

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463.65:539.3-047.37

І. Е. МАРТИНОВ^{1*}, А. В. ТРУФАНОВА^{2*}, В. О. ШОВКУН^{3*}, М. В. ДМИТРЕНКО^{4*}

^{1*}Каф. «Інженерії вагонів та якості продукції», Український державний університет залізничного транспорту, май. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (050) 300 31 60, ел. пошта martinov.hiit@gmail.com, ORCID 0000-0002-0481-3514

^{2*}Каф. «Інженерії вагонів та якості продукції», Український державний університет залізничного транспорту, май. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (050) 300 31 60, ел. пошта trufanova@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-1702-1054

^{3*}Каф. «Інженерії вагонів та якості продукції», Український державний університет залізничного транспорту, май. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (067) 399 68 81, ел. пошта vadimshovkun62@gmail.com, ORCID 0000-0003-1826-6053

^{4*}Каф. «Інженерії вагонів та якості продукції», Український державний університет залізничного транспорту, май. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта lemtr21@gmail.com, ORCID 0009-0000-2712-2495

Дослідження напружено-деформованого стану елементів кріплення кришок люків універсальних напіввагонів

Мета. Дослідження міцності приварних елементів кріплення кришки люка універсального напіввагона. Елементи кріплення запірних пристроїв кришок люків кріпляться до кузова за допомогою заклепок. Ця технологія є досить витратною. Аналіз світового досвіду свідчить про можливість заміни заклепкових з'єднань зварними за умови забезпечення необхідної міцності конструкції. **Методика.** Кришки люків універсальних напіввагонів всіх моделей вважаються підлогою напіввагона. Вони призначені для нижнього розвантаження сипучих вантажів, а також сприймають переважну більшість вертикальних навантажень. Для дослідження напруженого стану приварних елементів кріплення кришок люків напіввагона (скоби запірного елемента та петлі розвантажувального люка) в програмному комплексі ANSYS розроблена тривимірна модель кузова універсального напіввагона. При побудові геометричної моделі кузова були враховані основні особливості конструкції, характер передачі навантаження на приварні елементи кріплення кришок люків. Розрахункова схема напіввагону імітує конструкцію кузова та складається з двох бокових стін, двох торцевих стін, підлоги. Модель закріплювалась у вузлах кріплення п'ятників кузова та навантажувалась вертикальними зусиллями. Оскільки кузов вагону вісесиметричний і навантаження, що прикладаються, також симетричні, то для зменшення трудомісткості розрахунків розглядалася четверта частина моделі. **Результати.** Виконавши розрахунок на міцність модернізованої конструкції кузова напіввагона встановлено, що удосконалена конструкція елементів кріплення та запирання люка напіввагона за показниками міцності відповідає вимогам діючих нормативних документів. Максимальні напруження, що виникають під дією навантаження, перебувають у межах 55–82 МПа. Максимальні напруження, що виникають у елементах конструкції скоб запирання люків під навантаженням, не перевищують 27 МПа, що відповідає вимогам нормативних документів. **Наукова новизна.** Вперше було проведено дослідження напружено-деформованого стану модернізованих приварних елементів кріплення кришок люків універсальних напіввагонів. **Практична значимість.** Отримані результати дають науково-технічне обґрунтування можливості проведення модернізації конструктивних елементів кузовів універсальних напіввагонів. На підставі проведеного аналізу міцності приварних елементів кріплення розвантажувальних кришок люків напіввагонів встановлено, що удосконалені елементи задовольняють вимогам діючих нормативних документів. Впровадження удосконаленої технології кріплення кришок люків дозволить зменшити собівартість виготовлення напіввагонів без втрати надійності рухомого складу в експлуатації.

Ключові слова: напіввагон універсальний; кузов; кришка люка; запірний пристрій; запірна скоба; піджимаюча скоба; напруження

Вступ

Залізниця є основною складовою транспортної системи України. Однією з основних переваг залізничного транспорту є його здатність перевозити великі обсяги вантажів на далекі відстані. Залізничні колії та вагони здатні витримувати значні навантаження, що робить залізничний транспорт ідеальним для перевезення важких та великогабаритних вантажів, таких як вугілля, руда, нафтопродукти та будівельні матеріали. Саме тому перевезення продукції металургійної та машинобудівної галузей в основному здійснюється саме залізничним транспортом. Аналогічна тенденція характерна і для військових перевезень.

Переважає більшість парку вантажних вагонів АТ «Укрзалізниця» складається з універсальних вагонів: критих, напіввагонів, платформ та цистерн. Використовуються також і спеціалізовані вагони: для перевезення зерна, мінеральних добрив, цементу, контейнерів та ін.

