

Аналіз міцності рами вагона-хопера двохсекційного з замкненою конструкцією хребтової балки

О.В. Фомін¹ • А.О. Ловська²

Received: 26 March 2022 / Accepted: 30 May 2022

Проблематика. Забезпечення рентабельності залізничних перевезень та утримання їх лідерських позицій зумовлює необхідність введення в експлуатацію перспективних конструкцій рухомого складу. Такий рухомий склад повинен мати не тільки покращені техніко-економічні показники, а і забезпечувати мінімізацію порожніх пробігів. Тому створення перспективних конструкцій рухомого складу, призначених для одночасного перевезення різнотипних вантажів є досить актуальним питанням.

Мета. Висвітлення результатів визначення міцності рами вагона-хопера двохсекційного з замкненою конструкцією хребтової балки при основних експлуатаційних режимах навантаження.

Методика реалізації. З метою зменшення матеріалоемності рами вагона-хопера використано метод оптимізації за резервами міцності. Для цього здійснено розрахунок на міцність типової рами вагона-хопера за методом скінчених елементів, реалізованого в програмному комплексі SolidWorks Simulation. Для зменшення матеріалоемності рами вагона-хопера запропоновано використання прямокутного профілю для хребтової балки.

Результати. Обґрунтовано використання прямокутного профілю для хребтової балки рами вагона-хопера. При цьому стає можливим зменшити її масу у порівнянні з типовим виконанням на 2,3 %. Результати розрахунків на міцність рами вагона-хопера показали, що максимальні напруження в ній складають 341,5 МПа і не перевищують допустимих значень.

Висновки. Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування перспективних конструкцій рухомого складу, а також підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту.

Ключові слова: транспортна механіка; вагон-хопер; несуча конструкція; оптимізація рами; навантаженість конструкції; міцність.

Вступ

Залізничний транспорт вже тривалий час є провідною галуззю транспортної системи. Для утримання його лідерських позицій важливим є підвищення рентабельності залізничних перевезень. Досягти цього можливо шляхом підвищення ефективності експлуатації рухомого складу, в тому числі спеціалізованого, призначеного для перевезення “вузької” номенклатури ва-

нтажів. Одним з найбільш поширених типів спеціалізованих вагонів є вагони-хопери для перевезення окатишів та гарячого агломерату.

Для підвищення ефективності експлуатації вагона-хопера можливим є удосконалення його несучої конструкції для одночасного перевезення різнотипних вантажів. Це сприятиме підвищенню рентабельності залізничних перевезень, а також створенню напрацювань щодо проектування перспективних конструкцій вантажних вагонів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Особливості удосконалення конструкції вагона-хопера для перевезення зерна висвітлюються у публікації [1]. Можливість оптимізації елементів кузова вагона проведено за аналізом найбільш характерних вузлів і конструктивних ознак спеціалізованих бункерних

✉ А.О. Ловська
alyona.vagons@gmail.com

¹ Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна

² Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

вагонів для перевезення насипних вантажів. Тобто враховано досвід експлуатації окремих складових кузова з подальшою інтеграцією у нову конструкцію.

В роботі [2] проводиться структурно-параметрична оптимізація несучої конструкції вантажного вагона. Еволюційна схема оптимізації стрижневих, пластинчастих та пластинчасто-стрижневих елементів проведена за алгоритмом, який включає відбір варіантів несучої системи за критерієм значення цільової функції. Важливо сказати, що розглянуті конструкції вантажних вагонів не дозволяють здійснювати одночасне перевезення різнотипних вантажів.

Питання оптимізації кузовів вантажних вагонів відкритого типу з несучою підлогою висвітлені у роботі [3]. Розроблений алгоритм сумісної структурної та параметричної оптимізації бокової стіни та рами вагона з несучою підлогою під осьове навантаження 25 т/вісь. Разом з цим запропонована конструкція вагона не дозволяє здійснювати одночасне перевезення різнотипних вантажів, що скорочує ефективність його експлуатації.

