

А.О. Сулим

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: (05366) 6-03-54, E-mail: sulim1.ua@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

В.В. Ільчишин

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: (05366) 6-13-50, E-mail: vavail@ukr.net
ORCID <https://orcid.org/0009-0002-7307-8071>

П.О. Хозя

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +38 (050) 441-03-42, E-mail: pavlo.khozia@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8948-6032>

С.О. Столетов

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +38 (067) 367-40-43, E-mail: stoletoff.s.a@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8819-2534>

О.О. Мельник

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька 33, м. Кременчук, Полтавської обл., 39621, Україна
Телефон: +38 (098) 418-14-38, E-mail: om.oleksandrmelnyk@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8964-4790>

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ З ХРЕБТОВОЮ БАЛКОЮ ЗВАРНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

У зв'язку з гострим дефіцитом прокатного зетового профілю підвищеного класу міцності в країні внаслідок збройної агресії російської федерації у вітчизняних підприємств виникла необхідність виготовлення вантажних вагонів зі зварними хребтовими балками.

У цій статті розглянуто актуальне питання щодо дослідження міцності вантажних вагонів з хребтовими балками зварної конструкції. Наведено моделі вантажних вагонів зі зварними хребтовими балками, що піддавались науково-експериментальним дослідженням з оцінки міцності. Виконано комплекс науково-експериментальних досліджень міцності вантажних вагонів з хребтовими

© Сулим А.О., Ільчишин В.В., Хозя П.О., Столетов С.О., Мельник О.О., 2023

балками зварної конструкції, що включали проведення статичних міцносних випробувань, випробувань скидання з клинів та на співудар нормативними силами. За результатами проведених видів випробувань отримано експериментально-розрахункове значення коефіцієнту запасу опору втомі в елементах конструкції вантажних вагонів зі зварними хребтовими балками. Визначено найбільш напружені місця в металоконструкціях вантажних вагонів зі зварними хребтовими балками. Підтверджено строки експлуатації досліджуваних вантажних вагонів зі зварними хребтовими балками, що встановлені підприємствами-виробниками, на підставі отриманих значень коефіцієнту запасу опору втомі в елементах конструкції цих вагонів.

Встановлено, що міцносні якості вантажних вагонів зі зварними хребтовими балками задовольняють чинним нормативним вимогам. За результатами проведених комплексних науково-експериментальних досліджень рекомендовано проводити огляд стану конструкцій та зварних швів хребтових балок під час кожного виду планового ремонту вантажних вагонів.

Ключові слова: вантажний вагон, випробування, зварна конструкція, коефіцієнт запасу опору втомі, міцність, строк експлуатації, хребтова балка.

Вступ та постановка проблеми. Внаслідок збройної агресії російської федерації у вітчизняних вагонобудівних підприємств виник гострий дефіцит прокатаного металу та зетового профілю підвищеного класу міцності через знищення єдиного потужного виробника такої продукції в Україні - ПРАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ». За таких умов вітчизняними вагонобудівними підприємствами в якості альтернативного варіанту запропоновано застосування на вантажних вагонах хребтових балок зварної конструкції з листового прокату замість зетового профілю. При цьому актуальним постало питання дослідження міцності конструкції вантажних вагонів із зварними хребтовими балками та підтвердження строку служби цих вагонів.

Аналіз останніх досліджень. У попередніх роботах [1–12] виконувались дослідження з удосконалення несучих конструкцій і їх окремих комплектуючих, а також оцінки міцносних якостей вантажних вагонів.

Так, у роботі [1] розглянуто особливості удосконалення конструкції вагона-хопера для перевезення зерна. Можливість оптимізації елементів кузова вагона проведено за аналізом найбільш характерних вузлів і конструктивних ознак спеціалізованих бункерних вагонів для перевезення сипучих вантажів. Тобто враховано досвід експлуатації окремих складових кузова з подальшою інтеграцією у нову конструкцію.