Особлива роль належить універсальним напіввагонам (НПВ), тому що саме вони здійснюють масові перевезення вугілля, щебню, лісоматеріалів, будівельних матеріалів та інших вантажів, що не потребують захисту від атмосферних опадів. Саме цей тип рухомого складу найбільш інтенсивно експлуатується на залізницях, що сприяє виникненню відмов конструктивних елементів та відчепленню НПВ на шляху прямування. Також НПВ дуже часто пошкоджуються під час проведення вантажно-розвантажувальних робіт внаслідок недотримання вимог діючих нормативних документів [6]. Відповідно, це вимагає додаткових витрат на відновлення їх працездатності.

Питання підвищення надійності та ефективності експлуатації універсальних НПВ розглядаються в багатьох дослідженнях як в нашій країні, так і за її межами. Так, у статтях [4, 11] розглянуто та проаналізовано сучасний стан парку вантажних вагонів в Україні. Визначено напрямки оновлення парку вантажних вагонів.

Умовно переважну більшість робіт в цьому напрямку можна поділити на дві великі групи. До першої групи можна віднести дослідження, присвячені попередженню пошкоджень кузовів

НПВ при рейферному розвантаженні та розвантаженні на перекидачах вагонів. Так у статті [3] викладені результати спостереження технічного стану елементів кузовів універсальних НПВ після використання для розвантаження сипких вантажів рейферними ківшами. Проведений статистичний аналіз свідчить, що найбільш небезпечними є місця обпирання проміжних стояків бокової стіни на проміжні поперечні балки рами. Саме там виникає переважна більшість обривів стояків. Крім того при захваті рейфером вантажу пошкоджується обв'язка та обшива кришок розвантажувальних люків, та верхня обв'язка бокових та торцевих стін.

У статті [7] наведено аналіз технічного стану НПВ власності Республіки Казахстан. Наведено результати досліджень показників надійності для кузова напіввагона з подальшим аналізом відмов по вузлах та деталях. Визначено, що найчастіше пошкоджуються саме кришки люків, а максимальне значення напрацювання на відмову складає 6024 год на завершальному етапі експлуатації вагона перед плановим ремонтом.

Результати дослідження [20] обґрунтовують можливість використання легких матеріалів у конструкції вантажних вагонів. Так, кузова напіввагонів з алюмінієвих сплавів дозволяють збільшити їх вантажопідйомність, продовжити термін служби до 30 років завдяки корозійній стійкості.

У статтях [1, 2] розглянуто чинники, що впливають на міцність напіввагонів при розвантаженні на роторних перекидачах вагонів. Автором виконано аналітичне визначення інерційних складових динамічного процесу перекидання.

Питання взаємодії кузова напіввагона зі стінками перекидача напіввагонів при вивантаженні змерзлих вантажів розглядалося у дослідженні [9]. Дослідниками розглянуті основні технічні рішення, спрямовані на руйнування змерзлого сипкого вантажу в залізничних НПВ перед його розвантаженням в зимовий час.

У статті [8] наведено результати аналізу технічного стану універсальних НПВ. Проаналізовано основні причини відмов, що призвели до відчеплення вагона від поїзда на шляху прямування. Серед пошкоджень кузовів НПВ найчастіше спостерігають несправності заборів кри-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

шок розвантажувальних люків, тріщини та злами верхніх і вертикальних листів поперечних балок рами.

Професор Українського державного університету науки і технологій (УДУНТ) Л. А. Мурадян у дослідженні [10] пропонує розглядати процес виникнення відмов та несправностей НРВ (знос, корозія, втома металу, деформації) як результат дії зовнішніх впливів (взаємодія з навантажувально-розвантажувальними пристроями, додаткові навантаження, що виникають під час маневрової роботи як результат недотримання ПТЕ, вплив зовнішнього середовища) тощо. Зазначені процеси призводять до поступової втрати вихідних експлуатаційних характеристик та сприяють переходу вагона з одного стану в інший: від справного до несправного або граничного.

Аналіз статистичних даних за результатами експлуатації НРВ, наведений у статті [12], довів що після 7–8 років експлуатації кожен НРВ для відновлення працездатності 7–10 разів на рік надходить в поточний ремонт. Основною причиною є інтенсивний корозійний знос, викликаний впливом вантажу, що перевозиться, в умовах несприятливого зовнішнього середовища.

В статті [13] представлено особливості та результати конструктивних досліджень кришок люків з реалізацією попереднього напруження та полотна з привареними кутниками.

У статті [18] розглянуті конструктивні особливості кузовів деяких моделей сучасних НРВ. Автори приходять до висновку, що ефективним методом зниження маси тари піввагона та збільшення об'єму кузова є застосування в конструкції алюмінієвих сплавів замість сталі.

У дослідженні [18] стверджується, що кузов вагону, виконаний із застосуванням алюмінієво-магнієвих сплавів дозволить зменшити масу тари на 2 %.