В роботі [4] наведені особливості топологічної оптимізації кузова вагона. При цьому використано комп'ютерне моделювання з застосуванням методу скінчених елементів. Результати досліджень підтвердили ефективність використання запропонованої методології для кузовів вагонів. При цьому у якості прикладу розрахунок проведений для кузова пасажирського вагона. Стосовно несучої конструкції вагона-хопера дана методика не використовувалася.

Структурно-оптимізаційна концепція створення кузова вагона з алюмінієвих панелей висвітлюється у публікації [5]. Особливістю панелей є те, що вони виготовлені по типу "сендвіч". Характеристична функція пошуку оптимальної комбінації визначена максимальними напруженнями та зміщеннями. Однак запропонована конструкція вагона має більшу собівартість виготовлення у порівнянні з суцільнозварною. Це утримує широкого впровадження запропонованих рішень у виробництво.

В роботі [6] розглядається уніфікована концепція ударної міцності з метою оптимізації кузовів рухомого складу. При цьому кузов представлений у вигляді жорсткої рамної конструкції. Задача оптимізації зводилася до мінімізації маси кузова з урахуванням обмежень за напруженнями. Задача зменшення матеріалосності кузова авторами не розглядалася.

Обґрунтування використання несучих конструкцій вагонів секційного типу з труб круглого перерізу проводиться у роботі [7]. Важливо сказати, що дані конструкції вагонів дозволяють здійснювати одночасне перевезення різнотипних вантажів. Однак процес проектування та технічного обслуговування таких конструкцій вагонів викликає складнощі в експлуатації.

Особливості удосконалення кузова вагона-хопера шляхом використання труб круглого перерізу у якості складових елементів конструкції висвітлюється

в роботі [8]. Наведені результати математичного та комп'ютерного моделювання навантаженості несучої конструкції вагона-хопера, які підтвердили доцільність запропонованого рішення. Разом з цим наведена конструкція вагона-хопера не дозволяє здійснювати одночасне перевезення різнотипних вантажів у ньому.

Проведений аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновок, що на сучасному етапі розвитку залізничної галузі питання удосконалення та оптимізації несучих конструкцій вагонів є досить актуальними, однак потребують подальшого розвитку для підвищення ефективності їх експлуатації. Це викликає необхідність проведення відповідних досліджень в цьому напрямку.

Метою дослідження є висвітлення результатів визначення міцності рами вагона-хопера двохсекційного з замкнутою конструкцією хребтової балки при основних експлуатаційних режимах навантаження. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

- провести оптимізацію хребтової балки рами вагона-хопера двохсекційного;
- провести розрахунок на міцність рами вагона-хопера двохсекційного з замкнутою конструкцією хребтової балки.

Оптимізація хребтової балки рами вагона-хопера двохсекційного

Для підвищення ефективності залізничних перевезень запропоновано конструкцію вагона-хопера (рис. 1). Особливістю вагона є те, що його несуча конструкція складається з двох секцій. Таке рішення дозволяє здійснювати одночасне перевезення різнотипних вантажів у одному вагоні.

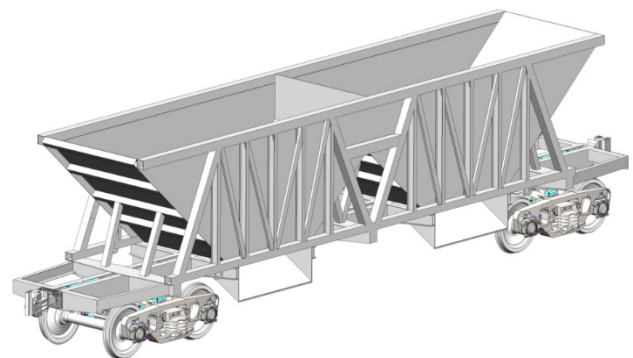


Рис. 1. Вагон-хопер двохсекційний

При проектуванні вагона у якості прототипу використано вагон-хопер моделі 20-9749, побудови ДП "Укрспецвагон" (Україна).

Для забезпечення відповідної жорсткості рами в зонах обпирання секцій на її середню частину встановлена балка прямокутного перерізу (рис. 2).

