

***І. Е. Мартинов***

Український державний університет залізничного транспорту  
пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна  
Телефон: +38 (057) 730-10-36, E-mail: martinov.hiit@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>

***А. В. Труфанова***

Український державний університет залізничного транспорту  
пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна  
Телефон: +38 (057) 730-10-35, E-mail: trufanova@kart.edu.ua  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>

***В. О. Шовкун***

Український державний університет залізничного транспорту  
пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна  
Телефон: +38 (067) 399 6881, E-mail: vadimshovkun62@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>

***С. І. Мартинов***

Український державний університет залізничного транспорту  
пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна  
Телефон: +38 (050) 303 9850, E-mail: st.mrtnv@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-7802>

***Я. В. Остапенко***

Український державний університет залізничного транспорту  
пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна  
Телефон: +38 (057) 730 1035, E-mail: ziarzi@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4341-0831>

**МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ  
КУЗОВА ЖОРСТКО-КУПЕЙНОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ВАГОНА**

*В статті розглянуті питання аналізу напружено-деформованого стану кузовів жорстко-купейних пасажирських вагонів АТ «Укрзалізниця». Надійність та міцність пасажирських вагонів залежать від ряду факторів, серед яких можна зазначити особливості конструкції, властивості використаних матеріалів, ефективність технологічних процесів виробництва, рівень технічного обслуговування в експлуатації, якість ремонту тощо.*

*Парк пасажирських вагонів в основному складають моделі, що були розроблені та виготовлені у 70-90 роки минулого століття. Ресурс цих вагонів практично вичерпаний, вони застаріли як морально, так і фізично.*

© Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Шовкун В. О., Мартинов С. І., Остапенко Я. В. © 2023

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

---

*Дослідження, які проводились фахівцями різних промислових підприємств і наукових організацій, були спрямовані на розробку та удосконалення методів визначення залишкового ресурсу металоконструкцій для забезпечення можливості подовження терміну служби пасажирських вагонів.*

*Останнім часом питання щодо розрахунку кузовів та інших частин вагонів вирішувалися за допомогою програмних технологій, в більшості яких основою є метод скінчених елементів. В основі цього методу лежить дискретизація простору, формування рівнянь, збір та збіг й оцінка точності.*

*Врахування фізичних властивостей матеріалів, граничних умов, а також взаємодії між різними частинами вагона є ключовими аспектами при застосуванні методу скінчених елементів. Тому аналіз напружено-деформованого стану кузова з урахуванням фактичних зносів в експлуатації дасть можливість скоротити витрати матеріалу на ремонт несучого кузова у сенсі розподілу силових потоків зношення.*

*Врахування фактичного зносу кузова пасажирського вагона дозволяє визначити реальний стан та прогнозувати його подальшу експлуатацію. Це сприяє не лише зниженню витрат на ремонт, але й підвищенню безпеки надійності вагону. Можливість раціонального розподілу силових потоків зношення дозволяє здійснювати якісне та своєчасне обслуговування та ремонт, що впливає на загальну продуктивність та технічний стан парку вагонів.*

*Ключові слова:* купейний вагон, рама, кузов, шворнева балка, напруження, деформації, скінчені елементи.

**Вступ.** Інтеграція України до європейської спільноти ставить різноманітні завдання перед суспільством. Першочерговим завданням, вирішення якого дозволить спростити інтеграцію залізниць України до залізниць Європейського Союзу, є оновлення пасажирського рухомого складу залізниць України.

Основу парку пасажирських вагонів АТ «Укрзалізниця», складають вагони, успадковані Україною ще від колишнього СРСР. Кількісний дефіцит пасажирських вагонів посилюється незадовільним технічним станом існуючого парку. Рівень зношеності у переважній більшості вагонів перевищує 90%. Старіння вагонів продовжується швидкими темпами та не компенсується надходженнями нових вагонів. Тим більше, що виробник фактично один – це ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод», який має обмежені виробничі потужності. Навіть при наростанні обсягів виробництва вагонів щорічний дефіцит покриватися може за рахунок проведення капітально-відновлювального ремонту вагонів та обґрунтованого продовження їх терміну служби. При виведенні вагонів у ремонт їх фізичне спрацювання неоднакове, що призводить до подачі в ремонт вагонів, як з недовикористаним ресурсом, так і з підвищеним ступенем спрацювання. І якщо в першому випадку витрати на ремонт можуть необґрунтовано завищуватися, то в другому випадку навіть при додаткових витратах важко гарантувати безпеку експлуатації таких вагонів.

**Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми.** Питання дослідження міцності та надійності кузовів пасажирських вагонів висвітлені у багатьох публікаціях як в нашій країні, так і за кордоном. Вагомий внесок зроблений фахівцями ДП «УкрНДІВ», дослідження яких [1] присвячені визначенню залишкового ресурсу несучих конструкцій пасажирських вагонів, що вже

відпрацювали свій ресурс. Для прогнозування залишкової здатності кузовів пасажирських вагонів у статті [2] запропонована методика прогнозування та управління відновленням їх ресурсу. В її основу покладена модель швидкісних корозійних пошкоджень для різних ділянок кузова, що дозволяє виконувати імітацію технічного стану вагона в будь-який момент часу. З використанням методу скінчених елементів це дає можливість оцінити залишкову несучу здатність. Фахівцями Дніпровського національного університету залізничного транспорту (ДНУЗТ) виконано науково-технічне обґрунтування продовження терміну служби пасажирських вагонів після проведення капітально-відновлювального ремонту (далі – КВР) [3].

У роботах [4, 5] розглядаються питання технічного стану вузлів пасажирських вагонів за різними роками побудови та наведені результати аналізу величини зносів та пошкоджень вагонів в експлуатації.

В статті [6] запропоновано методику зниження ваги кузова пасажирського вагона. Авторами з використанням методу скінчених елементів розроблено математичну модель, виконані розрахунки міцності кузова вагона 61-779.

Дослідження [7] присвячено аналізу залишкового ресурсу пасажирських вагонів відкритого та купейного типів. З урахуванням факторів, що впливають на безпеку руху, автори обґрунтовують необхідність продовження терміну їх подальшої експлуатації.

Результати науково-експериментальних досліджень характеристик безпеки та комфорту пасажирського вагона, переобладнаного з купейного вагона побудови заводу Амендорф при проведенні КВР викладені у статті [8]. Стверджується, що термін продовження експлуатації вагона після КВР, в залежності від вимог нормативної документації, по яким він буде виконуватися, та вагоноремонтного підприємства-виконавця КВР, може складати від 14-ти років до 23-х років.

Автори публікації [9] пропонують прогнозування техніки безпеки пасажирського залізничного рухомого складу. Методика заснована на методі математичного моделювання з використанням відомих промислових програмних систем.

У роботах [10, 11] виконана оцінка аварійності та надані пропозиції щодо модифікації залізничного пасажирського вагона. Автори, використовуючи метод скінчених елементів, виконали моделювання зіткнення пасажирського вагону з жорсткою стінкою. На першому етапі аналізу було визначено структурні слабкості вихідної конструкції. На наступному етапі автори запропонували модифіковану конструкцію пасажирського вагона. В результаті була отримана конструкція вагона з кращими аварійними властивостями, за які навколо зіткнення виникають пластичні деформації.

Результати використання методу скінчених елементів для моделювання теплообмінних процесів у вагонів наведені у статті [12].

Підсумовуючи результати наведеного вище аналізу можна відзначити, що дослідження впливу величини зносу (корозійного чи фізичного) на міцність несучих конструкцій кузова пасажирського вагону досліджено не в повному обсязі. Величини гранично допустимих спрацювань аналітично не визначені.

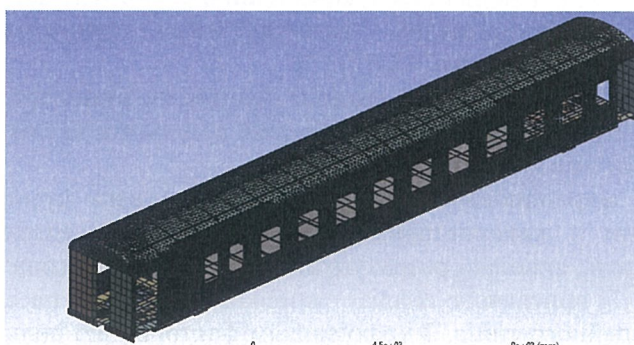
**Мета дослідження.** Метою роботи є моделювання напружено-деформованого стану жорстко-купейного вагона виробництва Німеччини без хребтової балки у середній частині.

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

---

**Матеріали та методи дослідження.** Авторами була побудована 3D модель жорстко-купейного вагона моделі 47-Д виробництва Німеччини.