Заходи для модернізації конструкції кузова НРВ з метою збільшення його ефективності при перевезенні перевезення вантажів, висота яких виходить за верхній пояс бічної стінки (завантаження з «шапкою») запропоновано в [20].

У статтях [15, 15] запропоновано нову оптимізовану конструкцію підлоги кузова НРВ.

Проведений скінчено-елементний аналіз показав, що запропонована геометрія перекриття підлоги дозволяє зменшити еквівалентні напруження до 91,6 % та суттєво збільшити коефіцієнт запасу міцності порівняно з традиційними конструкціями.

Питання забезпечення міцності елементів рами та кузова НРВ висвітлені у статті [14]. Після аналізу причин виникнення несправностей авторами запропоновані конструктивні рішення щодо підсилення найбільш навантажених елементів кузова НРВ.

Мета

Кришки люків піввагонів вважаються підлогою НРВ, тому вони є найбільш навантаженими його деталями, а також служать для нижнього розвантаження сипучих вантажів. Елементи кріплення запірних пристроїв кришок люків кріпляться за допомогою заклепок. Ця технологія є досить витратною.

Аналіз світового досвіду свідчить, що за умови забезпечення міцності з'єднання заклепками можна замінити зварним. Метою статті є дослідження міцності приварних елементів кріплення кришки люка універсального напіввагона та аналіз можливостей їх використання в експлуатації.

Методика

Для проведення чисельного аналізу напруженого стану приварних елементів кріплення кришок люків напіввагона (скоби запірного елемента та петлі розвантажувального люка) розроблено тривимірну математичну модель кузова НРВ, реалізовану в програмному комплексі ANSYS.

При побудові геометричної моделі кузова були враховані основні особливості конструкції, характер передачі навантаження на приварні елементи кріплення кришок люків.

Файлом вихідних даних передбачено розміщення інформації про координати вузлів, опис скінчених елементів, що використовуються, геометричні характеристики конструкції, властивості матеріалу конструкції, закріплення і навантаження моделі.

Дослідження міцності виконувалось за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ).

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Суть методу полягає у представленні суцільної конструкції у вигляді дискретної моделі шляхом її поділу на велику кількість малих взаємопов'язаних частин — скінчених елементів. Такий процес поділу називається дискретизацією геометричної форми та фізичних властивостей об'єкта. Кожен скінчений елемент розглядається як окрема підсистема з визначеними характеристиками (особливості геометрії, жорсткість і т. п.). Елементи з'єднуються між собою у вузлових точках, які забезпечують передачу навантажень і переміщень між суміжними елементами, формуючи таким чином єдину скінчено-елементну модель (сітку). У межах цієї моделі задаються граничні умови, зовнішні навантаження та фізико-механічні властивості матеріалу.

Математичний опис задачі зводиться до складання системи алгебраїчних рівнянь, що встановлюють зв'язок між вузловими переміщеннями та відповідними силовими чинниками. У рамках механіки суцільного середовища основними параметрами є переміщення вузлів, на основі яких визначаються деформації та напруження в елементах конструкції. Таким чином, внесок кожного окремого скінченого елемента враховується у загальному розподілі напружень і деформацій, що дозволяє отримати достовірну оцінку міцності та працездатності деталі.

При розрахунку масивних тіл методом скінчених елементів використовуються залежності для тривимірного напруженого стану. Зазначені залежності мають універсальний характер, оскільки не потребують використання спрощувальних гіпотез, характерних для деяких завдань (гіпотези плоских перерізів для стержня, прямих нормалей для пластин, що згинаються, при нульових напруженнях).

Результати

Розрахункова схема НПВ імітує конструкцію кузова та складається з двох бокових стін, двох торцевих стін, підлоги та представлена на рис. 1.

Оскільки кузов вагону та навантаження, що прикладаються, симетричні відносно обох осей, то для зменшення трудомісткості розрахунків

розглядалася четверта частина моделі з навантаженням одного люка (рис. 3).

Модель закріплювалась у вузлах кріплення п'ятників кузова та навантажувалась вертикальними зусиллями. Файлом вихідних даних передбачено розміщення інформації про координати вузлів, опис скінчених елементів, що використовуються, геометричні характеристики конструкції, властивості матеріалу конструкції, закріплення і навантаження моделі.

Для моделювання контактної взаємодії між елементами кузова програмний комплекс ANSYS використовує спеціальні віртуальні контактні елементи. Елемент має ті ж самі геометричні розміри та загальний набір геометричних характеристик, що і пов'язані з ним реальні об'ємні елементи. ANSYS створює два різні типи контактних елементів: один на поверхні, яка має більшу жорсткість. Ці елементи вдавлюються в поверхню, яка має меншу жорсткість.