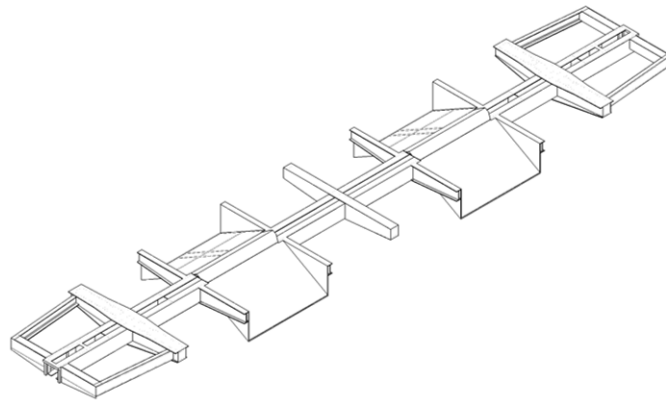


Рис. 2. Рама вагона-хопера двохсекційного

Для зниження собівартості виготовлення та експлуатації вагона-хопера можливим є зниження його тари. Досягти цього можливо оптимізацією складових конструкцій рами. Одним з варіантів такої оптимізації є виконання хребтової балки замкненої конструкції (рис. 3).

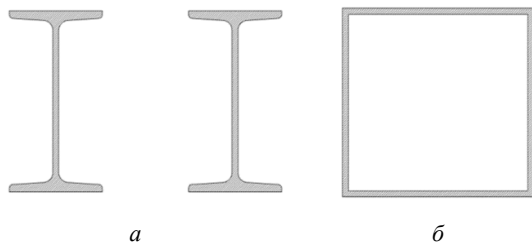


Рис. 3. Переріз хребтової балки рами вагона-хопера а) типова; б) удосконалена

Також є можливим використання профілів або листів, які утворюють замкнену конструкцію хребтової балки.

Оптимальні параметри хребтової балки визначені методом оптимізації за резервами міцності, який описано у роботі [9]. Для цього проведено розрахунок на міцність типової рами вагона-хопера за метод скін-

чених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation.

Оптимальна кількість елементів скінчено-елементної моделі рами вагона-хопера визначена з використанням графоаналітичного методу [10–12]. В якості скінчених елементів застосовані ізопараметричні тетраедри. Кількість вузлів сітки складала 17524, а елементів – 48549. При цьому максимальний розмір елементу дорівнює 200 мм, мінімальний – 40 мм. Кількість елементів в колі дорівнює 9. Співвідношення збільшення розміру елементу складало 1,7.

При складанні розрахункової схеми враховані такі навантаження: вертикальне статичне навантаження P_e^{cm} , а також повздожнє навантаження P_n , що діє на раму від автозчепного пристрою (рис. 4). Величина повздожнього навантаження, яке діє на задній упор автозчепу прийнята рівною 3,5 МН. З протилежного боку вагона воно врівноважувалося силами інерції, прикладеними до заднього упору автозчепу. Закріплення моделі здійснювалося в зонах обпирання рами на ходові частини.

Матеріал конструкції – сталь марки 09Г2С. При проведенні розрахунків на міцність у якості допустимих враховані напруження плинності матеріалу конст-