Розрахунки кузова на міцність виконувались за допомогою методу скінчених елементів з використанням програмного комплексу ANSYS відповідно до вимог ДСТУ 7774 [13]. Кузов розглядався як система стрижневих та пластинчастих скінчених елементів. Розрахункова схема наведена на рис. 1.



*Рис. 1. Розрахункова схема кузова пасажирського вагона моделі 47-Д*

Як стрижні розглядалися стояки та верхня обв'язка бічних стін, дуги даху та ін. Рама кузова, нижня обв'язка, обшивка бічних стін, торцеві стіни, обшива даху та настил підлоги моделювалися за допомогою пластинчастих скінчених елементів.

Стрижневі скінчені елементи працюють на розтяг (стиснення), вигин, кручення і зсув. Плоскі скінчені елементи працюють на вигин (як пластини) і на розтяг (стиснення) під дією сил, лінії дії яких лежать у серединній площині.

Всього розрахункова схема містить 1659958 вузлів і 722470 скінчених елементів.

Нормативний документ [13] передбачає необхідність розрахунків за трьома розрахунковими режимами:

- I розрахунковий режим відповідає рушанню з місця, екстремому гальмуванню при малих швидкостях руху, зіткненню під час маневрової роботи тощо;
- II розрахунковий режим – рух поїзда на розрахунковому підйомі (для пасажирських вагонів при включенні їх до складу вантажних поїздів);
- III розрахунковий режим – рух з конструкційною швидкістю та регульовальним гальмуванням.

Кожному з цих розрахункових режимів відповідає комбінація навантажень, які додаються до кузова вагона. Можна виділити три групи: подовжні, вертикальні та бічні навантаження. Нижче наведено опис кожної групи.

Поздовжні навантаження – це поздовжня розтягуюча або стискаюча сила, що прикладається до передніх або задніх косинців відповідно. При розрахунку за I режимом прикладається стискаюча сила 2,5 МН, II режим авторами не розглядається, при розрахунку за III режимом окремо оцінюється міцність кузова як при дії сили, що розтягує 1 МН, так і при дії стискаючої сили такої ж величини (розглядається випадок дії сили, що розтягує).

Групу вертикальних навантажень утворює сила тяжкості кузова вагона, сила тяжіння внутрішнього обладнання, екіпірування та пасажирів з багажем. У цю групу, крім перерахованих вище статичних навантажень, входять також додаткові динамі-



## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

чні складові, викликані прискоренням кузова у вертикальному напрямку під час руху вагона.

Сила тяжкості  $Q$ , що діє на кузов вагона, дорівнює різниці ваги бруто вагона і ваги візків. При розрахунках кузов вагона спочатку був навантажений силою тяжіння, що діє на металоконструкцію кузова, та силами тяжкості великих одиниць обладнання. Сила, що дорівнює різниці між  $Q$  і вагою металоконструкції та обладнання, була прикладена рівномірно розподілене навантаження, яке діє на підлогу вагона (рис. 2).

У якості опор приймалися п'ятникові вузли (рис. 3).

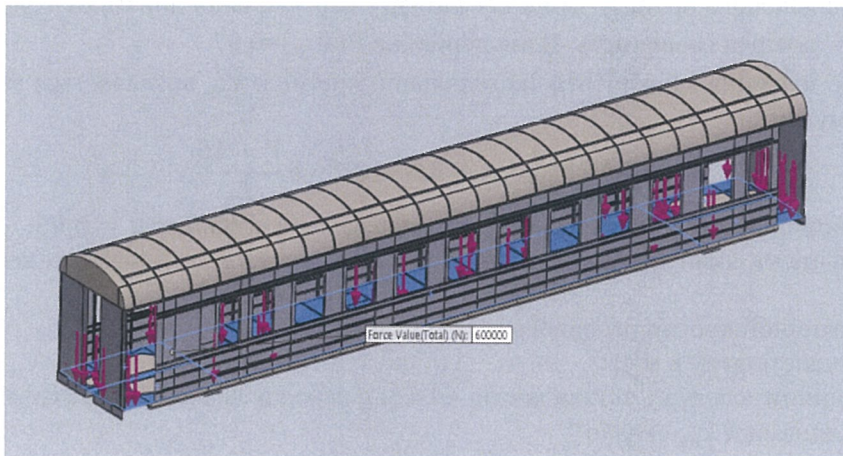


Рис. 2. Схема прикладання вертикального навантаження на кузов пасажирського вагона

