

УДК 629.463. 001.63

DOI: 10.15587/1729-4061.2022.251300

Виявлення особливостей температурного впливу на несучу конструкцію вагона-хопера з композитною обшивкою при транспортуванні окатишів на металургійні підприємства

О. В. Фомін, А. О. Ловська, В. Г. Дженчако, О. О. Жилінков, А. М. Фоміна, А. С. Литвиненко

Проведено удосконалення несучої конструкції вагона-хопера для перевезення окатишів та гарячого агломерату. З метою покращення міцності несучої конструкції вагона-хопера під впливом високих температур від перевозимого вантажу запропоновано використання обшивки з композитного матеріалу. Дане рішення також сприяє зменшенню тари вагона на 5 % у порівнянні з вагоном-прототипом.

Проведено визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера. Дослідження проведені при русі вагона у порожньому стані стиковою нерівністю. Проведені розрахунки показали, що досліджувані показники динаміки не перевищують допустимих значень. При цьому хід руху вагона-хопера оцінюється як “відмінний”.

Визначено основні показники міцності несучої конструкції вагона-хопера з урахування запропонованого удосконалення. При цьому враховано температурний вплив на несучу конструкцію вагона-хопера від гарячого агломерату. Встановлено, що максимальні еквівалентні напруження виникають в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою та складають близько 290 МПа. При цьому напруження в обшивці вагона-хопера складають близько 200 МПа, що на 12 % нижче ніж у типовій конструкції.

Для визначення частот та форм власних коливань несучої конструкції вагона-хопера з композитною обшивкою проведено модальний аналіз. Результати розрахунку встановили, що перша власна частота перевищує 8 Гц. Отже безпека руху вагона забезпечується.

Розраховано коефіцієнт опору втомі несучої конструкції вагона-хопера. Встановлено, що його значення майже вдвічі вище за допустиме. Тобто опір втомі несучої конструкції забезпечується.

Проведені дослідження сприятимуть забезпеченню міцності несучих конструкцій вагонів-хоперів, скороченню витрат на утримання та підвищенню ефективності їх експлуатації.

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-хопер, несуча конструкція, композитний матеріал, динамічна навантаженість, міцність, опір втомі.

1. Вступ

Ефективність функціонування транспортної галузі зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію сучасних транспортних засобів. Оскільки основний сегмент перевізного процесу відводиться залізничному транспорту, то до

створення сучасних конструкцій вагонів повинні пред'являтися особливі умови. Зокрема це стосується їх несучих конструкцій.

Одним з найбільш поширених типів вагонів, який використовується на коліях промислових підприємств є вагони-хопери для перевезення окатишів та гарячого агломерату. При цьому температура гарячого агломерату може досягати 700 °С. Крім того, при транспортуванні на дальні відстані окатишів в вагонах-хоперах між гірсько-збагачувальними комбінатами та транспортно-вантажними комплексами металургійних комбінатів у період негативних температур довкілля вони змерзаються. Перед вивантаженням окатишів з вагонів-хоперів здійснюється їх розморожування у конвективних гаражах під дією температурного впливу.

Внаслідок значного температурного впливу та силового навантаження несучої конструкції вагона-хопера може мати місце його пошкодження. Найбільш поширеними серед яких є короблення обшивки кузова, деформації, тріщини тощо. Така обставина викликає необхідність заміни обшивки, а відповідно і додаткових ресурсів на утримання вагона. Порушення міцності вагона-хопера на шляху прямування загрожує стійкості його руху та перекиданню, а відповідно і пошкодженню рейкової інфраструктури внаслідок високої температури перевозимого вантажу [1–3]. Це викликає і загрозу екологічної, а також економічної безпеки залізничних перевезень. Отже, з метою попередження виникнення надзвичайних ситуацій при перевезенні гарячих окатишів та агломерату залізницею питання транспортної безпеки вимагають особливої уваги [4, 5].

Тому важливим є проведення відповідних досліджень, які спрямовані на покращення міцності несучих конструкцій вагонів-хоперів, а також ефективності їх експлуатації.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [6] розглянуто процес проектування на основі структурної оптимізації кузова залізничного вагону, виготовленого з екструдованих алюмінієвих панелей. Запропоновані технічні рішення підтверджені комплексними розрахунками на міцність кузова вагону. А в роботі [7] розглянуто доцільність використання магнієвих сплавів в несучих конструкціях транспортних засобів. Дане рішення сприятиме зменшенню тари вагонів у порівнянні з конструкціями прототипів.

Разом з цим, в даних роботах не досліджено впливу температурного навантаження на несучі конструкції вагонів, виготовлених з даних матеріалів.

Дослідження удароміцності залізничного вагона з композитних матеріалів, армованих волокном, наведені у публікації [8]. Розглянуто вплив початкового натягіння на міцність котла. Встановлено, що ефект початкового натягіння більш значний у випадку, коли навантаження діє паралельно напрямку основного волокна. Однак в роботі не визначено впливу використання композитних матеріалів на динамічну навантаженість вагонів.

В роботі [9] наведено обґрунтування використання полімерних композитних матеріалів у вагонобудуванні. Дані матеріали запропоновано використовувати при виготовленні настилу підлоги вагона. Висвітлені результати експериментальних досліджень за методом пресування композиту у формі. Важливо

сказати, що можливість використання даного матеріалу при виготовленні несучих елементів кузовів авторами не розглянуто.

Особливості розрахунку вантажного вагона з ламінованими композитними стінами висвітлюються в роботі [10]. Розрахунок реалізований за методом скінчених елементів в програмному комплексі Ansys 14.5. Наведені результати визначення оптимальної товщини стін кузова вагона за умови забезпечення його міцності. Разом з цим, при визначенні напруженого стану несучої конструкції вагона автори обмежилися нормативними значеннями навантажень. Тобто дослідження динамічної навантаженості, а також втомної міцності вагона, з урахуванням застосування композитних матеріалів не проводилося.

В роботі [11] наведені особливості використання екологічно чистих композитів для виготовлення засобів автомобільної промисловості. Висвітлені результати розрахунків на міцність засобів транспорту, виготовлених з даного матеріалу. Встановлено, що використання композитів на натуральній основі у порівнянні з класичними є більш раціональним з економічної та технічної точок зору.

Аналіз властивостей композиційних матеріалів та можливість їх застосування в конструкціях транспортних засобів наведений у роботі [12]. Дослідження проведені стосовно кузова автобуса. Встановлено, що використання композитів сприяє зниженню ваги кузова майже на 20 % при забезпеченні умов міцності та експлуатаційної надійності. Однак викликає цікавість доцільність застосування даних матеріалів при виготовленні несучих конструкцій залізничних транспортних засобів.

Особливості виробництва та використання сучасних полімерних композитних матеріалів при виготовленні залізничних вагонів проводиться в роботі [13]. Дослідження зосереджене на розробці нанокомпозитів з переробленого поліпропілену, армованого натуральним волокном. Необхідно зазначити, що питанням визначення міцності несучої конструкції вагона з застосуванням даного матеріалу в роботі уваги не приділено.

Обґрунтування застосування композитних панелей в конструкціях вантажних вагонів для зменшення зносу їх кузовів в експлуатації проведено в роботі [14]. Наведені результати розрахунку на міцність несучої конструкції вагона. Запропонований спосіб розміщення композитних панелей у внутрішньому просторі кузова. Також визначений спосіб стиковки панелей та їх кріплення до сталевій обшивки кузова.

В роботі [15] висвітлено особливості застосування композитних панелей в конструкціях вантажних вагонів. Дане впровадження пропонується здійснювати під час модернізації вагонів для захисту від корозійних пошкоджень та полегшення розвантаження вантажів в зимових умовах. При цьому авторами обґрунтовано застосування композиційних елементів (панелей) на прикладі бокових стін. Однак визначення доцільності застосування композитних панелей в несучих конструкціях вагонів-хоперів авторами не проводилося.