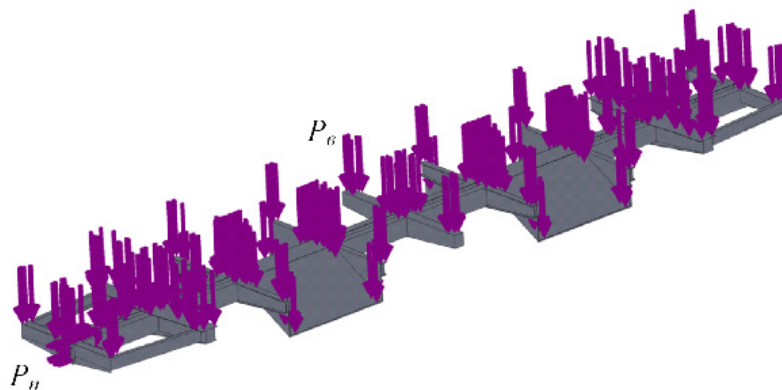


Рис. 4. Розрахункова схема вагона-хопера

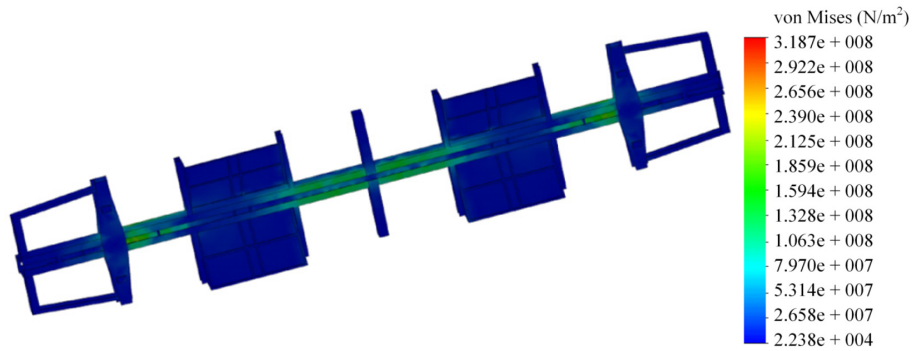


Рис. 5. Напружений стан рами вагона-хопера двохсекційного

рукції, що дорівнюють 345 МПа [13]. Результати розрахунків наведено на рис. 5.

Максимальні напруження при цьому зафіксовані в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою та склали 318,2 МПа, тобто не перевищують напруження плинності матеріалу та є нижчими за них на 7,8% [13].

Результати розрахунків оптимальних моментів опору перерізу хребтової балки наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Визначення оптимальних параметрів хребтової балки вагона-хопера

Елемент рами	Запас міцності	$\sigma_{екв}$ МПа	I_x , см ⁴	I_y , см ⁴	W_x см ³	W_y см ³	$[W_x]$ см ³	$[W_y]$ см ³
Балка хребтова	1,1	318,7	27696	808	1231	101	1070,4	87,8

З урахуванням даних, наведених у табл. 1 обрано прямокутний переріз хребтової балки з відповідними параметрами [14] (рис. 6).

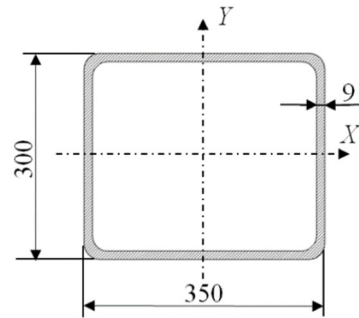


Рис. 6. Параметри профілю виконання хребтової балки

Запропоноване рішення дозволяє зменшити масу хребтової балки у порівнянні з типовим виконанням на 2,3 %.

Просторова модель удосконаленої конструкції рами вагона-хопера наведена на рис. 7.

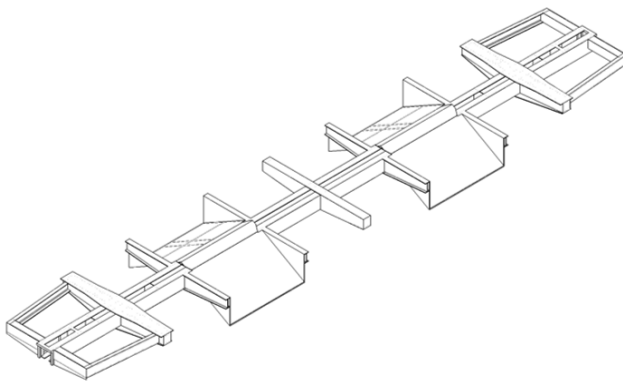


Рис. 7. Рама вагона-хопера двохсекційного

Розрахунок на міцність рами вагона-хопера двохсекційного з замкненою конструкцією хребтової балки

Для обґрунтування запропонованого рішення щодо використання замкнутого профілю хребтової балки проведено розрахунок на міцність рами вагона-хопера. Розрахункова схема ідентична до тієї, що наведена на рис. 4.