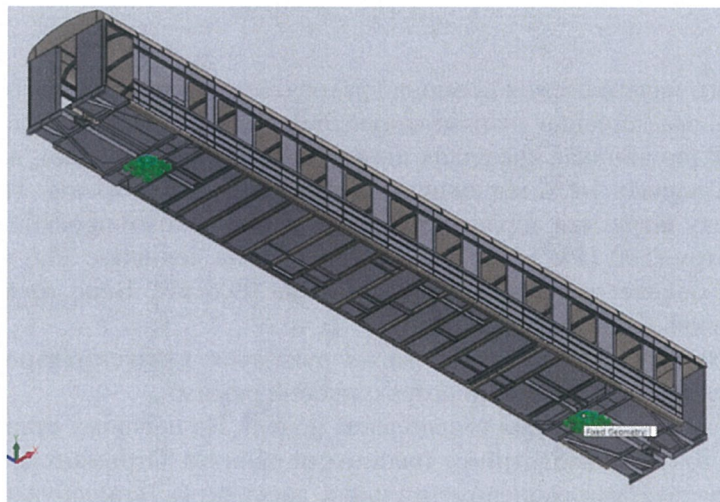


Рис. 3. Схема обпирання кузова пасажирського вагона

При розрахунку за I режимом враховується лише вертикальне статичне навантаження. При розрахунку за III режимом враховується також динамічна складова

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

шляхом множення статичного навантаження на множник  $1 + k_{дв}$ , де  $k_{дв}$  – розрахункове значення коефіцієнта вертикальної динаміки для кузова вагону.

Величина  $k_{дв}$  розраховується за формулою

$$k_{дв} = \bar{k}_{дв} \sqrt{\frac{4}{\pi} \ln \frac{1}{1 - P(k_{дв})}}, \quad (1)$$

де  $\bar{k}_{дв}$  – середнє значення коефіцієнту вертикальної динаміки (математичне очікування випадкового процесу зміни коефіцієнту вертикальної динаміки  $k_{дв}(t)$ );

$P(k_{дв})$  – довірна імовірність. Вона дорівнює  $P(k_{дв})=0,97$ .

Середнє значення коефіцієнта вертикальної динаміки  $\bar{k}_{дв}$  визначається за наступною формулою

$$\bar{k}_{дв} = a + 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot b \frac{V - 15}{f_{ст}}, \quad (2)$$

де  $a$  – емпіричний коефіцієнт, який для кузовів вагонів дорівнює  $a = 0,05$ ;

$b$  – коефіцієнт, який залежить від кількості осей у візку (для двовісних візків  $b$  дорівнює 1);

$f_{ст}$  – статичний прогин ресорного підвішування ( $f_{ст} = 0,15$  в);

$V$  – швидкість руху в м/с.

Таким чином для руху зі швидкістю 44,4 м/с середнє значення коефіцієнту вертикальної динаміки  $\bar{k}_{дв}$  склало

$$\bar{k}_{дв} = 0,05 + 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \frac{44,4 - 15}{0,15} = 0,121$$

$$k_{дв} = 0,121 \sqrt{\frac{4}{3,14} \ln \frac{1}{1 - 0,97}} = 0,25.$$

Дія бокового навантаження повинна враховуватися лише при розрахунках по III режиму. Сила, яка дорівнює різниці відцентрової сили та горизонтальної складової сили тяжкості, що виникає внаслідок піднесення зовнішньої рейки, для пасажирських вагонів становить 10 % від сили тяжіння бруто, тобто 61 кН. Також враховується сила тиску вітру, яка дорівнює множині площі бокової проекції кузова на питомий тиск вітру ( $500 \text{ Н/м}^2$ ), яка для даного вагона дорівнює 38,6 кН. Таким чином, сумарне бокове навантаження складатиме 99,6 кН. Воно прикладається до верхньої та нижньої обв'язки бічних стін.

При розрахунках вважалось, що вагон рухається з максимальною швидкістю 160 км/год і застосовується третій розрахунковий режим.

Була проведена верифікація розробленої моделі. На першому етапі виконувався розрахунок кузова зі стандартними товщинами обшиви. Отримані результати порівнювали з результатами експериментальних досліджень (випробуваннями на міцність). Схожість результатів підтвердила правильність створеної моделі.

Аналіз напружено-деформованого стану при різних варіантах модернізації показав, що кузов пасажирського вагона має достатній запас міцності. Напруження, які



## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

виникають у найбільш навантажених місцях, не перевищують допустимих значень для конструкційних сталей, що застосовуються (рис. 4).