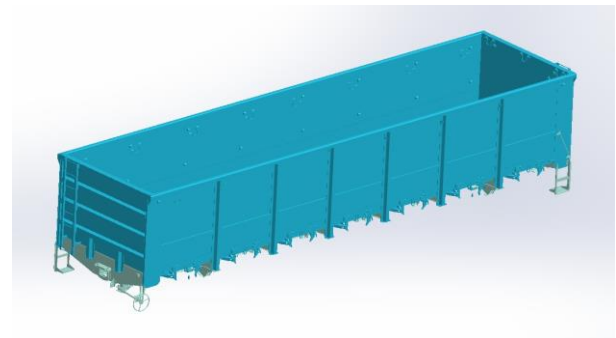


Рис. 1. Геометрична модель кузова напіввагона

Fig. 1. Geometric model of the gondola body

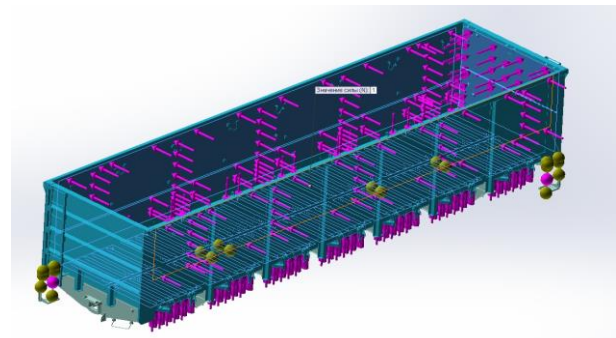


Рис. 2. Розрахункова схема кузова напіввагона

Fig. 2. Calculation diagram of the gondola body

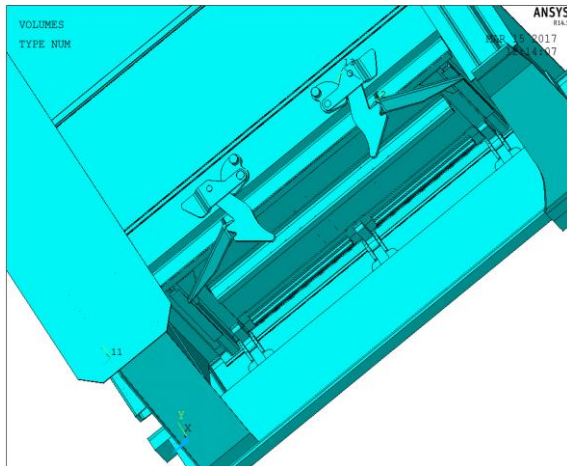
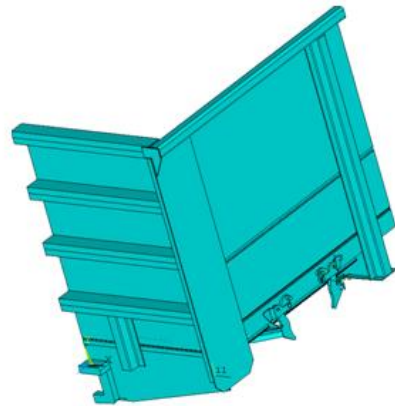
a – a*б – б*

Рис. 3. Частина моделі, що розглядаються:
a – вузол кришки люка (вид знизу); *б* – вузол кришки люка (вид з торця вагону)

Fig. 3. Part of the model under consideration
a – hatch cover assembly (bottom view); *b* – hatch cover assembly (view from the end of the car)

Розроблена скінчено-елементна модель складалася з 257 753 скінченних елементів та 223 0210 вузлів (рис. 4).

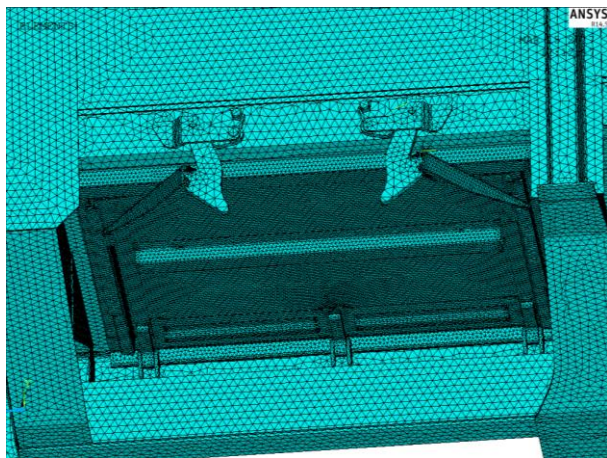


Рис. 4. Скінчено-елемента модель кузова напіввагона

Fig. 4. Finite element model of a gondola body

Навантаження моделі здійснювалося в площинах глобальної системи координат (0XYZ): кузов вагону закріплювався повністю (переміщення по всіх трьох степенях вільності прирівнювалися до 0). Також обмежувалися переміщення люків (уздовж осі Z).