При складанні скінчено-елементної моделі кількість вузлів сітки складала 14380, а елементів – 41502. Максимальний розмір

елементу дорівнює 200 мм, мінімальний – 40 мм. Кількість елементів в колі дорівнює 9. Співвідношення збільшення розміру елемента склало 1,7.

Результати розрахунків наведено на рис. 8, 9.

Результати проведених розрахунків показують, що максимальні напруження в удосконаленій конструкції рами вагона-хопера складають 341,5 МПа та не перевищують допустимих значень [13].

З рис. 10 видно, що максимальні напруження зосереджені в консольних частинах хребтової балки. В її середній частині максимальні напруження склали близько 270 МПа. Розрахунок проведений і стосовно інших експлуатаційних режимів [13]. Встановлено, що міцність рами вагона-хопера при цьому забезпечується.

Висновки

1. Проведено оптимізацію хребтової балки рами вагона-хопера двохсекційного методом оптимізації за резервами міцності. Запропоновано використання хребтової балки замкненої конструкції. З урахуванням запропонованого рішення стає можливим зменшити масу хребтової балки у порівнянні з типовою конструкцією на 2,3 %.

2. Проведено розрахунок на міцність рами вагона-хопера двохсекційного з замкненою конструкцією хребтової балки. Максимальні напруження в удосконаленій конструкції рами вагона-хопера склали 341,5 МПа та не перевищують допустимих значень і зосереджені в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації вагонів-хоперів, а також створенню напрацювань щодо проектування їх перспективних конструкцій.

References

- [1] Yu.V. Keбал *et al.*, “Udoskonalennya konstrukciyi vagona-hopera dlya perevezennya zerna”, *Zbirnik naukovih prac DETUT. Seriya “Transportni sistemi i tehnologiyi”*, Vol. 30. pp. 113–122. 2017.
- [2] I.N. Serpik *et al.*, “Evolucionnoe modelirovanie v proektirovanii nesushih sistem vagonov”, *Vestnik VNIIZhT*, No. 5. pp. 21–25. 2008.

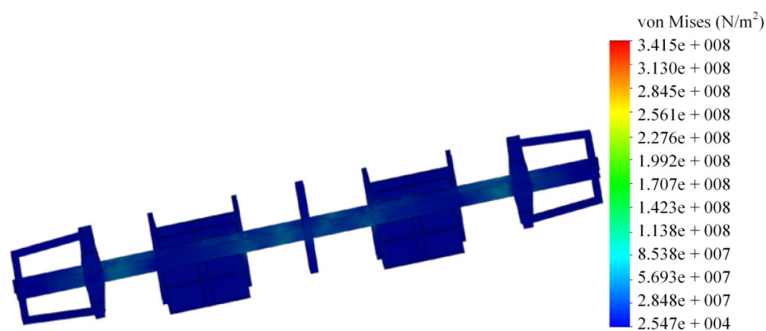


Рис. 8. Напружений стан рами вагона-хопера двохсекційного

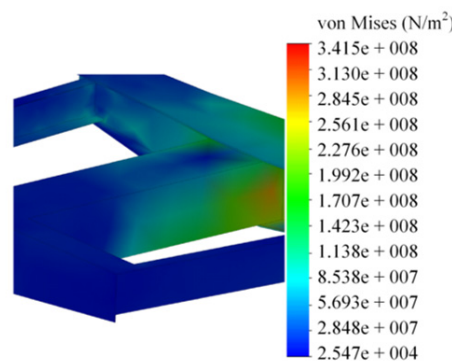


Рис. 9. Зона концентрації найбільших напружень в рамі вагона-хопера двохсекційного