Аналіз літературних джерел [6–15] показує, що питання покращення міцності транспортних засобів шляхом впровадження нових прогресивних матеріалів є досить перспективними та актуальними. Разом з цим, їх розвиток стосовно застосування у вагонних конструкціях потребує подальшого дослідження. У

зв'язку з цим виникає необхідність проведення досліджень та створення відповідних напрацювань в цьому напрямку.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є виявлення особливостей температурного впливу на несучу конструкцію вагона-хопера з композитною обшивкою. Це сприятиме покращенню міцності несучої конструкції вагона-хопера під впливом високих температур від гарячого агломерату та зменшенню тари його несучої конструкції.

Для досягнення поставленої мети визначені такі завдання:

- запропонувати заходи щодо удосконалення несучої конструкції вагона-хопера;
- провести визначення динамічної навантаженості удосконаленої конструкції вагона-хопера;
- провести визначення основних показників міцності удосконаленої конструкції вагона-хопера;
- провести модальний аналіз та визначити коефіцієнт опору втомі несучої конструкції вагона-хопера.

4. Матеріали та методи дослідження

З метою визначення динамічної навантаженості удосконаленої несучої конструкції вагона-хопера проведено математичне моделювання. Розрахунок здійснений за умови руху вагона у порожньому стані, оскільки при цьому простежується найбільша навантаженість несучої конструкції. Враховано, що вагон рухається колією, що має пружно-в'язкі властивості [16–18]. Нерівність колії описувалася періодичною функцією. Розв'язок математичної моделі здійснений в програмному комплексі MathCad (USA) за методом Рунге-Кутта [19–21]. Початкові переміщення та швидкості покладені рівними нулю [22, 23]. Обмеженням розрахункової моделі є відсутність сил тертя між п'ятниками кузова та підп'ятниками візків.

Для визначення температурного впливу на міцність несучої конструкції вагона-хопера проведено розрахунок в програмному комплексі SolidWorks Simulation (Франція) [24–27]. При цьому застосовано метод скінчених елементів. Сітка створювалася на твердому тілі з урахуванням кривизни [28–30]. При проведенні розрахунків застосовані ізопараметричні тетраедри, оптимальна чисельність яких визначена графоаналітичним методом [31–34]. Кількість елементів сітки складала 373185, вузлів – 125608. Максимальний розмір елемента сітки дорівнює 60,0 мм, мінімальний – 12,0 мм, максимальне співвідношення боків елементів – 543,59, відсоток елементів з співвідношенням боків менше трьох – 7,64, більше десяти – 32,6. Мінімальна кількість елементів в колі – 12, співвідношення збільшення розміру елемента – 1,8. Закріплення моделі здійснювалося за горизонтальні частини п'ятників, тобто в зонах обпирання на ходові частини [35–38]. Матеріал металоконструкції кузова – сталь марки 09Г2С, а обшивки – композит. При цьому композит має лінійні пружні ортотропні властивості. Межа міцності в напрямку волокон складає 1100–1300 МПа, а в поперечному напрямку – 650 МПа. Важливо сказати, що даний композит витримує значення

міцності при температурі 700 °С. Прикладом може бути композит з титановою матрицею, який армують волокнами бора, борсика, карбіду кремнію, берилію, молібдену.

При проведенні розрахунків на міцність обшивка розглянута як оболонка. При створенні скінчено-елементної моделі обшивка розбивалася на тетраедри.

Оскільки основна частина несучої конструкції вагона-хопера виготовлена зі сталі, яка є ізотропним матеріалом, а композит – ортотропним, то розрахунок здійснений за двома критеріями – Мізеса та максимальних нормальних напружень.

Визначення власних частот та форм коливань несучої конструкції вагона-хопера здійснено шляхом модального аналізу, реалізованого в програмному комплексі SolidWorks Simulation (Франція) [39–42]. Для розрахунку коефіцієнту опору втомі несучої конструкції вагона-хопера використано методику, зазначену у нормативних документах щодо проєктування конструкцій вагонів.

5. Результати визначення температурної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера з композитних матеріалів

5. 1. Заходи щодо удосконалення несучої конструкції вагона-хопера

У типового вагона-хопера для перевезення окатишів та гарячого агломерату несуча конструкція складається з металевого каркасу (рис. 1). На відміну від інших типів вагонів обшивка з'єднується з каркасом не жорстко, а навішується на нього. Таке рішення виключає короблення кузова під дією високих температур та забезпечує легку заміну при пошкодженні.

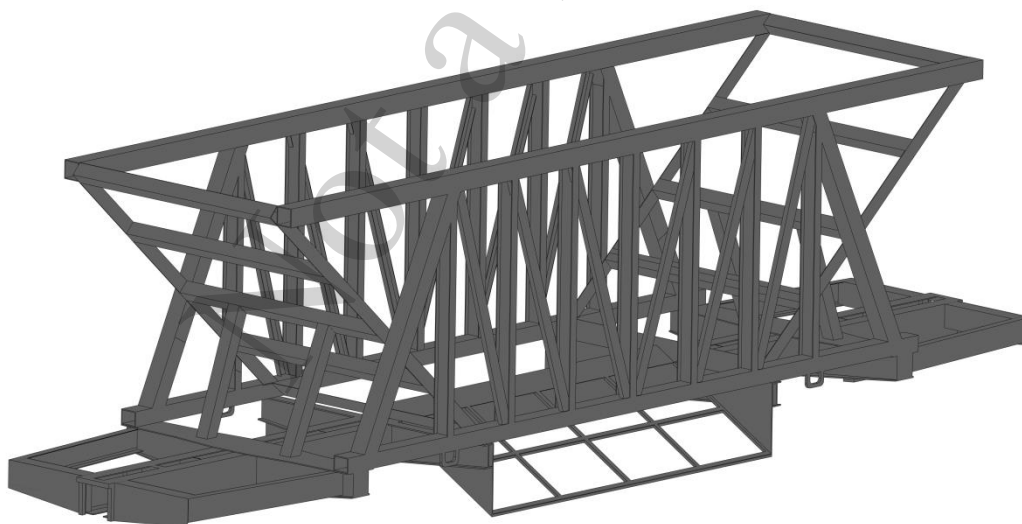


Рис. 1. Несуча конструкція вагона-хопера

З метою покращення показників міцності несучої конструкції вагона-хопера пропонується його удосконалення шляхом використання обшивки з композитного матеріалу (рис. 2). Крім того, використання композитної обшивки сприяє зменшенню тари вагона на 5 % у порівнянні з прототипом.

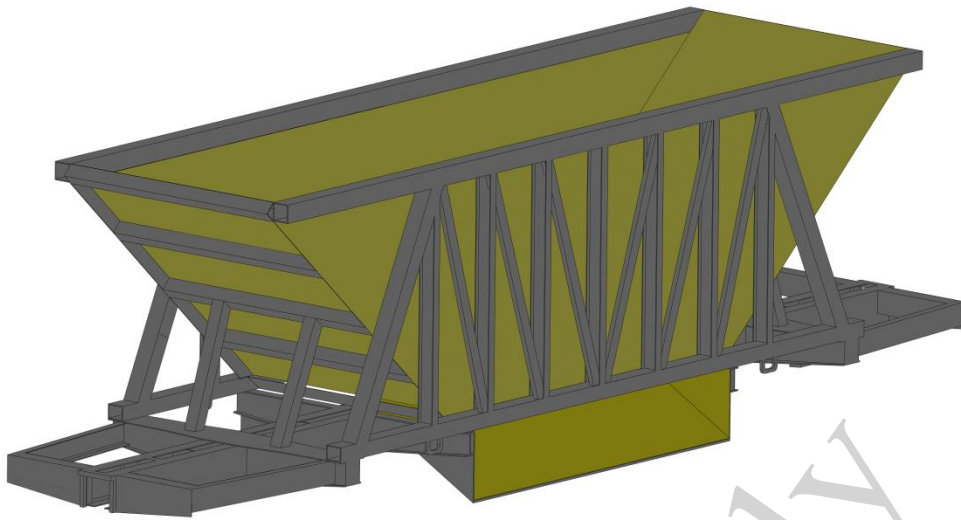


Рис. 2. Удосконалена несуча конструкція вагона-хопера

При цьому запропоноване удосконалення є можливим реалізувати під час виготовлення нових конструкцій вагонів, а також їх модернізацій в умовах вагоноремонтних підприємств.