Запропонована модель дозволяє імітувати різні варіанти навантаження з оцінкою напружено-деформованого стану кузова, елементів

петель та елементів запірної системи люка. Створена модель дозволила виконати розрахунків та дослідження напружено-деформованого стану запірних елементів, а саме скоби запірної в місцях кріплення до нижньої обв'язки кузова, петель кріплення люка, а також піджимної скоби.

Під час розрахунку моделі були прийняті такі допущення, що відповідають основним положенням теорії Герца:

– навантаження до контактуючих поверхонь прикладене перпендикулярно площадці контакту;

– вплив технологічних відхилень при складанні елементів ходових кузова а також їх можливе спрацювання в експлуатації не враховується;

– матеріал кузова та елементів працює в пружній стадії деформації і має постійні характеристики – модуль пружності $E = 2,1 \times 10^5$ МПа і коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$.

Для вирішення завдань дослідження тривимірного напруженого стану найбільш часто використовуються скінченні елементи у формі тетраедра й паралелепіпеда, що мають по три ступеня вільності у вузлі, та полілінійну апроксимацію переміщень.

Розрахунок і оцінка міцності елементів запирання та кріплення люків напіввагона здійснювався з урахуванням вертикальних наванта-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

жень що діють на площу розвантажувального люка перпендикулярно його площі в розмірі 62 кН.

В розрахунках використовувались такі вихідні дані:

- статичне навантаження, що діє на підлогу НПВ 827,96 кН;
- динамічне навантаження, що діє на підлогу НПВ 299,9 кН;
- сумарне навантаження на підлогу НПВ 1127,86 кН;
- площа підлоги НПВ 38,19 м²;
- площа розвантажувального люка 2,108 м²;
- навантаження, що діють на одиницю площі підлоги 29,51 кН/м²;
- навантаження, що діють на розвантажувальний люк 62,207 кН.

Максимальні напруження, що виникають у елементах конструкції петель кріплення кришки люка при такій схемі навантаження, перебували в межах 52÷82 МПа. Це задовольняє вимогам нормативного документу [5]. Причому найбільш навантаженою була третя петля (рис. 5).

Напруження, що виникають у елементах конструкції запірних скоб кришок люків, були меншими та коливалися в межах 21÷27 МПа (рис. 6).

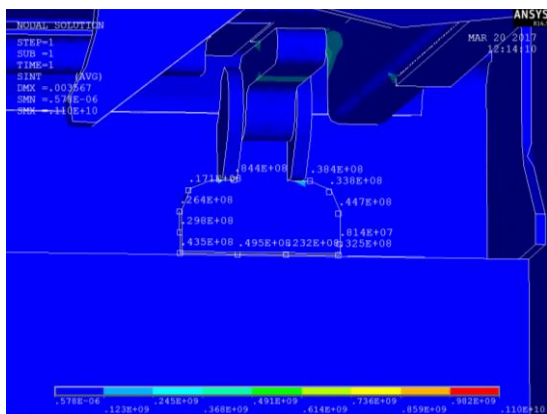


Рис. 5. Максимальні еквівалентні напруження (МПа), що виникають у третій петлі кріплення кришки люка

Fig. 5. Maximum equivalent stresses (MPa) occurring in the third hinge of the hatch cover

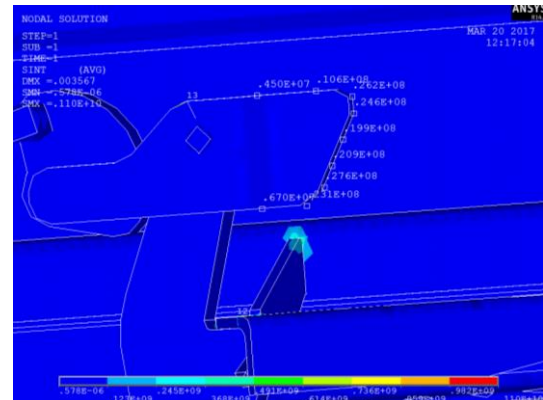


Рис. 6. Максимальні еквівалентні напруження (МПа), що виникають у першій запірній скобі кришки люка

Fig. 6. Maximum equivalent stresses (MPa) occurring in the first locking bracket of the hatch cover

Напруження, що виникають у елементі конструкції піджимної скоби люка при такій схемі навантаження також не перевищують 21 МПа.

Наукова новизна та практична значимість

Уперше розроблено скінчено-елементну модель та виконано оцінку напружено-деформованого стану приварних елементів кріплення кришок розвантажувальних люків універсального напіввагона з урахуванням експлуатаційних навантажень.

Запропоноване конструктивне рішення дозволяє знизити собівартість виготовлення напіввагонів та підвищити експлуатаційну надійність їх кузовів.

Висновки

Порівняно із традиційним заклепковим кріпленням запропоноване зварне з'єднання забезпечує зниження технологічної трудомісткості виготовлення та спрощення конструкції без перевищення допустимих напружень в елементах кріплення.