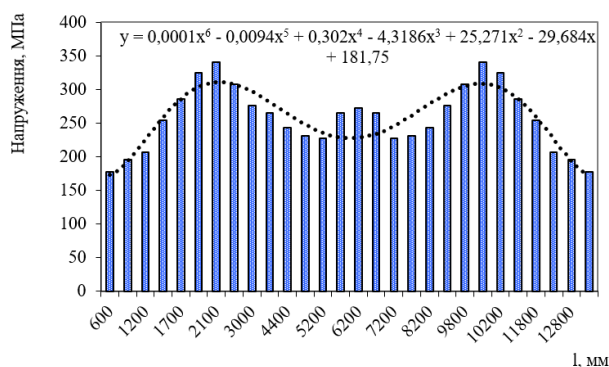


Рис. 10. Розподілення максимальних напружень за довжиною хребтової балки

- [3] D. G. Bejn, “Analiz napryazhennogo sostoyaniya nesushhego nastila pola chetyrehosnogo poluvagona s gluhim kuzovom”, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*, No. 1 (29). pp. 47–51. 2011.
- [4] Tomasz Kuczek and Bartosz Szachniewicz, “Topology Optimization of Railcar Composite Structure”, *Inderscience Enterprises Ltd.*, January. 2014. DOI: 10.1504/IJHVS.2015.073206
- [5] Hyun-Ah Lee *et al.*, “Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels”, *Journal of Rail and rapid transit*, No. 11. 2016.
- [6] M. Mrzyglod and T. Kuczek, “Uniform crashworthiness optimization of car body for high-speed trains”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 49. pp. 327–336. 2014. DOI: 10.1007/s00158-013-0972-z
- [7] Alyona Lovska *et al.*, “Calculation of loads on carrying structures of articulated circular-tube wagons equipped with new draft gear concepts”, *Applied Sciences*, Vol. 10(21). 7441. 2020. DOI:10.3390/app10217441
- [8] O. Fomin *et al.*, “Substantiating the optimization of the loadbearing structure of a hopper car for transporting pellets and hot agglomerate”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 1/7 (103). pp. 65–74. 2020. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.193408
- [9] O.V. Fomin and A.O. Lovska, “Doslidzhennya docilnosti zastosuvannya kruglih trub v yakosti elementiv nesuchih sistem zaliznichnih vagoniv-platform”, *Visnik Shidnoukrayinskogo nacionalnogo universitetu imeni V. Dalya*, No. 1(218). pp. 38–13. 2015.
- [10] G. Vatulia *et al.*, “Regression equations for circular CFST columns carrying capacity evaluation”, *MATEC Web of Conferences*, Vol. 107. 00051. 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201710700051
- [11] G. Vatulia *et al.*, “Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results”, *MATEC Web of Conferences*, Vol. 230. 02037. 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201823002037
- [12] Alyona Lovska *et al.*, “Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry”, *Applied Sciences*, Vol. 10(16). 5710. 2020. DOI:10.3390/app10165710
- [13] DSTU 7598:2014, Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv koliyi 1520 mm (nesamohidnih). Kyiv, 2015.
- [14] GOST R54157-2010. Truby stalnye profilnye dlya metallokonstrukcij. Tehnicheskie usloviya. Moscow: IPK Izdatelstvo standartov, 2010.

Analysis of the strength of the frame of a two-section hopper car with a closed center beam design

O. Fomin, A. Lovska

Background. Ensuring the profitability of rail transportation and maintaining their leadership positions necessitates the commissioning of promising rolling stock designs. Such rolling stock should not only have improved technical and economic indicators, but also ensure the minimization of empty runs. Therefore, the creation of promising designs of rolling stock, designed for the simultaneous transportation of different types of cargo, is a very topical issue.

Objective. Illumination of the results of determining the strength of the frame of a two-section hopper car with a closed center beam design under the main operating modes of loading.

Methods. In order to reduce the material consumption of the frame of the hopper car, the optimization method for safety reserves was used. For this purpose, the strength of a typical frame of a hopper car was calculated using the finite element method implemented in the SolidWorks Simulation software package. To reduce the material consumption of the hopper car frame, it is proposed to use a rectangular profile for the center sill.

Results. The use of a rectangular profile for the center beam of the hopper car frame is substantiated. At the same time, it becomes possible to reduce its weight by 2.3% compared to the standard version. The results of calculations for the strength of the hopper car frame showed that the maximum stresses in it are 341.5 MPa and do not exceed the permissible values.

Conclusions. The conducted research will contribute to the creation of developments in the design of advanced rolling stock structures, as well as to increase the efficiency of railway transport operation.

Keywords: transport mechanics; hopper car; basic structure; frame optimization; loading of the structure; strength.