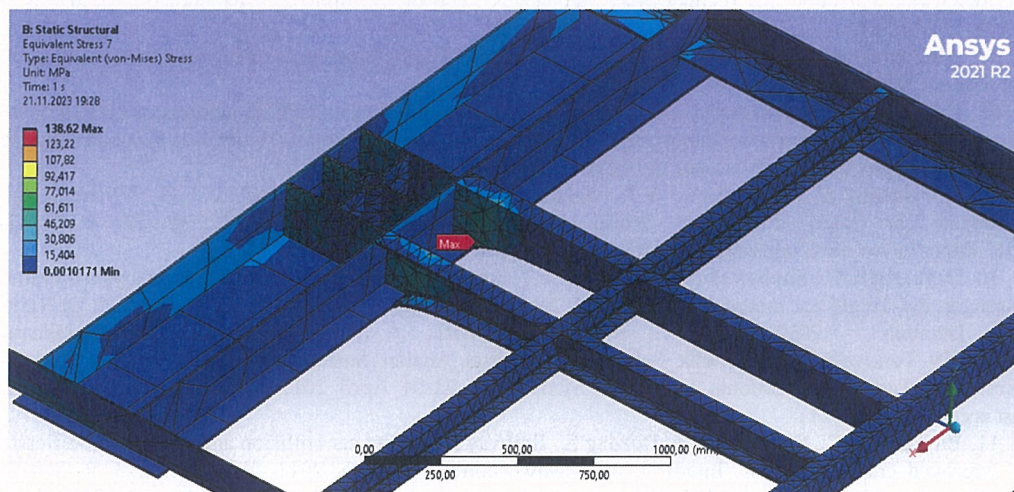


Рис. 4. Результати розрахунків з використанням програмного комплексу ANSYS

### Висновки:

1 Побудована скінчено-елементна модель кузова жорстко-купейного вагона моделі 47-Д. Для моделювання використовувалися стрижневі та пластинчасті скінчені елементи.

2 Проведено дослідження напружено-деформованого стану кузова при номінальних розмірах зі стандартними товщинами обшивки. Встановлено, що напруження, які виникають у найбільш навантажених місцях, не перевищують допустимих значень для використовуваних конструкційних сталей.

3 Отримана модель кузова у подальшому дасть можливість визначати граничні величини зносів несучих конструкцій рами і кузова та обчислювати розрахунково-імовірнісним методом з урахуванням імовірнісного характеру всіх діючих навантажень показники надійності вагона та його залишковий ресурс.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Трубачов Ю.О., Головка В.Ф., Борзилов І. Д. Визначення залишкового ресурсу несучих конструкцій пасажирського вагонів, що відпрацювали свій ресурс. Зб. наук. праць УкрДАЗТ. 2001. Вип. 46. С. 34-36.
2. Пигунов А. В. Прогнозирование остаточной несущей способности кузовов пассажирских вагонов и управление восстановлением их ресурса. Вестник Белорусского государственного университета транспорта. Наука и транспорт. 2002. № 1. С 12-17.
3. Пуларія А.Л., Лобойко Л.М., Грічаній М.А. Визначення міцносних якостей кузова пасажирського вагона після КВР. Збірник наукових праць ДонІЗТ. 2008. Вип. 13. С. 107-111.
4. Мартинов І.Е., Труфанова А.В., Петухов В.М., Сергієнко М.О. Дослідження залежностей спрацювання несучих елементів пасажирських вагонів. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». Київ: ДУІТ. 2018. вип. 36. С.72-81.
5. Мартинов І.Е., Труфанова А.В., Павленко Ю. С. Сергієнко М. О. Аналіз технічного стану кузо-

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

---

вів пасажирських вагонів. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Транспортне машинобудування. Х. НТУ «ХПІ», 2018. № 45 (1321). С. 41-46.

6. Мямлин С. В., Ягода П. А., Дедаева Т. А., Шкабров О. А. Снижение веса металлоконструкции пассажирских вагонов для скоростных перевозок. Наука та прогрес транспорту. 2006. № 13. С. 118-120

7. Шикунів О. А., Рейдемейстер О. Г., Анофрієв В. Г. Дослідження граничного стану пасажирських вагонів. Вагонний парк. 2012. № 12. С. 4-6.