5. 2. Визначення динамічної навантаженості удосконаленої конструкції вагона-хопера

У зв'язку з тим, що запропонована реалізація сприяє зменшенню тари вагона, проведено визначення основних показників його динаміки. Розрахункова схема наведена на рис. 3. В якості прототипу обрано вагон-хопер моделі 20-9749 (Україна).

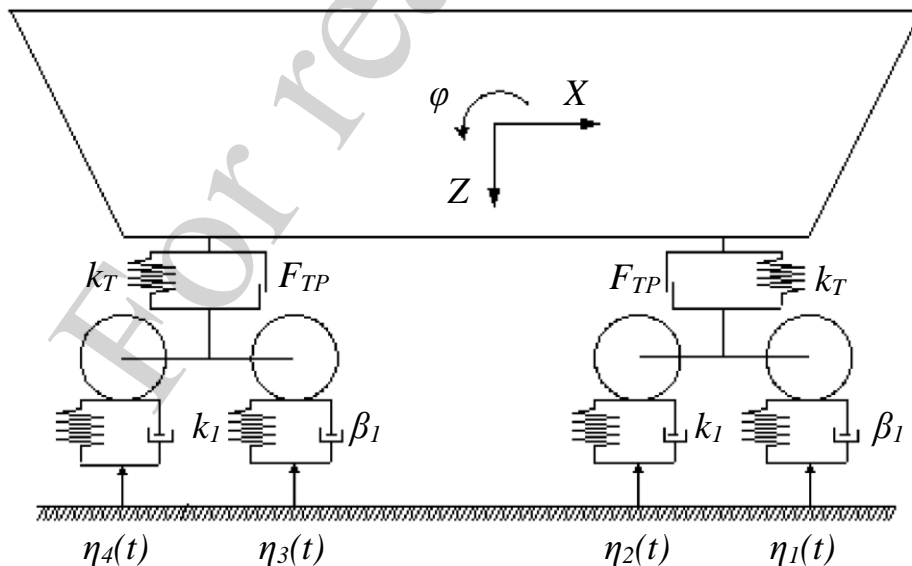


Рис. 3. Розрахункова схема вагона-хопера

До уваги прийнято коливання підскакування та галопування, як найбільш поширені типи коливань вагона в експлуатації. В моделі враховано технічні характеристики візків моделі 18-100.

$$M_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_1 + C_{1,1} \cdot q_1 + C_{1,3} \cdot q_3 + C_{1,5} \cdot q_5 = -F_{TP} \cdot \left(\text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) \right), \quad (1)$$

$$M_2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_2 + C_{2,2} \cdot q_2 + C_{2,3} \cdot q_3 + C_{2,5} \cdot q_5 = F_{TP} \cdot l \cdot \left(\text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) \right), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} M_3 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_3 + C_{3,1} \cdot q_1 + C_{3,2} \cdot q_2 + C_{3,3} \cdot q_3 + B_{3,3} \cdot \frac{d}{dt} q_3 = \\ = F_{TP} \cdot \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + k_1 (\eta_1 + \eta_2) + \beta_1 \left(\frac{d}{dt} \eta_1 + \frac{d}{dt} \eta_2 \right), \end{aligned} \quad (3)$$

$$M_4 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_4 + C_{4,4} \cdot q_4 + B_{4,4} \cdot \frac{d}{dt} q_4 = -k_1 (\eta_1 - \eta_2) - \beta_1 \cdot a \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta_1 - \frac{d}{dt} \eta_2 \right), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} M_5 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_5 + C_{5,1} \cdot q_1 + C_{5,2} \cdot q_2 + C_{5,5} \cdot q_5 + B_{5,5} \cdot \frac{d}{dt} q_5 = \\ = F_{TP} \cdot \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) + k_1 (\eta_3 + \eta_4) + \beta_1 \left(\frac{d}{dt} \eta_3 + \frac{d}{dt} \eta_4 \right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$M_6 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_6 + C_{6,6} \cdot q_6 + B_{6,6} \cdot \frac{d}{dt} q_6 = -k_1 \cdot a \cdot (\eta_3 - \eta_4) - \beta_1 \cdot a \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta_3 - \frac{d}{dt} \eta_4 \right), \quad (6)$$

де M_1, M_2 – відповідно, маса та момент інерції несучої конструкції вагона-хопера; M_3, M_4 – відповідно, маса та момент інерції першого за ходом руху візка; M_5, M_6 – відповідно, маса та момент інерції другого за ходом руху візка; C_{ij} – характеристика пружності складових коливальної системи; B_{ij} – функція розсіювання; a – напівбаза візка; q_i – узагальнені координати, що відповідають поступальному та кутовому переміщенням навколо вертикальної вісі, відповідно, кузова вагона-хопера, першого та другого візка; k_i – жорсткість ресорного підвішування візків; β_i – коефіцієнт демпфірування; F_{TP} – сила тертя, що виникає у ресорному комплекті.

Проведені розрахунки дозволили визначити основні показники динаміки вагона-хопера: прискорення в центрі мас, прискорення в зонах спирання на візки та коефіцієнт вертикальної динаміки (рис. 4–6).