Оптимізація конструкції опорного пристрою вагона-цистерни для перевезення наливних вантажів проводиться в роботі [2].

У публікації [3] проведено визначення показників міцності несучої конструкції вагона-хопера для перевезення окатишів та гарячого агломерату. З метою зменшення матеріалоемності кузова вагона запропоновано використання у якості несучих елементів труб круглого перерізу. Запропоновані технічні рішення обґрунтують використання круглих труб у якості несучих елементів кузова вагона-хопера для перевезення окатишів та гарячого агломерату на підставі проведених досліджень.

У статті [4] запропоновано заходи щодо удосконалення несучої конструкції вагона-хопера для перевезення окатишів та гарячого агломерату. Дане удосконалення полягає у виготовленні хребтової балки з двох прямокутних труб, замкненого пере-

різу, а горбиля та обв'язування верхнього – з композитного термостійкого матеріалу. Запропоноване удосконалення сприяє зменшенню тари несучої конструкції вагона-хопера на 2,7 % у порівнянні з типовою конструкцією.

У роботі [5] розглянуто існуючі конструктивні рішення довгобазних вагонів-платформ, проаналізовано результати експериментальних досліджень міцносних характеристик цих довгобазних платформ та запропоновано можливі варіанти підсилення несучих конструкцій довгобазних вагонів-платформ.

У публікації [6] визначено втомну міцність довгобазного вагона-платформи за допомогою експериментальних досліджень шляхом проведення вібраційних випробувань на втому. Доведено необхідність оцінки точності теоретичних розрахунків проведенням експериментального обґрунтування конструктивних рішень рами довгобазного вагона-платформи шляхом проведення вібраційних випробувань на втому.

У роботі [7] розглянуто питання щодо міцності основних несучих елементів конструкції довгобазних вагонів-платформ, застосування спеціальних методів теоретичного та експериментального характеру. Виконано розрахунок елементів рами на втому з використанням обчислювального комплексу, що реалізує метод скінчених елементів.

У праці [8] досліджено міцносні характеристики довгобазного вагона-платформи. Проведено експериментальні дослідження втомної міцності довгобазного вагона-платформи до та після удосконалення його несучої конструкції.

У матеріалах статті [9] проведено визначення навантаженості несучої конструкції напіввагона при розвантаженні грейферним ковшем. Для забезпечення міцності верхнього обв'язування несучої конструкції напіввагона під час ударної взаємодії з грейферним ковшем запропоновано впровадження в нього пружно-в'язкого матеріалу, зокрема еластомеру.

У роботі [10] досліджено показники міцності несучих конструкцій спеціального рухомого складу – вагонів-думпкарів. Проведено аналіз несправностей, контрольні випробування дослідження міцності вагонів-думпкарів розрахунковим та експериментальним шляхом. Виявлено місця виникнення втомних дефектів у хребтовій балці та слабкі зони у несучих конструкціях вагонів думпкарів, що потребують підсилення. Запропоновано впровадження у хребтову балку вагонів-думпкарів підсилюючої накладки.

У публікації [11] запропоновано підсилити міцносні якості напіввагона за рахунок використання у його несучій конструкції хребтової балки з пружно-в'язким наповнювачем.

У роботі [12] проведено аналіз результатів теоретичних та експериментальних досліджень міцносних якостей хребтових балок вантажних вагонів.

При цьому у жодній з вищенаведених робіт не проведено експериментальних досліджень міцносних якостей вантажних вагонів зі зварними хребтовими балками. Це пов'язано з тим, що до цього часу хребтові балки зварної конструкції не застосовувались на вантажних вагонах та виникла необхідність їх впровадження вперше. Тому, для підтвердження безпечності експлуатації та перевірки міцності конструкції вантажних вагонів зі зварними хребтовими балками виникла необхідність проведення науково-експериментальних досліджень.

