

УДК 629.44

Фомін Олексій Вікторович, д.т.н., проф.,
(професор кафедри «Вагони та вагонне господарство», Державний університет інфраструктури та технологій, м.Київ)

Горбунов Микола Іванович, д.т.н., проф.,
(зав. кафедри Залізничного, автомобільного транспорту та підйомнотранспортних машин, Східноукраїнський національний університет імені В. Даля, м. Сєвєродонецьк)

Кара Сергій Віталійович, к.т.н.,
(начальник управління інжинірингу, філія «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця», м.Київ)

Прокопенко Павло Миколайович,
(аспірант кафедри «Вагони та вагонне господарство», Державний університет інфраструктури та технологій, м.Київ)

Гриндей Петро Онисимович,
(залучений фахівець управління інжинірингу філії «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця», м. Київ)

СТВОРЕННЯ ВИСОКОТОЧНОЇ РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ ТРЬОХЕЛЕМЕНТНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВІЗКА ВАНТАЖНОГО ВАГОНА

Розроблено 3D-модель та розрахункову модель візка вантажного вагону типу 18-100. Проведено валідацію розрахункової моделі у порівнянні з комплексом ходових випробувань. Проведено розрахунки та оцінено показники міцності та опору втомі для подальших досліджень. На основі проведених розрахунків встановлено ймовірні зони накопичення втомі.

Ключові слова: рухомий склад, вантажний вагон, несівні конструкції, міцність, модель, розрахунки, САПР.

Вступ. З метою проведення аналізу напружено-деформованого стану від статичних та динамічних навантажень бічних рам та надресорних балок трьохелементної конструкції візка вантажного вагону, з урахуванням уточнених математичних моделей, результатів випробувань, які проводяться на сучасному та високоточному випробувальному обладнанні, виникає потреба у створенні високоточної розрахункової моделі трьохелементної конструкції візка вантажного вагону в системі автоматизованого проектування (далі – САПР). Візок вантажного вагону типу 18-100 під час обладнання його засобами вимірювальної техніки для проведення ходових міцнісних та ходових динамічних випробувань приведено на рис. 1.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Як аналогічне дослідження можна виділити: [1] – створення розрахункових моделей, врахування наднормативних сил, що діють здебільшого на сортувальних гірках, при цьому точність розрахунків потребує додаткових досліджень; [2] – оцінено вплив уданих навантажень на запас опору втомі, не застосовано високоточних розрахунків у САПР;

DOI:10.32703/2617-9040-2020-36-11

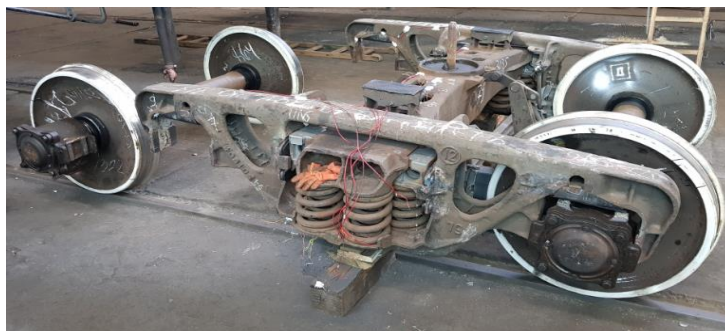


Рис. 1. Візок вантажного вагону типу 18-100 під час обладнання його засобами вимірювальної техніки

[3] – враховано в розрахунковій моделі внутрішні литі дефекти; [4] – розроблено математичну модель для врахування сил, що діють на візок. Дослідження щодо проведення розрахунків візків у САПР проводяться такими організаціями, як СНУ ім. В. Даля, ДУІТ, ДІТ, ДП «УкрНДІВ», філія «НДКТІ» АТ «Укрзалізниця», ПАТ «КВБЗ», ВНИИЖТ тощо. В рамках цієї роботи досліджується можливість створення високоточної розрахункової моделі трьохелементної конструкції візка вантажного вагону на основі використання найбільш сучасних технологій САПР та багатоступінчастої валідації з комплексом ходових міцнісних випробувань.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – створення високоточної розрахункової моделі трьохелементної конструкції візка вантажного вагону типу 18-100 з урахуванням результатів дослідницьких ходових випробувань.