8. Ежов Ю.В., Павленко Ю.С., Войтенко О.І., Речкалов В.С. Капітально-відновлювальний ремонт пасажирських вагонів локомотивної тяги як засіб забезпечення залізниць рейковим рухомим складом. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2018. Вип. 17. С. 51-61.

9. Kobishanov V.V., Lozbinev V.P., Sakalo V.I., Antipin D.Y., Shorohov S.G., Vysocky A.M., Passenger Car Safety Prediction. World Applied Sciences Journal, 2013, № 24, С. 208–212. URL: [https://www.idosi.org/wasj/wasj24\(1\)2013.htm](https://www.idosi.org/wasj/wasj24(1)2013.htm) (last access: 25.05.2021).

10. Baykasoglu C., Sunbuloglu E., Bozdag S. E., Numerical static and dynamic stress analysis on railway passenger and freight car models. Intern. Iron & Steel Symposium (02.04–04.04.2012), Karabük University. – Istanbul, 2012, P. 579–586. URL [https://www.researchgate.net/publication/328676559\\_Turkiye'de\\_Demir\\_Celik\\_Sektoru'nun\\_Yapisal\\_Analizi\\_Structural\\_Analysis\\_Of\\_Iron\\_And\\_Steel\\_Sector\\_In\\_Turkey\\_International\\_Iron\\_Steel\\_Symposium\\_02-04\\_April\\_2012\\_Karabuk\\_Turkiye\\_1261-1267](https://www.researchgate.net/publication/328676559_Turkiye'de_Demir_Celik_Sektoru'nun_Yapisal_Analizi_Structural_Analysis_Of_Iron_And_Steel_Sector_In_Turkey_International_Iron_Steel_Symposium_02-04_April_2012_Karabuk_Turkiye_1261-1267) (last access: 25.05.2021).

11. Baykasoglu C., Sunbuloglu E., Bozdag E., Railway passenger car collision analysis and modifications for improved crashworthiness. Intern. J. of Crashworthiness. London, 2011, Vol. 16. Iss. 3. P. 319–329. doi: 10.1080/13588265.2011.566475, URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13588265.2011.566475> (last access: 25.05.2021).

12. Назаренко К. В. Применение метода конечных элементов для моделирования теплообменных процессов в пассажирских вагонах. Вагонный парк. 2010. № 9. С. 31-33.

13. ДСТУ 7774:2015. Вагони пасажирські магістральні локомотивної тяги. Загальнотехнічні норми для розрахунку та проектування механічної частини вагонів. Чинний від 2016-04-01. К.: Мінекономіки України. 2017. 189 с.

### ***I. E. Martynov***

Ukrainian State University of Railway Transport  
Feiirbakha Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine  
tel:+38 (057) 730-10-36, E-mail: [martynov.hiit@gmail.com](mailto:martynov.hiit@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>

### ***A. V. Trufanova***

Ukrainian State University of Railway Transport  
Feiirbakha Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine  
tel: +38 (057) 730-10-35, E-mail: [trufanova@kart.edu.ua](mailto:trufanova@kart.edu.ua)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>

### ***V. O. Shovkun***

Ukrainian State University of Railway Transport  
Feiirbakha Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine  
tel: +38 (067) 399 6881, E-mail: [vadimshovkun62@gmail.com](mailto:vadimshovkun62@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>

### ***S. I. Martynov***

Ukrainian State University of Railway Transport  
Feiirbakha Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine  
tel: +380 50 303 9850, E-mail: [st.mrtvn@gmail.com](mailto:st.mrtvn@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-7802>

### ***Y. V. Ostapenko***



Ukrainian State University of Railway Transport  
Feiirbakha Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine  
tel: +38 (057) 730 1035, E-mail: ziarzi@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4341-0831>

## THE STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE RIGID-COMPARMENT PASSENGER CAR BODY

*The article deals with the analysis of the stress-strain state of rigid-compartment passenger cars body of JSC Ukrzaliznytsia. Reliability and strength of passenger cars depend on a number of factors, among which one can note the features of the design, the properties of the materials used, the efficiency of the manufacturing processes, the level of technical maintenance in operation, the quality of repairs, etc.*

*The fleet of passenger cars mainly consists of models that were designed and manufactured in the 70s and 90s of the last century. The resource of these cars is almost exhausted; they are obsolete both morally and physically.*

*Research conducted by specialists of various industrial enterprises and scientific organizations was aimed at developing and improving methods for determining the ultimate resource of metal structures to ensure the possibility of extending the service life of passenger cars.*