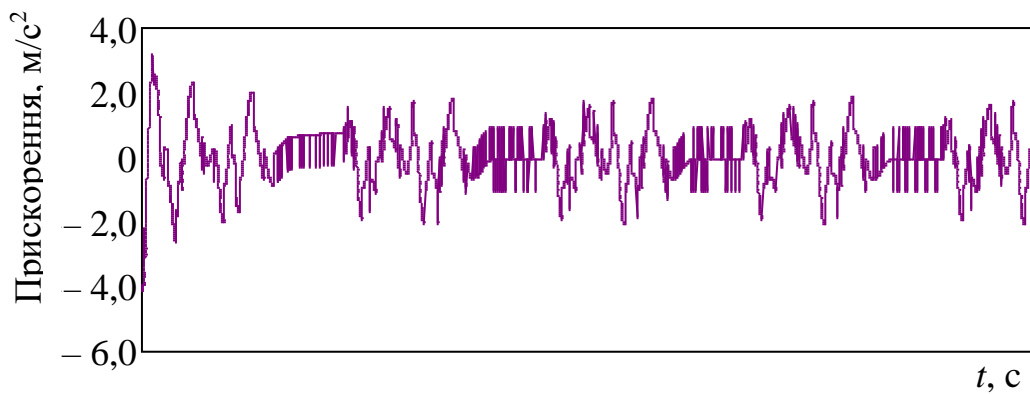


Рис. 4. Прискорення несучої конструкції вагона-хопера в центрі мас

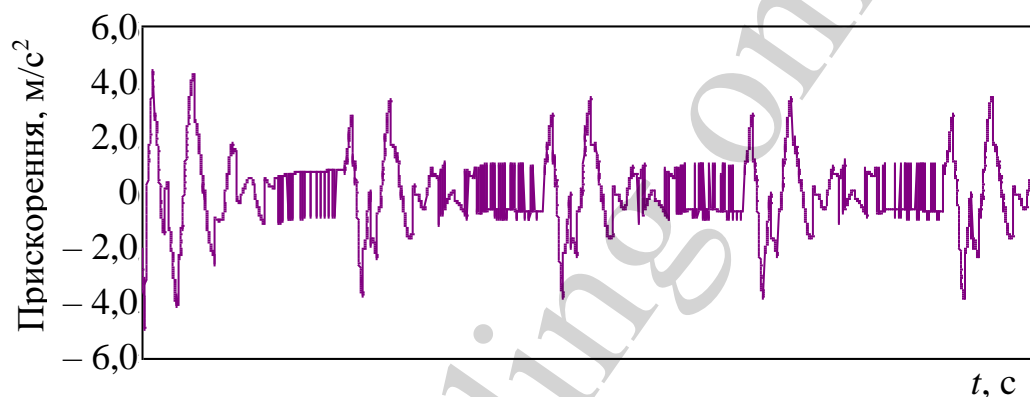


Рис. 5. Прискорення несучої конструкції вагона-хопера в зонах спирання на візки

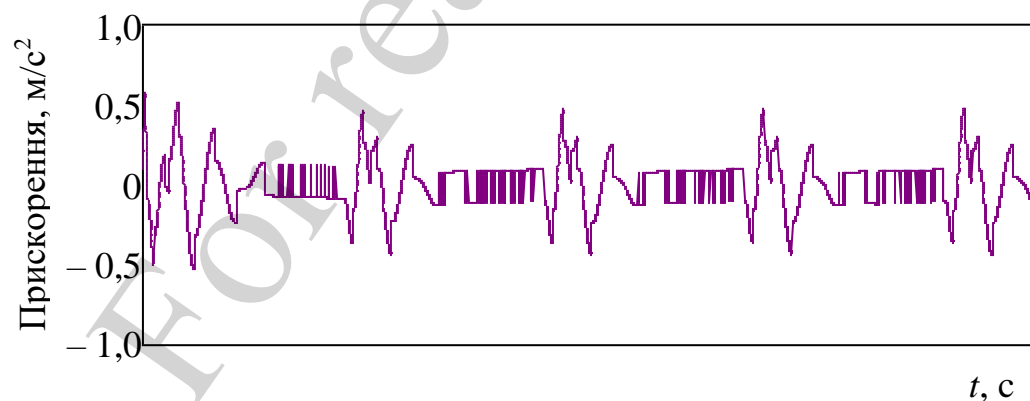


Рис. 6. Коефіцієнт вертикальної динаміки вагона-хопера

Проведені розрахунки динамічної навантаженості вагона показали, що визначені показники динаміки не перевищують допустимих значень. Прискорення, яке діє в центр мас несучої конструкції складає близько $0,4g$. Прискорення несучої конструкції вагона-хопера в зонах спирання на візки дорівнює $0,53g$, а

коефіцієнт вертикальної динамки – 0,52. При цьому хід руху вагона-хопера оцінюється як “відмінний”.

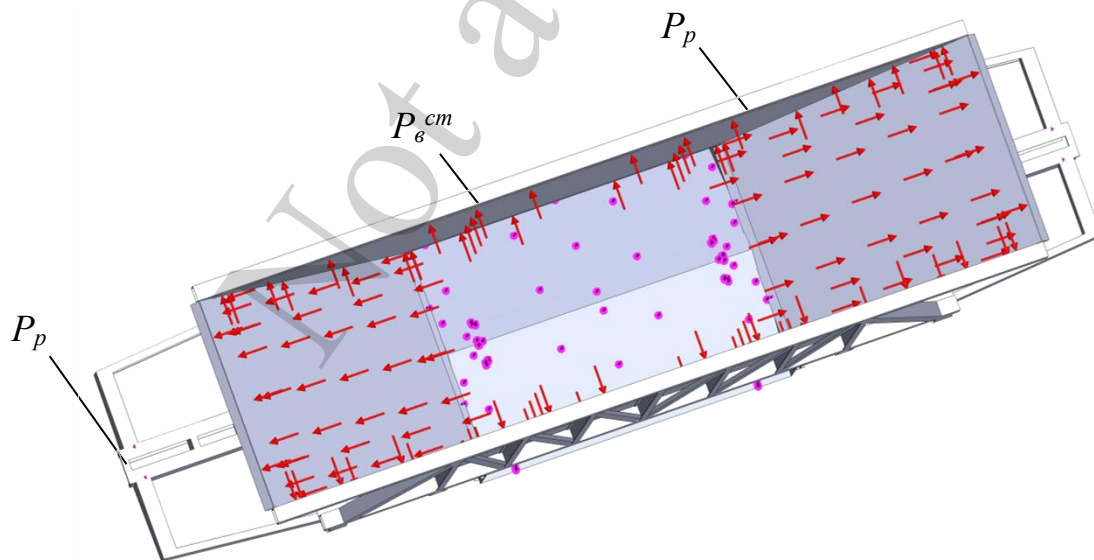
5.3. Визначення основних показників міцності удосконаленої конструкції вагона-хопера

Розрахункова схема несучої конструкції вагона-хопера для визначення показників його міцності наведена на рис. 7. При складанні моделі враховано, що використовується повна вантажопідйомність вагона-хопера. При цьому на кузов діє вертикальне статичне навантаження $P_{в}^{ст}$, тиск розпору насипного вантажу P_p , а також повздовжнє навантаження на передній упор автотягача P_a , яке дорівнює 2,5 МН. Тобто модель враховує рух вагона у складі поїзда. Також до моделі прикладалося температурне навантаження P_T , яке прийнято рівним 700 °С.

Результати розрахунку на міцність наведені на рис. 8. Встановлено, що максимальні еквівалентні напруження за критерієм Мізеса виникають в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою та складають близько 290 МПа. Напруження в обшивці вагона-хопера за критерієм максимальних нормальних напружень складають близько 200 МПа, що на 12 % нижче ніж у типовій конструкції (рис. 9). При цьому лінія тренду u_c описує розподілення напружень за висотою стійки у конструкції вагона зі сталеву обшивкою, а u_k – з композитною.

Розподілення напружень за довжиною хребтової балки рами наведено на рис. 10.

Максимальні напруження при цьому виникають в консольних частинах рами. В середній частині вони слали близько 200 МПа.



а

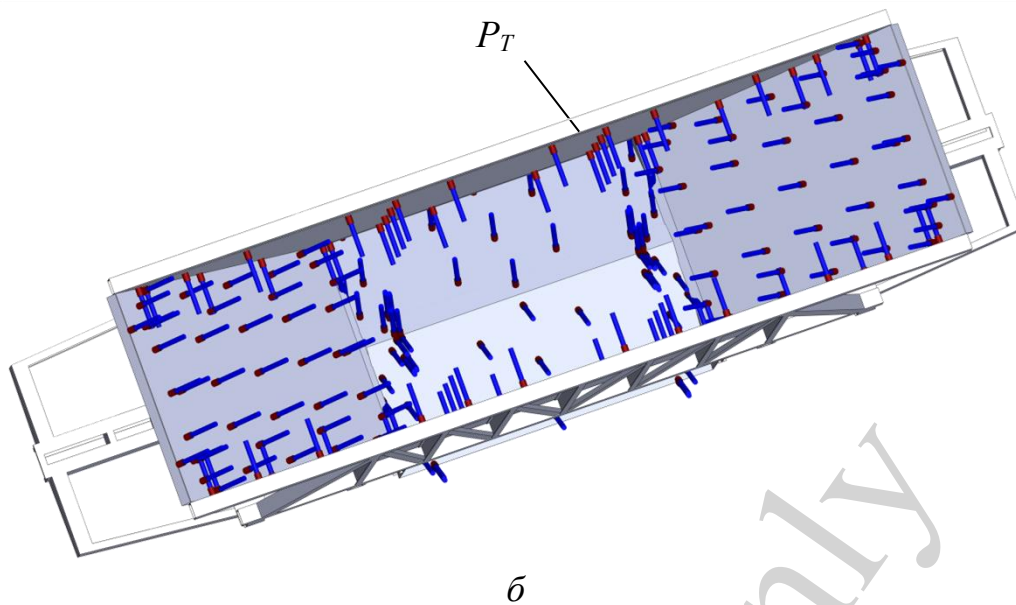


Рис. 7. Розрахункова схема несучої конструкції вагона-хопера: *а* – силові фактори; *б* – температурне навантаження

