами розрахунку на втому міцність несівної конструкції напіввагона забезпечується.

3. При динамічному навантаженні концепту несівної конструкції напіввагона, з урахуванням використання наповнювача в хребтовій балці, максимальні прискорення, які діють на його несівну конструкцію склали 36,9 м/с², що на 4 % нижчі за ті, що отримані для несівної конструкції вагона без наповнювача в балці.

4. Максимальні еквівалентні напруження у несівній конструкції напіввагона з наповнювачем в його хребтовій балці зафіксовані в зоні з'єднання хребтової балки зі шворневою та складають близько 315 МПа, що на 7 % нижче за ті, що отримані для конструкції без наповнювача у балці.

5. Результати проведених досліджень дозволяють створити практичні рекомендації щодо проектування інноваційного рухомого

складу, а також з підвищення ефективності його функціонування.

Література

1. Chandra Prakash Shukla. Study and Analysis of Doors of BCNHL Wagons / Shukla Chandra Prakash, P. K. Bharti // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2015. – Vol. 4, Issue 04. – P. 1195–1200. <https://doi.org/10.17577/ijertv4is041031>.

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

3. 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.

4. 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. – No. 11.

5. Бороненко Ю. П. Выбор конструктивных решений элементов вагонов с малой массой тары / Ю. П. Бороненко, Ю. О. Филипова // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2017. – № 3 (69). – P. 121 – 129. doi 10.15802/stp2017/104546.

6. Fomin O. Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam

filled center sills / O. Fomin, M. Gorbunov, A. Lovska, J. Gerlici, K. Kravchenko // *Materials*. – 2021. – Vol. 14(8), 1915. <https://doi.org/10.3390/ma14081915>.

7. Fomin O. Research into the Strength of an OpenWagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam / O. Fomin, J. Gerlici, M. Gorbunov, G. Vatulia, A. Lovska, K. Kravchenko // *Materials*. – 2021. – Vol. 14 (12), 3420. <https://doi.org/10.3390/ma14123420>.

8. Vatulia G. Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results / G. Vatulia, S. Komagorova, M. Pavliuchenkov // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 230, 02037. doi: 10.1051/mateconf/201823002037.

9. Vatulia G. Simulation of performance of cfst elements containing differentiated profile tubes filled with reinforced concrete / G. Vatulia, A. Lobiak, V. Chernogil, M. Novikova // *Materials Science Forum*. – 2019. – Vol. 968. – P. 281–287.

10. Богомаз Г. И. Нагруженность контейнеров-цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автоцепку / Г. И. Богомаз, Д. Д. Мехов, О. П. Пилипченко, Ю. Г. Черномащенко // *Зб. наук. праць “Динаміка та керування рухом механічних систем”*. Київ: АНУ, Інститут технічної механіки. – 1992. – С. 87–95.

11. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных), ГосНИИВ-ВНИИЖТ, М, 1996 г. - 84 с.

12. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). ДСТУ 7598:2014. [Чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015. – 250 с.

13. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. ГОСТ 33211-2014. [Действителен от 2016-07-01]. – М.: ИПК стандартов, 2016. – 54 с.

14. Сучасні технології в науці та освіті: колективна монографія / під. ред. О. Б. Целіщева, Г. О. Татарченко, Г. М. Хорошун. – Северодонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2021. – 320 с.

15. Лукин В. В. Конструирование и расчет вагонов / В. В. Лукин, Л. А. Шадур, В. И. Котуранов, А. А. Хохлов, П. С. Анисимов. – М.: УМК МПС России, 2000. – 731 с.

16. Романенко І. О. Математична модель розподілу навантаження в телекомунікаційних мережах спеціального призначення / І. О. Романенко, Р. М. Животовський, С. М. Петрук, А. В. Шишацький, О. О. Волошин // *Сис-*

теми обробки інформації. – 2017. – № 3. – С. 61 – 71.

17. Шишацький А. В. Математична модель спотворення сигналу в системах радіозв'язку з ортогональним частотним мультиплексуванням при впливі навмисних завад / А. В. Шишацький, В. В. Лютов, М. В. Борознюк, І. Ю. Рубцов // *Системи обробки інформації*. – 2016. – № 3. – С. 181 – 186.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Фомін Олексій Вікторович,

д.т.н., професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного університету інфраструктури та технологій.

Вул. Івана Огієнка, 19, м. Київ, 03049, Україна.

Тел.: +38 044 591 51 29.

E-mail: fomin1985@ukr.net.

Горбунов Микола Іванович,

д.т.н., професор, бувший завідувач кафедри «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини» Східноукраїнського національного університету імені В. Даля.

Ловська Альона Олександрівна,

д.т.н., доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту.

Майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна.

Тел.: +38 057 730 10 35.

E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com.

Рибін Андрій Вікторович,

старший викладач кафедри інженерії вагонів та якості продукції УкрДУЗТ.

Майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна.

Тел.: +38 057 730 10 35.

E-mail: rybinandrey2006@gmail.com.