*Recently, questions regarding the calculation of bodies and other parts of cars have been solved with the help of software technologies, most of which are based on the finite element method. The basis of this method is the discretization of space, the formation of equations, the collection and matching, and the assessment of accuracy.*

*Consideration of the physical properties of materials, boundary conditions, and interactions between different parts of the car are key aspects when applying the finite element method. Therefore, taking into account the actual wear and tear in operation, the analysis of the stress-strain state of the body will make it possible to reduce the material costs for the repair of the load-bearing body in the sense of the distribution of wear and tear force flows.*

*Taking into account the actual wear and tear of the body of the passenger car allows you to determine the real condition and forecast its further operation. It helps not only to reduce repair costs, but also to increase the safety and reliability of the wagon. The ability to rationally distribute wear and tear power flows allows for high-quality and timely maintenance and repair, which affects the overall productivity and technical condition of the railcar fleet. The article deals with the analysis of the stress-strain state of rigid-compartment passenger cars body of JSC Ukrzaliznytsia. Reliability and strength of passenger cars depend on a number of factors, among which one can note the features of the design, the properties of the materials used, the efficiency of the manufacturing processes, the level of technical maintenance in operation, the quality of repairs, etc.*

*The fleet of passenger cars mainly consists of models that were designed and manufactured in the 70s and 90s of the last century. The resource of these cars is almost exhausted; they are obsolete both morally and physically.*

*Research conducted by specialists of various industrial enterprises and scientific organizations was aimed at developing and improving methods for determining the ultimate resource of metal structures to ensure the possibility of extending the service life of passenger cars.*

*Recently, questions regarding the calculation of bodies and other parts of cars have been solved with the help of software technologies, most of which are based on the finite element method. The basis of this method is the discretization of space, the formation of equations, the collection and matching, and the assessment of accuracy.*

*Consideration of the physical properties of materials, boundary conditions, and interactions between different parts of the car are key aspects when applying the finite element method. Therefore, taking into account the actual wear and tear in operation, the analysis of the stress-strain state of the body will make it possible to reduce the material costs for the repair of the load-bearing body in the sense of the distribution of wear and tear force flows.*

*Taking into account the actual wear and tear of the body of the passenger car allows you to determine the real condition and forecast its further operation. It helps not only to reduce repair costs, but also to increase the safety and reliability of the wagon. The ability to rationally distribute wear and tear power flows allows for high-quality and timely maintenance and repair, which affects the overall productivity and technical condition of the railcar fleet.*

*Key words: passenger car, frame, body, pivot beam, stress, strain, finite elements.*

### REFERENCES

1. Trubachov, Yu. O., Golovko, V. F., & Borzilov, I. D. (2001) Vyznachennya zalyshkovoho resursu nesuchykh konstruktivnykh pasazhyrskoho vahoniv, shcho vidpratsyuvaly sviy resurs [Determination of the residual life-time of the load-bearing structures of passenger cars with expired service life-time]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrayinskoj derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu – Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport*, 46, 34-36 [in Ukrainian].
2. Pygunov, A. V. (2002) Prognozirovaniye ostatochnoy nesushchey sposobnosti kuzovov passazhirskikh vagonov i upravleniye vosstanovleniyem ikh resursa [Forecasting the residual load-bearing capacity of passenger car bodies and managing the restoration of their service life]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta «Nauka i transport» – Bulletin of the Belarusian State University of Transport «Science and Transport»*. 1, 12-17 [in Russian].
3. Pullaria, A. L., Loboiko, L. M., & Grichany, M. A. (2008) Vyznachennia mitsnosnykh yakostey kuzova pasazhyrskoho vahona pislia KVR [Determination of strength qualities of the body of a passenger car after KVR]. *Zbirnyk naukovykh prats Donetskoho instytutu zaliznychnoho transportu – Collection of scientific works of Donetsk Institute of Railway Transport*, 13, 107-111 [in Ukrainian].
4. Martynov, I. E., Trufanova, A. V., Petukhov, V. M., & Sergiienko, M. O. (2019). Doslidzhennia zalezhnosti spratsiuvannia nesuchykh elementiv pasazhyrskykh vahoniv [Study of the dependences of the operation of load-bearing elements of passenger cars]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohiy Ministerstva osvity i nauky Ukrainy: Seriya «Transportni systemy i tekhnolohiyi – Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine: Series «Transport Systems and Technologies»*, 36, 72-81 [in Ukrainian].
5. Martynov, I. E., Trufanova A. V., Pavlenko Yu. S., Sergiienko M. O. (2018) Analiz tekhnichnoho stanu kuzoviv pasazhyrskykh vahoniv [Analysis of the technical condition of the bodies of passenger cars]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KHPI". Seriya: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh. Transportne mashynobuduvannia – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. Transport engineering*, 45 (1321), 41-46 [in Ukrainian].
6. Miamlin, S. V., Yahoda P. A., Dedaieva, T. A., Shkabrov O. (2006). Snizheniie vesa metallokonstruktsii passazhirskikh vagonov dlya skorostnykh perevozok. [Reducing the weight of metal structures of passenger cars for high-speed transportation]. *Nauka ta prohres transportu – Science and*