Мета статті – провести науково-експериментальні дослідження вантажних вагонів зі зварними хребтовими балками для оцінки їх міцносних якостей та строку експлуатації.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Матеріал та результати досліджень. Державним підприємством «Український науково-дослідний інститут вагонобудування» (ДП «УкрНДІВ») на замовлення ТОВ «Дослідно-механічний завод «Карпати», ТОВ «ПОЛТАВВАГОН», ТОВ «Полтавський тепловозоремонтний завод», ТОВ «Жмеринський вагоноремонтний завод «Експрес» (ТОВ «ЖВРЗ «Експрес») виконано комплекс науково-експериментальних досліджень з оцінювання міцності та ресурсу металоконструкції для дев'яти вантажних вагонів із зварними хребтовими балками. Моделі вантажних вагонів, що піддавались науково-експериментальним дослідженням, зображено на рис. 1. Науково-експериментальні дослідження включали в себе проведення статичних випробувань на міцність від дії вертикальних, квазістатичних навантажень та навантажень, що виникають під час ремонту і обслуговування вагона, а також випробування на співудар.



Рис. 1. Досліджувані вантажні вагони зі зварними хребтовими балками:
а – модель 15-1755П виробництва ТОВ «ПОЛТАВВАГОН»; б, в – моделі 12-8520 та 19-8530 виробництва ТОВ «Полтавський тепловозоремонтний завод»; г – модель 12-6708 ТОВ «ЖВРЗ «Експрес»; д, е, ж, з – моделі 12-9745, 19-9951, 19-6869, 19-8530, 12-8520 виробництва ТОВ «Дослідно-механічний завод «Карпати»

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

За результатами проведення комплексу науково-експериментальних досліджень зазначених моделей вантажних вагонів зі зварними хребтовими балками встановлено таке:

а) максимальні сумарні напруження в основних елементах конструкції від навантажень, які виникають під час ремонту та обслуговуванні вагонів:

– в режимі підйомки порожніх кузовів під кінці балки шворневої по діагоналі вагонів зафіксовані в балці шворневій, в підкосі та в балці хребтовій в зоні шворневої балки і становлять від 20,0 МПа до 87,7 МПа, що складає в межах (7–30) % від допустимої величини;

– в режимі підйомки завантажених кузовів під один кінець балки шворневої зафіксовані в балці шворневій, в об'язці верхній, в балці хребтовій в зоні шворневої балки та в балці хребтовій в середній частині вагона і становлять від 43,3 МПа до 184,9 МПа, що складає в межах (15–63) % від допустимої величини;

– в режимі підйомки завантажених кузовів під два кінці шворневої балки зафіксовані в балці шворневій, в підкосі та в балці хребтовій в середній частині вагона і становлять від 29,8 МПа до 142,7 МПа, що складає в межах (10–46) % від допустимої величини;

б) максимальні сумарні напруження в основних елементах конструкцій вагонів від квазістатичних навантажень:

– за I розрахунковим режимом зафіксовані в середній частині вагона балки хребтової в зоні розташування кронштейна кріплення гальмівного циліндра, в балці шворневій зі сторони консольної частини вагона, в поясі горизонтальному, в балці шворневій, в балці шворневій в зоні з'єднання з хребтовою балкою, в балці хребтовій на нижньому листі в зоні заднього упору та в балці хребтовій на нижньому листі в зоні з'єднання з шворневою балкою і становлять від 96,5 МПа до 298,1 МПа, що складає в межах (33–97) % від допустимої величини;

– за III розрахунковим режимом зафіксовані в середній частині балки хребтової в зоні розташування ребра жорсткості, в балці шворневій зі сторони консольної частини, в об'язці нижній, в балці шворневій, в балці шворневій в зоні з'єднання з хребтовою балкою, в балці хребтовій на верхньому листі в зоні зварного шва, в балці хребтовій на нижньому листі в зоні заднього упору та в балці хребтовій на нижньому листі в зоні з'єднання з балкою шворневою і становлять від 53,9 МПа до 194,4 МПа, що складає в межах (28–99) % від допустимої величини;