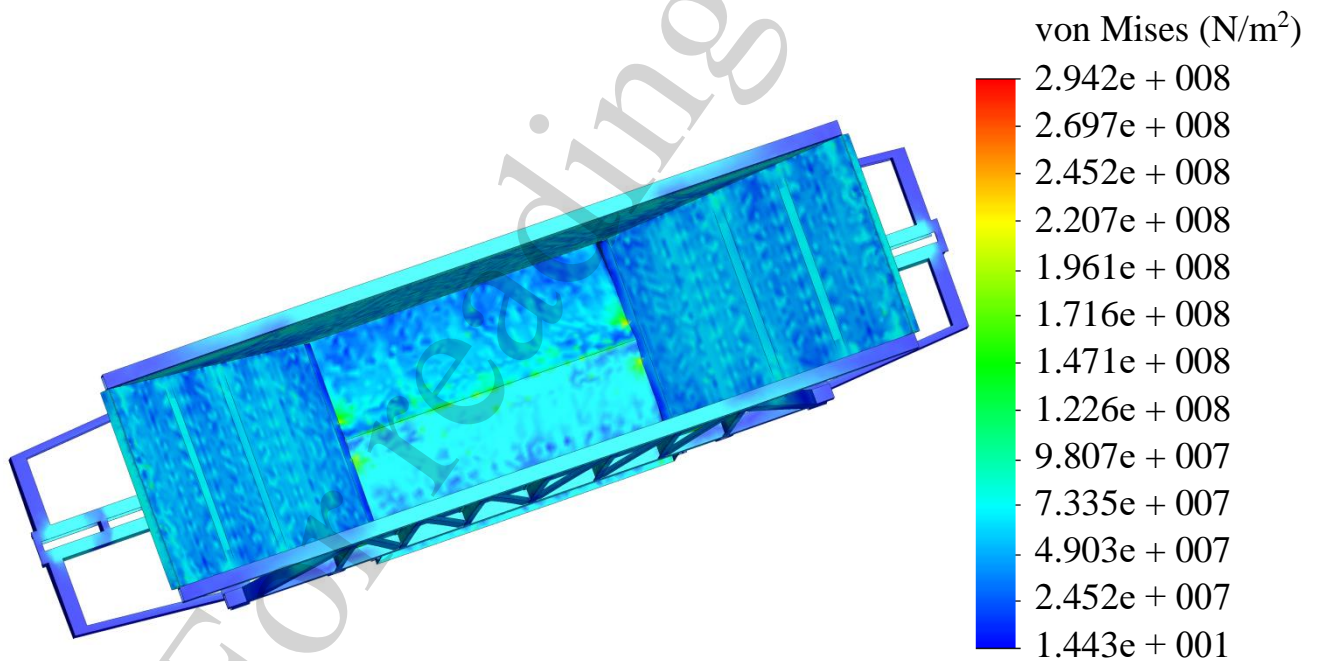


Рис. 8. Напружений стан несучої конструкції вагона-хопера

Також в рамках дослідження визначено міцність несучої конструкції вагона-хопера під дією температурного впливу при розморожуванні окатишів у період негативних температур довкілля – 10–15 °С. Для цього використано результати попередніх досліджень авторів з питань моделювання температурного режиму розморожування окатишів в вагонах-хоперах [43, 44]. Експериментальні дослідження були проведені в умовах транспортно-вантажного комплексу базового підприємства (ПРАТ «Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча»), який приймає і вивантажує окатиші у вагонах-хоперах.

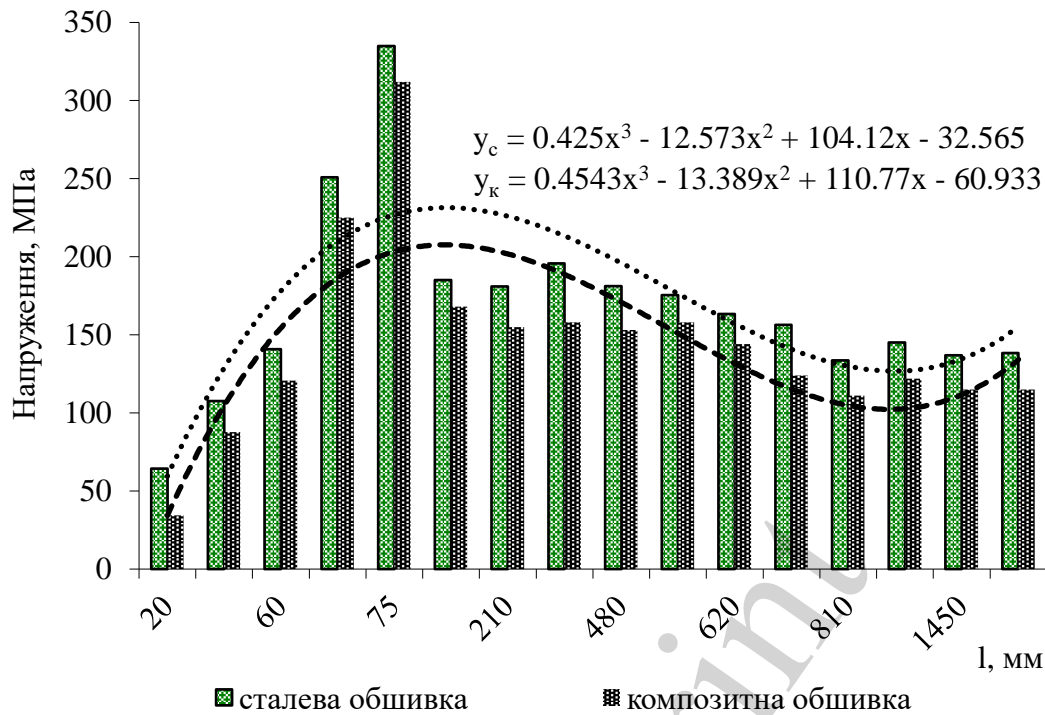


Рис. 9. Розподілення напружень за висотою проміжної стійки кузова

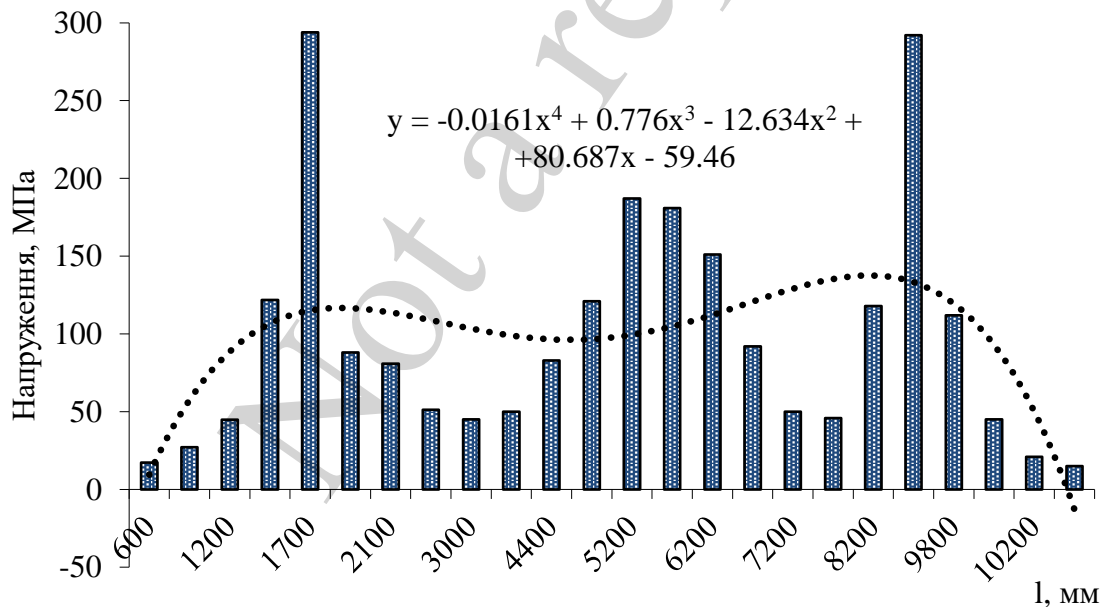


Рис. 10. Розподілення напружень в хребтовій балці за її довжиною

У відповідності до цих досліджень на першій стадії розморожування у часовому діапазоні від 0 до 2 годин відбувається інтенсивний підйом температури в секції гаража до 110–120 °С. На другій стадії витрата теплоносія поступово знижується. При цьому температура в секції у часовому діапазоні від 2 до 4 годин підтримується на рівні 100–120 °С. Після закінчення стадії активного розморожування подача теплоносія в секцію припиняється.