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

---

*progress in transpor*, 13, 118-120 [in Ukrainian].

7. Shykunov, O. A., Reydemeyster O. H., & Anofriiev V. H. (2012). Doslidzhennia hranychnoho stanu pasazhyrskykh vahoniv [Research of the limit state of passenger cars]. *Vahonnyy park – Car park*, 12, 4-6 [in Ukrainian].

8. Yezhov, Y. V., Pavlenko, Yu. S., Voytenko, O. I., & Rechkalov, V. S. (2018) Kapitalno-vidnovliuvalniyi remont pasazhyrskykh vahoniv lokomotyvnoi tiahyy yak zasib zabezpechennia zaliznyts reikovym rukhomym skladom [Overhaul of locomotive traction passenger cars as a means of providing railways with rolling stock]. *Zbirnyk naukovykh prats "Reikovy rukhomyi sklad" - Collection of scientific works "Railbound Rolling Stock"*, 17, 51-61 [in Ukrainian].

9. Kobishanov V. V., Lozbinev V.P., Sakalo V.I., Antipin D.Y., Shorohov S.G., & Vysocky A.M. (2013). *Passenger Car Safety Prediction. World Applied Sciences Journal*, 24, 208–212. URL: [https://www.idosi.org/wasj/wasj24\(1\)2013.htm](https://www.idosi.org/wasj/wasj24(1)2013.htm) (last access: 25.05.2021).

10. Baykasoglu C., Sunbuloglu E., & Bozdog S. E. (2012). Numerical static and dynamic stress analysis on railway passenger and freight car models. *Intern. Iron & Steel Symposium* (02.04–04.04.2012), pp. 579–586 Karabük University. Istanbul. URL: [https://www.researchgate.net/publication/328676559\\_Turkiye'de\\_Demir\\_Celik\\_Sektoru'nun\\_Yapisal\\_Analizi\\_Structural\\_Analysis\\_Of\\_Iron\\_And\\_Steel\\_Sector\\_In\\_Turkey\\_International\\_Iron\\_Steel\\_Symposium\\_02-04\\_April\\_2012\\_Karabuk\\_Turkiye\\_1261-1267](https://www.researchgate.net/publication/328676559_Turkiye'de_Demir_Celik_Sektoru'nun_Yapisal_Analizi_Structural_Analysis_Of_Iron_And_Steel_Sector_In_Turkey_International_Iron_Steel_Symposium_02-04_April_2012_Karabuk_Turkiye_1261-1267) (last access: May 25, 2021).

11. Baykasoglu C., Sunbuloglu E., & Bozdog E. (2011). Railway passenger car collision analysis and modifications for improved crashworthiness. *Intern. J. of Crashworthiness*. (Vol. 16). Iss. 3. (pp. 319–329). London, , doi: 10.1080/13588265.2011.566475, URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13588265.2011.566475> (last access: May 25, 2021).

12. Nazarenko, K. V. (2010) Primeneniye metoda konechnykh elementov dlya modelirovaniya teploobmennykh protsessov v passazhirskikh vagonakh [Application of the finite element method for modeling heat exchange processes in passenger cars]. *Vahonnyy park - Car park*, 9, 31-33 [in Russian].

13. Vahony pasazhyrski mahistralni lokomotyvnoi tiahyy. Zahalnotekhnichni normy dlia rozrakhuvannia ta proektuvannia mekhanichnoi chastyny vahoniv. [Main line passenger cars of locomotive traction. General technical standards for calculating and designing the mechanical part of wagons]. (2017). *DSTU 7774:2015 from the 1-st of April 2016*. Kyiv: Minekonomrosvytku Ukrainy [in Ukrainian].