Створена скінчено-елементна модель універсального напіввагона, обладнаного удосконаленими елементами кріплення та запирання кришок розвантажувальних люків. З її допомогою виконано розрахунок на міцність удосконалених елементів кріплення. Визначено, що

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

напруження, що виникають під час експлуатації, не перевищують допустимих.

Встановлено, що максимальні еквівалентні напруження у петлях кріплення кришки люка становлять 52–82 МПа, а у запірних скобах –

21–27 МПа, що не перевищує допустимих значень відповідно до вимог ДСТУ 7598:2014.

Отримані результати дають обґрунтування можливості відкоригувати конструкторську та технологічну документацію на виготовлення універсальних НПВ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Візник Р. І. Визначення динамічних сил, що діють на піввагон при розвантаженні роторним вагоноперекидачем. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2023. № 203. С. 35–44. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.203.2023.277952>
2. Візник Р. І., Бондаренко В. В. Вивантаження з залізничних напіввагонів насипних вантажів удосконаленим способом перекидання. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2025. № 212. С. 208–216. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336410>
3. Візник Р. І., Чепурченко І. В., Яценко А. О. Особливості визначення експлуатаційних навантажень кузова напіввагона та шляхи удосконалення його конструкції з метою забезпечення міцності і збереження. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. № 159. С. 91–97. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.159.2016.67018>
4. Гладких І. В., Сулим А. О., Лупітько Н. В. Основні дослідження динаміки оновлення та розвитку парку вантажних вагонів в Україні. Аналітичний огляд. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. 2020. Вип. 20. С. 4–13.
5. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). [Чинний від 2015-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 249 с.
6. ДСТУ ГОСТ 22235:2015. Вагони вантажні магістральних залізничних доріг колії 1520 мм. Загальні вимоги щодо забезпечення збереження під час завантажувально-розвантажувальних та маневрових робіт (ГОСТ 22235–2010, IDT). [Чинний від 2016-02-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 85 с.
7. Зарипов Р. Ю., Сулейменов А. Д., Каримова Ж. Р. Исследование надежности цельнометаллических полувагонов. *Наука и техника Казахстана*. 2021. № 4. С. 119–128. DOI: <https://doi.org/10.48081/gqrv7549>
8. Мартинов І. Е., Шовкун В. О., Труфанова А. В., Литовченко О. М., Дмитренко М. В., Балашов О. О. Дослідження технічного стану універсальних напіввагонів. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2024. № 209. С. 66–75. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.209.2024.314256>
9. Минеев С. П., Прусова А. А., Выгодин М. А., Минеев А. С. Основные технологические решения по эффективной разгрузке смерзшегося груза из железнодорожных полувагонов. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. тр-ту ім. акад. В. Лазаряна*. 2012. № 40. С. 124–130.
10. Мурадян Л. А. Відмови та безвідмовність вагонів як складові експлуатаційної надійності. *Вісник НТУ «ХП»*. Сер. «Механіко-технологічні системи». 2015. № 52(1161). С. 127–130.
11. Сулим А. О., Сафронов О. М., Федосов-Никонов Д. В., Стринжа А. М. Сучасний стан та перспективи розвитку парку вантажних вагонів в Україні: оновлення або продовження призначеного строку служби? *Залізничний транспорт України*. 2021. № 4. С. 4–20. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2021-141-4-04-20>
12. Федосов-Никонов Д. В., Стринжа А. М., Шамшей Д. О., Полулях В. М., Федоров В. В., Шушмарченко В. О. Дослідження корозійних пошкоджень елементів вагонів під час технічного діагностування. *Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля*. 2019. № 3(251). С. 181–184.
13. Фомін О. В., Горбунов М. І., Коваленко В. В., Флярковська В. О. Формалізовані описання конструкцій кришок люків напіввагонів (частина 2). *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2018. № 1(242). С. 145–152.
14. Antipin D. Ya., Racin D. Yu., Shorokhov S. G. Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the Open-Top Wagon Frame by Means of Computer Simulation. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 150–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.738>
15. Baranovskyi D., Myamlin S., Kebl I. Increasing the Carrying Capacity of the Solid-Body Rail Freight Car. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022. Vol. 16, Iss. 3. P. 219–225. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/149935>