При проведенні розрахунків температурного впливу на несучу конструкцію вагона-хопера враховано температуру розморожування окатишів 120 °С. Розрахунок проведений за схемою, наведеною на рис. 7. Однак при цьому до уваги не приймалися навантаження, які діють на раму через автозчеп. Максимальні еквівалентні напруження при цьому виникають в стійках та складають близько 123 МПа, що нижче за допустимі значення більше ніж вдвічі. Результати проведених експериментальних досліджень та розрахунків міцності несучої конструкції вагона-хопера під дією температурного впливу до 120 °С показали, що при розморожуванні окатишів забезпечується збереження та цілісність несучої конструкції і обладнання вагонів-хоперів.

5. 4. Модальний аналіз удосконаленої конструкції вагона-хопера

Для визначення частот та форм власних коливань несучої конструкції вагона-хопера з композитною обшивкою проведено модальний аналіз. Розрахунок здійснений за розрахунковою схемою, наведеною на рис. 7, а.

Деякі власні форми коливань несучої конструкції вагона-хопера наведено на рис. 11.

Результати розрахунку частот коливань несучої конструкції вагона-хопера встановили, що перша власна частота має значення 11,7 Гц, тобто не нижче за допустиме – 8 Гц. Отже безпека руху вагона забезпечується [45, 46].

Також в рамках дослідження здійснено розрахунок опору втоми несучої конструкції вагона-хопера.

Розрахунок опору втоми здійснений з урахуванням коефіцієнта запасу n за формулою [45, 46]:

$$n = \frac{\sigma_{-1Д}}{\sigma_{a,e}} \geq [n], \quad (7)$$

$\sigma_{a,e}$ – розрахункове значення амплітуди динамічного напруження умовного симетричного циклу, зведене до бази N_0 , еквівалентне за пошкоджувальною дією значенню амплітуд у реальному режимі експлуатаційних випадкових напружень протягом проєктного терміну служби, МПа;

$[n]$ – допустимий коефіцієнт запасу опору втоми.

Еквівалентну зведену амплітуду динамічних напружень для розрахування на втому $\sigma_{a,e}$ у разі перервної функції розподілу амплітуд напруження визначають [47, 48]

$$\sigma_{a,e} = \sqrt[m]{\frac{N_c}{N_0} \sum_{i=1}^k P_{vi} f_B \sum_{i=1}^k \sigma_{ai}^m P_i}, \quad (8)$$

де N_c – сумарна кількість циклів динамічних напружень за розрахунковий термін служби; $p_{\sigma i}$ та p_{vi} – відповідно ймовірність появи напружень з рівнем σ_i в даному інтервалі швидкостей та частка часу, що приходить на експлуатацію

вагона зі швидкістю v_i ; σ_{ai} – рівень (розряд) амплітуди напружень, МПа; $k_{\sigma i}$ та k_{v_i} – число розрядів дискретизації відповідно амплітуд напружень та діапазону швидкостей руху.

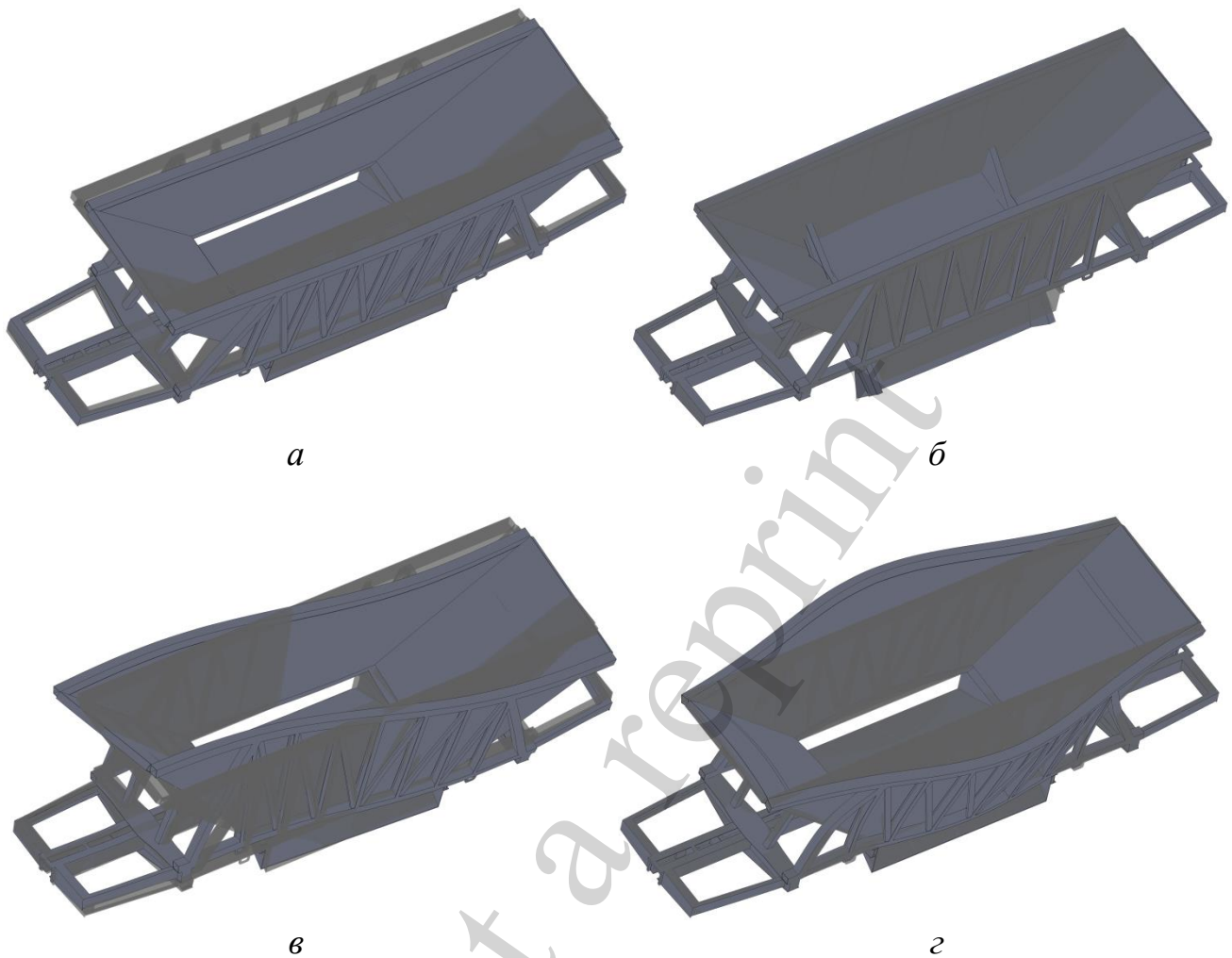


Рис. 11. Деякі форми коливань несучої конструкції вагона-хопера (масштаб деформацій 20:1): *а* – перша мода; *б* – друга мода; *в* – третя мода; *г* – четверта мода

Результати розрахунку еквівалентної зведеної амплітуди динамічних напружень показали, що ймовірність появи напружень з рівнем σ_i , що складає 0,95 значення $\sigma_{a,e}=51,3$ МПа. Звідси коефіцієнт запасу опору втомі дорівнює 4,5. При цьому у зв'язку з відсутністю експериментальних даних допустиме значення коефіцієнту запасу опору втомі прийнято рівним 2,2 [48]. Отже умова (7) виконується та втомна міцність несучої конструкції вагона-хопера забезпечується.

6. Обговорення результатів виявлення особливостей температурної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера з композитних матеріалів

Для забезпечення міцності несучої конструкції вагона-хопера для перевезення окатишів та агломерату запропоновано заходи щодо удосконалення. Пропонується використання замість металевої – обшивки з композиту (рис. 2).

Крім того, таке рішення сприяє зменшенню тари вагона-хопера на 5 % у порівнянні з прототипом.