в) максимальні сумарні напруження під час випробувань нормативними силами на співудар зафіксовані в середній частині вагона балки хребтової в зоні розташування кронштейна кріплення гальмівного циліндра, в балці шворневій зі сторони консольної частини, в поясі горизонтальному, в балці шворневій, в балці шворневій в зоні з'єднання з хребтовою балкою, в балці хребтовій на нижньому листі в зоні заднього упору та в балці хребтовій на нижньому листі в зоні з'єднання з балкою шворневою і становлять від 137,0 МПа до 336,0 МПа, що складає в межах (42–97) % від допустимої величини;

Отримані експериментально-розрахунковим шляхом значення коефіцієнтів запасу опору втомі в елементах конструкції вантажних вагонів з хребтовими балками зварної конструкції за результатами проведення квазістатичних випробувань, випробувань на співудар та випробувань від дії вертикальних навантажень під час скидання з клинів знаходяться на рівні розрахункових та задовольняють вимоги чинної нормативної документації.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Висновки.

1. Максимальні сумарні напруження в основних елементах конструкцій вантажних вагонів зі зварними хребтовими балками від навантажень, які виникають під час ремонту та обслуговуванні вагонів, не перевищують 184,9 МПа, що дорівнює 63 % від допустимої величини. Тобто існує запас з міцності конструкції на рівні 37 % відносно нормативної величини. При цьому найбільш напруженими елементами конструкції вантажних вагонів є шворнева балка, балка хребтова, підкіс, верхня об'язка, а інші елементи конструкції є менш напруженими.

2. Максимальні сумарні напруження в основних елементах конструкцій вантажних вагонів зі зварними хребтовими балками від квазістатичних навантажень за I та III розрахунковими режимами становлять 298,1 МПа та 194,4 МПа відповідно, що дорівнює 97 % та 99 % від допустимої величини. При цьому найбільш напруженими елементами конструкції вантажних вагонів із зварними хребтовими балками є балка шворнева, балка хребтова, пояс горизонтальний, нижня об'язка.

3. Максимальні сумарні напруження під час випробувань нормативними силами на співудар не перевищують 336 МПа, що дорівнює 97 % від допустимої величини. При цьому найбільш напруженими елементами конструкції вантажних вагонів із зварними хребтовими балками є балка шворнева, балка хребтова, пояс горизонтальний.

4. Рекомендовано під час кожного виду планового ремонту вантажних вагонів із зварними хребтовими балками проводити огляд стану їх несучих конструкцій та зварних швів хребтових балок.

5. Отримані експериментально-розрахунковим шляхом значення коефіцієнтів запасу опору втомі в елементах конструкції вантажних вагонів з хребтовими балками зварної конструкції підтвердили заявлені строки служби досліджуваних вагонів.

6. Результати виконаних комплексних науково-експериментальних досліджень підтвердили можливість використання на вантажних вагонах хребтових балок зварної конструкції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кебал Ю.В., Шатов В.А., Тьокотев О.М., Мурашова Н.Г. Удосконалення конструкції вагона-хопера для перевезення зерна. Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2017. Вип. 30. С. 113–122.
2. Vatulia G., Falendysh A., Orel Y., Pavliuchenkov M. Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages. *Procedia Engineering*. 2017. 187. P. 301–307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.379>
3. Fomin O., Lovska A., Skliarenko I., Klochkov Yu. Substantiating the optimization of the load-bearing structure of a hopper car for transporting pellets and hot agglomerate. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 1/7 (103). P. 65–74. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193408>
4. Фомін О.В., Ловська А.О., Сова С.С., Литвиненко А.С. Визначення навантаженості несучої конструкції вагона-хопера з двотрубною хребтовою балкою та композитними складовими. Наукові вісті Далівського університету. 2022. Вип. 23. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2022-23-15>
5. Сулим А.О., Третяк Е.В., Хозя П.О. Основні типи конструкцій довгобазних вагонів-платформ та дослідження їх міцносних характеристик. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2020. Вип. 20. С. 27–33.
6. Сулим А.О., Орлов О.В. Дослідження міцності довгобазного вагона-платформи шляхом проведення вібраційних випробувань. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2022. Вип. 40. С. 139–148. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-12>

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

7. Кельріх М.Б., Федосов-Ніконов Д.В. Дослідження на міцність конструкції довгобазної платформи. Вісник Східноукраїнського Національного університету імені Володимира Даля. 2016. № 1 (225). С. 90–94.