16. Baranovskyi D., Bulakh M., Bulakh M. Determining the service life of a gondola car with an increased floor body safety factor. *Reliability Engineering & System Safety*. 2026. Vol. 266. Art. 111670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.111670>
17. Faidzi M. K., Abdullah S., Abdullah M. F., Azman A. H., Singh S. S. K., Hui D. Geometrical effects of different core designs on metal sandwich panel under static and fatigue condition. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022. Vol. 44, Iss. 3. Art. 111. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03401-5>
18. Lee W. G., Kim J.-S., Sun S.-J., Lim J.-Y. 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*. 2018. Vol. 232, Iss. 1. P. 25–42. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716646140>
19. Myamlin S. V., Kebal I. U., Kolesnykov S. R. Design review of gondola car. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*. 2014. № 6(54). P. 136–145. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2014/33773>
20. Reidemeister A., Muradian L., Shaposhnyk V., Shykunov O., Kyryl'chuk O., Kalashnyk V. Improvement of the open wagon for cargoes which imply loading with a «hat». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. (Dnipro, 27–29 May, 2020). Vol. 985, Iss. 1. Art. 012034. Dnipro, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012034>
21. Zaripov R., Gavrilovs P. Research Opportunities to Improve Technical and Economic Performance of Freight Car through the Introduction of Lightweight Materials in their Construction. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187. P. 22–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.345>

I. E. MARTYNOV^{1*}, A. V. TRUFANOVA^{2*}, V. N. SHOVKUN^{3*}, M. V. DMITRENKO^{4*}

^{1*}Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkov, Ukraine, 61050, тел. +38 (050) 300 31 60, e-mail martynov.hiit@gmail.com, ORCID 0000-0002-0481-3514

^{2*}Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkov, Ukraine, 61050, тел. +38 (050) 300 31 60, e-mail trufanova@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-1702-1054

^{3*}Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkov, Ukraine, 61050, тел. +38 (067) 399 68 81, e-mail vadimshovkun62@gmail.com, ORCID 0000-0003-1826-6053

^{4*}Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkov, Ukraine, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, e-mail lemtr21@gmail.com, ORCID 0009-0000-2712-2495

Study of the Stress-Strain State of Fastening Elements for Manhole Covers on Universal Flatcars

Purpose. To investigate the strength of welded fasteners for the hatch covers of a universal flatcar. The fasteners for the hatch cover locking mechanisms are attached to the car body using rivets. This technology is quite costly. An analysis of global experience indicates that riveted joints can be replaced with welded ones, provided the required structural strength is ensured. **Methodology.** The hatch covers of all models of universal flatcars are considered part of the flatcar floor. They are designed for bottom unloading of bulk cargo and also bear the vast majority of vertical loads. To study the stress state of the welded fastening elements of the flatcar hatch covers (locks and unloading hatch hinges), a three-dimensional model of a universal flatcar body was developed in the ANSYS software package. When constructing the geometric model of the car body, the main design features and the nature of load transfer to the welded fasteners of the hatch covers were taken into account. The computational model of the flatcar simulates the car body structure and consists of two side walls, two end walls, and a floor. The model was fixed at the body corner post attachment points and loaded with vertical forces. Since the car body is axisymmetric and the applied loads are also symmetric, one-fourth of the model was considered to reduce the computational effort. **Findings.** A strength analysis of the upgraded open-top car body structure revealed that the improved design of the fastening and locking elements for the car's hatch meets the strength requirements of current regulatory standards. The maximum stresses arising under load are within the range of 55–82 MPa. The maximum stresses arising in the structural elements of the hatch locking brackets under load do not exceed 27 MPa, which meets the requirements of regulatory documents. **Originality.** For the first time, a study was conducted on the stress-strain state of the modernized welded fastening elements for the hatch covers of universal flatcars. **Practical value.** The results obtained provide a scientific and technical justification for the feasibility of modernizing the structural elements of the bodies of universal flatcars. Based on the analysis of the strength of welded fastening elements for the unloading hatch covers

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: <https://doi.org/10.15802/stp2026/364188>

© I. Е. Мартинов, А. В. Труфанова

В. О. Шовкун, М. В. Дмитренко, 2026

of flatcars, it was established that the improved elements meet the requirements of current regulatory documents. The implementation of the improved technology for fastening hatch covers will reduce the production cost of flatcars without compromising the operational reliability of the rolling stock.

Keywords: universal flatcar; body; hatch cover; locking device; locking bracket; clamping bracket; stress