Визначено основні показники динаміки несучої конструкції вагона-хопера (рис. 4–6). Розраховані показники динаміки не перевищують допустимих значень. При цьому хід руху вагона-хопера оцінюється як “відмінний”. Важливо сказати, що дослідження проведені за умови руху вагона у порожньому стані стиковою нерівністю.

Розраховано міцність несучої конструкції вагона-хопера з урахуванням дії температурного навантаження від перевозимого вантажу. Максимальні еквівалентні напруження за критерієм Мізеса виникають в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою та складають близько 290 МПа (рис. 8). Напруження в обшивці вагона-хопера за критерієм максимальних нормальних напружень складають близько 200 МПа, що на 12 % нижче ніж у типовій конструкції (рис. 9).

Отже використання композитної обшивки дозволяє не тільки зменшити тару несучої конструкції вагона, а і покращити його міцнісні характеристики за рахунок кращої термостійкості композиту у порівнянні зі сталлю.

Результати розрахунку на міцність несучої конструкції вагона-хопера при розморожуванні окатишів у період негативних температур довкілля довели, що показники міцності знаходяться в межах допустимих.

Визначено власні частоти та форми коливань несучої конструкції вагона-хопера (рис. 11). Встановлено, що перша власна частота не перевищує допустимих значень. Розраховано коефіцієнт опору втомі несучої конструкції вагона-хопера. Встановлено, що втомна міцність несучої конструкції забезпечується.

Перевагою даного дослідження у порівнянні з [6–15] є те, що створена авторами модель міцності несучої конструкції вагона-хопера дозволяє врахувати різнотипні матеріали в складових його несучої конструкції. Це дозволяє покращити міцнісні характеристики вагона-хопера у порівнянні з типовою конструкцією при експлуатаційних режимах навантаження.

Результати проведених досліджень дозволяють оцінити ефективність використання композитної обшивки в несучій конструкції вагона-хопера з точки зору навантаженості при найбільш несприятливих експлуатаційних режимах.

Обмеженням даного дослідження є те, що авторами при складанні моделі міцності несучої конструкції вагона-хопера не враховано зварювальних швів між його складовими. Також модель не враховує сил тертя між п’ятниками кузова та підп’ятниками візків.

Математична модель динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера (1)–(6) не враховує переміщень гарячого агломерату при коливаннях.

У якості недоліків дослідження слід відзначити необхідність проведення експериментального визначення показників динаміки та міцності несучої конструкції вагона-хопера. Це можливо здійснити методом подоби на дослідному зразку вагона-хопера, що планується провести на послідуєчих етапах роботи. Також подальшим розвитком даних досліджень є визначення повздовжньої навантаженості несучої конструкції вагона-хопера.

Проведені дослідження сприятимуть забезпеченню міцності несучих конструкцій вагонів-хоперів, скороченню витрат на утримання та підвищенню ефективності їх експлуатації.

7. Висновки

1. Запропоновано заходи щодо удосконалення несучої конструкції вагона-хопера. Для покращення показників міцності несучої конструкції вагона-хопера пропонується використання обшивки з композитного матеріалу, який має термостійкі властивості. Межа міцності матеріалу в напрямку волокон складає 1100–1300 МПа, а в поперечному напрямку – 650 МПа. Використання обшивки з композитного матеріалу сприяє зменшенню тари вагона на 5 % у порівнянні з прототипом.

2. Проведено визначення динамічної навантаженості удосконаленої конструкції вагона-хопера. Результати розрахунків показали, що визначені показники динаміки не перевищують допустимих значень. Прискорення, яке діє в центр мас несучої конструкції, складає близько 0,4g. Прискорення несучої конструкції вагона-хопера в зонах спирання на візки дорівнює 0,53g, а коефіцієнт вертикальної динаміки – 0,52. При цьому хід руху вагона-хопера оцінюється як “відмінний”.

3. Проведено визначення основних показників міцності удосконаленої конструкції вагона-хопера. Максимальні еквівалентні напруження виникають в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою та складають близько 290 МПа. При цьому напруження в обшивці вагона-хопера складають близько 200 МПа, що на 12 % нижче ніж у типовій конструкції. Тобто міцність несучої конструкції забезпечується. Результати проведених експериментальних досліджень та розрахунків міцності несучої конструкції вагона-хопера під дією температурного впливу до 120 °C показали, що при розморожуванні окатишів забезпечується збереження та цілісність несучої конструкції і обладнання вагонів-хоперів. Слід зазначити, що еквівалентні напруження несучої конструкції вагона-хопера складають 123 МПа та знаходяться в межах допустимих значень.

4. Проведено модальний аналіз та визначено коефіцієнт опору втоми несучої конструкції вагона-хопера. Результати розрахунку встановили, що перша власна частота має значення 11,7 Гц, що не нижче за допустиме – 8 Гц. Отже безпека руху вагона забезпечується.

Коефіцієнту запасу опору втоми несучої конструкції вагона-хопера склав 4,5, що майже вдвічі вище за допустимий.

Література

1. Strelko, O. H., Kyrychenko, H. I., Berdnychenko, Y. A., Sorochynska, O. L., Ya Pylypchuk, O. (2019). Application of Information Technologies for Automation of Railway and Cargo Owner Interaction. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 582 (1), 012029. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/582/1/012029>
2. Soloviova, L., Strelko, O., Isaienko, S., Soloviova, O., Berdnychenko, Y. (2020). Container Transport System as a Means of Saving Resources. IOP

Conference Series: Earth and Environmental Science, 459 (5), 052070. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052070>

3. Kondratiev, A. (2019). Improving the mass efficiency of a composite launch vehicle head fairing with a sandwich structure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (102)), 6–18. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184551>

4. Kondratiev, A., Gaidachuk, V., Nabokina, T., Kovalenko, V. (2019). Determination of the influence of deflections in the thickness of a composite material on its physical and mechanical properties with a local damage to its wholeness. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (100)), 6–13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174025>

5. Goolak, S., Gubarevych, O., Yermolenko, E., Slobodyanyuk, M., Gorobchenko, O. (2020). Mathematical modeling of an induction motor for vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (2 (104)), 25–34. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.199559>

6. Lee, H.-A., Jung, S.-B., Jang, H.-H., Shin, D.-H., Lee, J. U., Kim, K. W., Park, G.-J. (2015). Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230 (4), 1283–1296. doi: <https://doi.org/10.1177/0954409715593971>

7. Lee, W. G., Kim, J.-S., Sun, S.-J., Lim, J.-Y. (2018). 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*, 232 (1), 25–42. doi: <https://doi.org/10.1177/0954409716646140>

8. Street, G. E., Mistry, P. J., Johnson, M. S. (2021). Impact Resistance of Fibre Reinforced Composite Railway Freight Tank Wagons. *Journal of Composites Science*, 5 (6), 152. doi: <https://doi.org/10.3390/jcs5060152>

9. Olmos Irikovich, Z., Rustam Vyacheslavovich, R., Mahmud Lafta, W., Yadgor Ozodovich, R. (2020). Development of new polymer composite materials for the flooring of rail carriage. *International Journal of Engineering & Technology*, 9 (2), 378. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v9i2.30519>

10. Patrascu, A. I., Hadar, A., Pastrama, S. D. (2020). Structural Analysis of a Freight Wagon with Composite Walls. *Materiale Plastice*, 57 (2), 140–151. doi: <https://doi.org/10.37358/mp.20.2.5360>

11. Fantuzzi, N., Baccocchi, M., Benedetti, D., Agnelli, J. (2021). The use of sustainable composites for the manufacturing of electric cars. *Composites Part C: Open Access*, 4, 100096. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100096>

12. Pravilonis, T., Sokolovskij, E. (2020). Analysis of composite material properties and their possibilities to use them in bus frame construction. *Transport*, 35 (4), 368–378. doi: <https://doi.org/10.3846/transport.2020.13018>

13. Ibrahim, I. D., Jamiru, T., Sadiku, E. R., Kupolati, W. K., Mpofu, K., Eze, A. A., Uwa, C. A. (2019). Production and Application of Advanced Composite Materials in Rail Cars Development: Prospect in South African Industry. *Procedia Manufacturing*, 35, 471–476. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.069>