8. Fedosov-Nikonov D.V., Sulym A.O., Ilchshyn V.V., Safronov O.M., Kelrikh M.B. Study of strength characteristics of the long wheelbase flat cars. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 985. 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012029>

9. Фомін О.В., Ловська А.О., Павлюченков М.В. Дослідження навантаженості несучої конструкції напіввагона при взаємодії з грейферним ковшем. Вісник Східноукраїнського Національного університету імені Володимира Даля. 2021. № 4 (268). С. 94–99. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-94-99>

10. Koshel O., Sapronova S., Kara S. Revealing patterns in the stressed-strained state of load-bearing structures in special rolling stock to further improve them. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. 4/7 (124). P. 30–42. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285894>

11. Ловська А.О., Фомін О.В., Рибін А.В. Дослідження динамічної навантаженості несучої конструкції піввагона з пружно-в'язким наповнювачем у хребтовій балці. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2021. № 3 (93). С. 59 – 66. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/242038>

12. Недужа Л.О., Швець А.О. Теоретичні та експериментальні дослідження міцнісних якостей хребтової балки вантажного вагона. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2018. № 1 (73). С. 131 – 147.

A.O. Sulym

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,

33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

Tel.: (05366) 6-03-54, E-mail: sulim1.ua@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

V.V. Ilchshyn

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,

33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

Tel.: (05366) 6-13-50, E-mail: vavail@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7307-8071>

P.O. Khozia

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,

33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

Tel.: (05366) 6-20-43, E-mail: pavlo.khozia@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8948-6032>

S.O. Stoliyetov

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,

33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

Tel.: +38 (067) 367-40-43, E-mail: stoletoff.s.a@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8819-2534>

O.O. Melnyk

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,

33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

Tel.: (05366) 6-20-43, E-mail: om.oleksandrmelnyk@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8964-4790>

RESEARCH OF THE STRENGTH OF WAGONS WITH A WELDED CENTER SILL

Due to the severe shortage of rolled zeta profile of increased strength class in the country as a result of the armed aggression of the Russian Federation, domestic enterprises were forced to manufacture freight cars with welded center sills.

This article deals with the topical issue of researching the strength of freight cars with welded center sills. The models of freight cars with welded center sills that were subjected to scientific and experimental studies to assess strength are given. A comprehensive scientific and experimental studies of the strength of freight cars with center sills was carried out beams of a welded structure, which included execution of static strength tests, wedge tests within the tolerance range. Based on the results of the carried out tests types, the experimental and calculated value of the coefficient of fatigue safety factor in the structural elements of freight cars with welded center sills was obtained. The most stressed places in the metal structures of freight cars with welded have been determined. The service life of the researched freight cars with welded center sills installed by the manufacturing companies was confirmed based on the obtained values of fatigue safety factor in the structural elements of these cars.

It has been established that the strength qualities of freight cars with welded center sills comply with the current regulatory requirements. Based on the results of comprehensive scientific and experimental studies, it is recommended to inspect the condition of structures and welds of center sills as part of each type of scheduled repair of freight cars.

Key words: freight car, test, welded structure, fatigue safety factor, strength, service lifetime, center sill.