REFERENCES

1. Viznyak, R. I. (2023). The significance of dynamic forces acting on a gondola car when unloading by a rotary car dumper. *Collection of Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, (203), 35-54 DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.203.2023.277952> (in Ukrainian)
2. Viznyak, R. I., & Bondarenko, V. V. (2025). Unloading bulk cargoes from railway gondella cars using an improved tipping method. *Collection of Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, (212), 208-216. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336410> (in Ukrainian)
3. Viznyak, R. I., Chepurchenko, I. V., & Yatsenko, A. O. (2016). Features of identifying operational loads the body of open-top car and ways of improving its design to ensure durability and preservation. *Collection of Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, (159), 91-97. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.159.2016.67018> (in Ukrainian)
4. Hladkykh, I. V., Sulym, A. O., & Lupitko, N. V. (2020). Osnovni doslidzhennia dynamiky onovlennia ta rozvytku parku vantazhnykh vahoniv v Ukraini. Analitychnyi ohliad. *Collection of scientific papers «Railbound rolling stock»*, 20, 4-13. (in Ukrainian)
5. Vahony vantazhni. Zahalni vymohy do rozrakhunkiv ta proektuvannia novykh i moderni-zovanykh vahoniv kolii 1520 mm (nesamokhidnykh), 249 DSTU 7598:2014. (2015). (in Ukrainian)
6. Vahony vantazhni mahistralnykh zaliznychnykh dorih kolii 1520 mm. Zahalni vymohy shchodo zabezpechennia zberezhenia pid chas zavantazhuvalno-rozvantazhuvalnykh ta manevro-vykh robit (HOST 22235–2010, IDT), 85 DSTU HOST 22235:2015. (2016). (in Ukrainian)
7. Zaripov, R. Yu., Suleimenov, A. D., & Karimova, Zh. R. (2021). Investigation of the reliability of all-metal gondola cars. *Science and Technology of Kazakhstan*, (4), 119-127. DOI: <https://doi.org/10.48081/gqrv7549> (in Russian)
8. Martynov, I. E., Shovkun, V. O., Trufanova, A. V., Lytovchenko, O. M., Dmytrenko, M. V., & Balashov, O. O. (2024). The study of the technical condition of gondola cars. *Collection of Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, (209), 66-75. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.209.2024.314256> (in Ukrainian)
9. Mineyev, S. P., Prusova, A. A., Vygodin, M. A., & Mineyev, A. S. (2012). Major technological solutions for efficient unloading the frozen cargo from railway gondola cars. *Visn. Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. tr-tu. im. akad. V. Lazaryana*, (40), 124-130. (in Russian)
10. Muradyan, L. A. (2015). Vidmovy ta bezvidmovnist' vahoniv yak skladovi ekspluatatsiynoyi nadiynosti. *Visnyk NTU «KHPI»*. Ser. Mekhaniko-tekhnologichni systemy ta komplekxy, 52(1161), 127-130. (in Ukrainian)
11. Sulym, A. O., Safronov, O. M., Fedosov-Nykonov, D. V., & Strynzha, A. M. (2021). Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku parku vantazhnykh vahoniv v Ukraini: onovlennia abo prodovzhennia pryznachenoho stroku sluzh-by? *Zaliznychnyi transport Ukrainy*, (4), 4-20. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2021-141-4-04-20> (in Ukrainian)
12. Fedosov-Nikonov, D. V., Strynzha, A. M., Shamshei, D. O., Poluliakh, V. M., Fedorov, V. V., & Shushmarchenko, V. O. (2019). The study of corrosion damage to car components during technical diagnostics. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, (3(251)), 181-184. (in Ukrainian)
13. Fomin, O. V., Gorbunov, M. I., Kovalenko, V. V., & Flyarkovska, V. O. (2018). Formalized description of structures of the semiconductor floor crisp (part 2). *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, (1(242)), 145-152. (in Ukrainian)
14. Antipin, D. Ya., Racin, D. Yu., & Shorokhov, S. G. (2016). Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the Open-Top Wagon Frame by Means of Computer Simulation. *Procedia Engineering*, 150, 150-154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.738> (in English)
15. Baranovskyi, D., Myamlin, S., & Kebal, I. (2022). Increasing the Carrying Capacity of the Solid-Body Rail Freight Car. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16(3), 219-225. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/149935> (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

16. Baranovskyi, D., Bulakh, M., & Bulakh, M. (2026). Determining the service life of a gondola car with an increased floor body safety factor. *Reliability Engineering & System Safety*, 266, 111670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111670> (in English)
17. Faidzi, M. K., Abdullah, S., Abdullah, M. F., Azman, A. H., Singh, S. S. K., & Hui, D. (2022). Geometrical effects of different core designs on metal sandwich panel under static and fatigue condition. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(3), 111. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03401-5> (in English)
18. 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> (in English)
19. Myamlin, S. V., Kebal, I. U., & Kolesnykov, S. R. (2014). Design review of gondola car. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, (6(54)), 136-145. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2014/33773> (in English)
20. Reidemeister, A., Muradian, L., Shaposhnyk, V., Shykunov, O., Kyryl'chuk, O., & Kalashnyk, V. (2020, May). Improvement of the open wagon for cargoes which imply loading with a «hat». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. (Vol. 985(1), Art. 012034). Dnipro, Ukraine. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012034> (in English)
21. Zaripov, R., & Gavrilovs, P. (2017). Research opportunities to improve technical and economic performance of freight car through the introduction of lightweight materials in their construction. *Procedia Engineering*, 187, 22-29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.345> (in English)

Дата надходження рукопису: 04.02.2026

Дата прийняття до публікації: 30.03.2026

Дата публікації: 29.06.2026