14. Buchacz, A., Baier, A., Herbuś, K., Majzner, M., Ociepka, P. (2015). Examination of a Cargo Space of a Freight Wagon Modified with Composite Panels. *Applied Mechanics and Materials*, 809-810, 944–949. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.809-810.944>
15. Płaczek, M., Wróbel, A., Olesiejuk, M. (2017). Modelling and arrangement of composite panels in modernized freight cars. *MATEC Web of Conferences*, 112, 06022. doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201711206022>
16. Дьомін, Ю. В., Черняк, Г. Ю. (2003). *Основи динаміки вагонів*. Київ: КУЕТТ, 269.
17. Lovska, A., Fomin, O., Píštěk, V., Kučera, P. (2020). Dynamic Load Modelling within Combined Transport Trains during Transportation on a Railway Ferry. *Applied Sciences*, 10 (16), 5710. doi: <https://doi.org/10.3390/app10165710>
18. Lovskaya, A. (2015). Computer simulation of wagon body bearing structure dynamics during transportation by train ferry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (75)), 9–14. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.43749>
19. Pospelov, B., Rybka, E., Togobytska, V., Meleshchenko, R., Danchenko, Y., Butenko, T. et. al. (2019). Construction of the method for semi-adaptive threshold scaling transformation when computing recurrent plots. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (10 (100)), 22–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176579>
20. Кирьянов, Д. В. (2006). *Mathcad 13*. СПб.: БХВ-Петербург, 608.
21. Fomin, O., Gerlici, J., Lovska, A., Kravchenko, K., Fomina, Y., Lack, T. (2019). Determination of the strength of the containers fittings of a flat wagon loaded with containers during shunting. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 659 (1), 012056. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/659/1/012056>
22. Bondarenko, V., Skurikhin, D., Wojciechowski, J. (2019). The Application of Lithium-Ion Batteries for Power Supply of Railway Passenger Cars and Key Approaches for System Development. *Smart and Green Solutions for Transport Systems*, 114–125. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-35543-2_10
23. Fomin, O. V. (2015). Improvement of upper bundling of side wall of gondola cars of 12-9745 model. *Metallurgical and Mining Industry*, 1, 45–48. URL: https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_1/9%20Fomin.pdf
24. Lovska, A., Fomin, O., Píštěk, V., Kučera, P. (2020). Dynamic Load and Strength Determination of Carrying Structure of Wagons Transported by Ferries. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8 (11), 902. doi: <https://doi.org/10.3390/jmse8110902>
25. Fomin, O., Lovska, A. (2021). Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (7 (110)), 6–14. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>
26. Vatulia, G., Komagorova, S., Pavliuchenkov, M. (2018). Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. *MATEC Web of Conferences*, 230, 02037. doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823002037>

27. Lovska, A., Fomin, O., Kučera, P., Pištěk, V. (2020). Calculation of Loads on Carrying Structures of Articulated Circular-Tube Wagons Equipped with New Draft Gear Concepts. *Applied Sciences*, 10 (21), 7441. doi: <https://doi.org/10.3390/app10217441>
28. Vatulia, G., Rezunencko, M., Orel, Y., Petrenko, D. (2017). Regression equations for circular CFST columns carrying capacity evaluation. *MATEC Web of Conferences*, 107, 00051. doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201710700051>
29. Dudnyk, V., Sinenko, Y., Matsyk, M., Demchenko, Y., Zhyvotovskiy, R., Repilo, I. et. al. (2020). Development of a method for training artificial neural networks for intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (2 (105)), 37–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203301>
30. Lovska, A., Fomin, O. (2020). A new fastener to ensure the reliability of a passenger car body on a train ferry. *Acta Polytechnica*, 60 (6), 478–485. doi: <https://doi.org/10.14311/ap.2020.60.0478>
31. Alieinykov, I., Thamer, K. A., Zhuravskiy, Y., Sova, O., Smirnova, N., Zhyvotovskiy, R. et. al. (2019). Development of a method of fuzzy evaluation of information and analytical support of strategic management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (2 (102)), 16–27. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184394>
32. Koshlan, A., Salnikova, O., Chekhovska, M., Zhyvotovskiy, R., Prokopenko, Y., Hurskyi, T. et. al. (2019). 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*, 5 (9 (101)), 35–45. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.180197>
33. Krol, O., Sokolov, V. (2020). Modeling of Spindle Node Dynamics Using the Spectral Analysis Method. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 35–44. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_4
34. Krol, O., Porkuian, O., Sokolov, V., Tsankov, P. (2019). Vibration stability of spindle nodes in the zone of tool equipment optimal parameters. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences*, 72 (11), 1546–1556. doi: <https://doi.org/10.7546/crabs.2019.11.12>
35. Fomin, O., Gorbunov, M., Gerlici, J., Vatulia, G., Lovska, A., Kravchenko, K. (2021). Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam. *Materials*, 14 (12), 3420. doi: <https://doi.org/10.3390/ma14123420>
36. Pištěk, V., Kučera, P., Fomin, O., Lovska, A. (2020). Effective Mistuning Identification Method of Integrated Bladed Discs of Marine Engine Turbochargers. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8 (5), 379. doi: <https://doi.org/10.3390/jmse8050379>
37. Fomin, O., Lovska, A. (2020). Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (108)), 21–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217162>

38. Fomin, O., Gerlici, J., Lovskaya, A., Kravchenko, K., Prokopenko, P., Fomina, A., Hauser, V. (2018). Research of the strength of the bearing structure of the flat wagon body from round pipes during transportation on the railway ferry. *MATEC Web of Conferences*, 235, 00003. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500003>
39. Атаманчук, Н. А., Цыганская, Л. В. (2013). Направления совершенствования конструкций вагонов-цистерн для перевозки нефтепродуктов. *Транспорт Российской Федерации*, 3 (46), 14–17. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/napravleniya-sovershenstvovaniya-konstruktsiy-vagonov-tsistern-dlya-perevozki-nefteproduktov/viewer>
40. Wiesław, K., Tadeusz, N., Michał, S. (2016). Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System. *Transportation Research Procedia*, 14, 615–624. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.307>
41. Divya Priya, G., Swarnakumari, A. (2014). Modeling and analysis of twenty tonne heavy duty trolley. *International Journal of Innovative Technology and Research*, 2 (6), 1568–1580. URL: <https://www.ijitr.com/index.php/ojs/article/view/446>
42. Vatulia, G. L., Lobiak, O. V., Deryzemlia, S. V., Verevicheva, M. A., Orel, Y. F. (2019). Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 664 (1), 012014. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/664/1/012014>
43. Дженчако, В. Г. (2019). Підвищення ефективності перевезення масової сировини на промислові підприємства у зимовий період. *Наука та виробництво*, 21, 218–230. doi: <https://doi.org/10.31498/2522-9990212019189941>
44. Парунакян, В. Э., Дженчако, В. Г. (2010). Исследование процесса размораживания железосодержащего сырья в вагонах с использованием компьютерной технологии «Data mining». *Вісник Приазовського державного технічного університету*, 20, 267–274. URL: <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/191>
45. Устич, П. А., Карпыч, В. А., Овечников, М. Н. (1999). Надежность рельсового нетягового подвижного состава. Москва, 415.
46. Лукин, В. В., Шадур, Л. А., Котуранов, В. И., Хохлов, А. А., Анисимов, П. С. (2000). Конструирование и расчет вагонов. Москва, 731.
47. Путьято, А. В., Белогуб, В. В. (2013). Прогнозирование усталостной прочности котла вагона-цистерны после 40 лет эксплуатации. *Современные технологии. Системный Анализ. Моделирование*, 2 (38), 72–77. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-ustalostnoy-prochnosti-kotla-vagona-tsisterny-posle-40-let-ekspluatatsii/viewer>
48. Сенько, В. И., Макеев, С. В., Комиссаров, В. В., Скороходов, С. А. (2018). Особенности определения коэффициента запаса сопротивления усталости конструкций подвижного состава. *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт*, 1 (36), 5–9. URL: <http://elib.bsut.by/handle/123456789/842>