Для досягнення поставленої мети були визначені і вирішені такі завдання:

аналіз раніше проведених досліджень в даній області;

аналіз конструкторської документації на візки типу 18-100;

створення 3D-моделі у САПР та розрахункових моделей;

проведення статичних міцнісних розрахунків та попередніх динамічних розрахунків;

проведення випробувань для оцінки блоків навантажень з урахуванням результатів попередніх розрахунків;

проведення уточнених динамічних розрахунків та валідація моделі, у разі потреби вдосконалення моделей;

оцінка результатів дослідження.

Матеріали і методи дослідження. Ходові міцнісні розрахунки приведено згідно [5–7]. При створенні високоточної розрахункової моделі враховано результати досліджень [1–4]. Проведення розрахунків у програмному комплексі САПР SolidWorks побудовано на використанні методу скінчених елементів.

Результати досліджень. Модель візка крім основних несівних елементів – бічна рама та надресорна балка (далі – НК) доповнена додатковими елементами. Додаткові елементи використовують для моделювання зв'язків між тілами, які представляють собою геометричні примітиви. Ці допоміжні елементи змодельовані абсолютно жорсткими тілами. Додаткові елементи та НК пов'язані між собою пружними елементами з жорсткістними характеристиками відсутнього тіла. Відсутнє тіло – це елемент конструкції, який контактує з НК рами візка 18-100 та передає зусилля або момент сил, або приймає участь в обмеженні руху. Додатковими елементами для рами візка 18-100 є: колісна вісь з буксами, клини та кузов вагону. 3D-модель розрахункової рами візка 18-100 подана на рис. 2.

Фрикційний клин змодельовано абсолютно жорстким тілом. Нормальна жорсткість між «боковою балкою – клином» та «між клином – надресорною балкою» визначається за допомогою комп'ютерного моделювання.

Жорсткість «балка-клин»: 9030321 Н/м. Жорсткість «клин-надресорна балка»: $1,191 \cdot 10^9$ Нм.

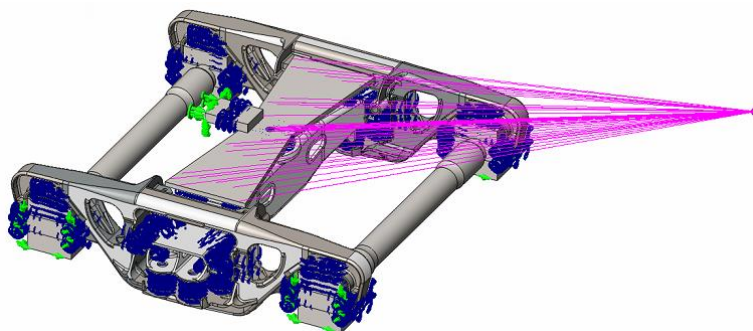


Рис. 2. Модель візка типу 18-100

При побудові динамічної моделі елементи буксового вузла візка 18-100 а саме букса та колісна пара представлені абсолютно твердими тілами та зв'язані з боковиною пружними елементами високої жорсткості.

До пружних елементів шворневого вузла візка 18-100 відносимо контакт між кузовом та надресорною балкою. Жорсткість контакту між кузовом та підп'ятником та скользуном: $210 \cdot 10^9$ Н/м.

На рис. 3 а приведено схему з'єднання бічної рами з клинами та надресорною балкою, на рис. 3 б приведено схему з'єднання бічної рами з буксами, на рис. 3 в приведено схему з'єднання надресорної балки з кузовом вагону. Значення маси, її положення у просторі та інерційні показники моделюються у САПР згідно схеми, приведеної на рис. 4.