REFERENCES

1. Keбал Yu.V., Shatov V.A., Tokotiev O.M., & Murashova N.H. (2017). Udoskonalennia konstruktsii vahona-khopera dlia perevezennia zerna [Improvement of the design of the hopper car for the transportation of grain]. *Zbirnyk naukovykh prats DETUT. Seriiia «Transportni systemy i tekhnolohii» - Collection of scientific papers DETUT. «Transport systems and technologies» series, 30, 113–122* [in Ukrainian]
2. Vatulia G., Falendysh A., Orel Y., & Pavliuchenkov M. (2017). Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages. *Procedia Engineering, 187, 301–307*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.379>
3. Fomin O., Lovska A., Skliarenko I., & Klochkov Yu. (2020). Substantiating the optimization of the load-bearing structure of a hopper car for transporting pellets and hot agglomerate. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 1/7 (103), 65–74*. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193408>
4. Fomin O.V., Lovska A.O., Sova S.S., & Lytvynenko A.S. (2022). Vyznachennia navantazhenosti nesuchoi konstruktsii vahona-khopera z dvotrubnoi khrebtovoi balkoiu ta kompozytnymy skladovymy [Determination of the load bearing structure of a hopper car with a two-tubs center sill and composite components]. *Naukovi visti Dalivskoho universytetu - Scientific news of Daliv University, 23*. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2022-23-15> [in Ukrainian]
5. Sulym A.O., Tretiak E.B., & Khozia P.O. (2020). Osnovni typy konstruktsii dovhobaznykh vahoniv-platform ta doslidzhennia yikh mitsnosnykh kharakterystyk [The main types of structures of long-base flat wagons and the study of their strength characteristics]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovyi rukhomiy sklad» - Collection of scientific works «Railbound Rolling Stock», 20, 27–33* [in Ukrainian]
6. Sulym A.O., & Orlov O.V. (2022). Doslidzhennia mitsnosti dovhobaznoho vahona-platformy shliakhom provedennia vibratsiinykh vyprobuvan [Study of the strength of a long-base flat cars through vibration tests]. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriiia «Transportni systemy i tekhnolohii» - Collection of sci-*

entific papers DUIT. «Transport systems and technologies» series, 40, 139–148. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-12> [in Ukrainian]

7. Kelrikh M.B., & Fedosov-Nikonov D.V. (2016). Doslidzhennia na mitsnist konstrukttsii dovhobaznoi platformy [Research on the strength of the long-base flat car structure]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho Natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia - Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl*, 1 (225), 90–94 [in Ukrainian]

8. Fedosov-Nikonov D.V., Sulym A.O., Ilchshyn V.V., Safronov O.M., & Kelrikh M.B. (2020). Study of strength characteristics of the long wheelbase flat cars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 985. 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012029>

9. Fomin O.V., Lovska A.O., & Pavliuchenkov M.V. (2021). Doslidzhennia navantazhenosti nesuchoi konstrukttsii napivvahona pry vzaiemodii z hreifernym kovshem [Study of the loading of the supporting structure of an open-top car when interacting with a grab bucket]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho Natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dal - Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl*, 4 (268), 94–99. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-94-99> [in Ukrainian]

10. Koshel O., Sapronova S., & Kara S. (2023). Revealing patterns in the stressed-strained state of load-bearing structures in special rolling stock to further improve them. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/7 (124), 30–42. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285894>

11. Lovska A.O., Fomin O.V., & Rybin A.V. (2021). Doslidzhennia dynamichnoi navantazhenosti nesuchoi konstrukttsii pivvahona z pruzhno-viazkym napovniuvachem u khrebtovii baltsi [Study of the dynamic loading of the bearing structure of an open-top car with an elastic-viscous filler in the center sill]. *Science and progress of transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport - Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, 3 (93), 59 – 66. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/242038> [in Ukrainian]

12. Neduzha L.O., & Shvets A.O. (2018). Teoretychni ta eksperymentalni doslidzhennia mitsnosnykh yakosteï khrebtovoi balky vantazhnoho vahona. [Theoretical and experimental studies of the strength qualities of the center sill of a freight car]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transport - Science and progress of transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 1 (73), 131-147 [in Ukrainian].