Один зі ступенів валідації моделі є порівняння частот коливань візка під час дослідної поїздки та під час моделювання (модального аналізу). Приклад амплітудного спектру деформацій двох тензодатчиків на верхньому поясі бічної приведено на рис. 5 (а, б).

Для перших трьох мод (розрахункової моделі) похибки складають 1,7%; 5,3%; 1,5%. Розраховані частоти узгоджуються з результатами випробувань, це означає що розрахункова модель побудована вірно.

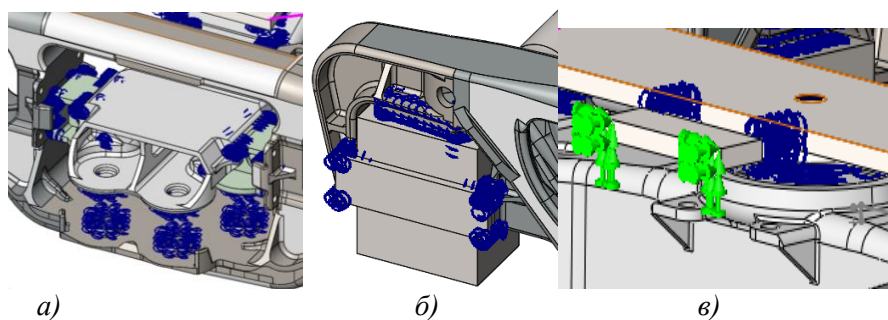


Рис. 3. Модель з'єднання елементів візка типу 18-100

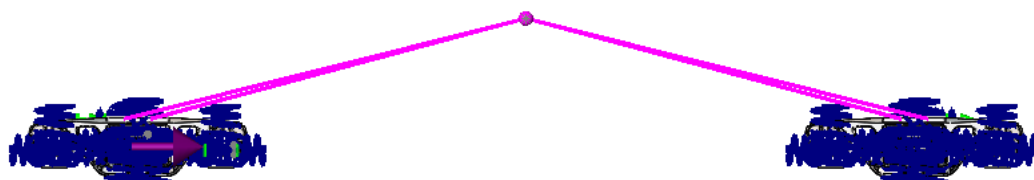


Рис. 4. Модель з'єднання візка з кузовом

Наступним етапом валідації є порівняння середньоквадратичних значень отриманих з випробувань та розрахункових напружень. Для цього під час ходових випробувань формуються блоки навантажень з дослідних тензорезисторів, акселерометрів. На основі прикладання блоків навантажень прискорень букс та бічних рам, проводяться порівняння середньоквадратичних значень напружень, отриманих з випробувань та розрахункових – рис. 6. На рис. 7 приведено приклад епюри середньоквадратичних значень дотичних напружень – а); приклад епюри статичних дотичних напружень від сил тяжіння – б).

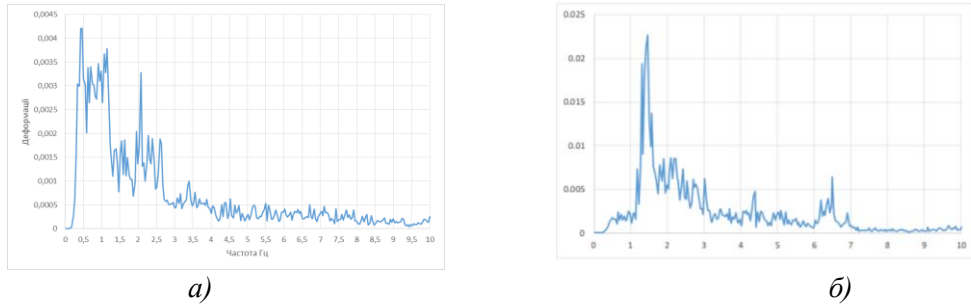


Рис. 5. Амплітудний спектр деформацій на верхньому поясі бічної рами візка

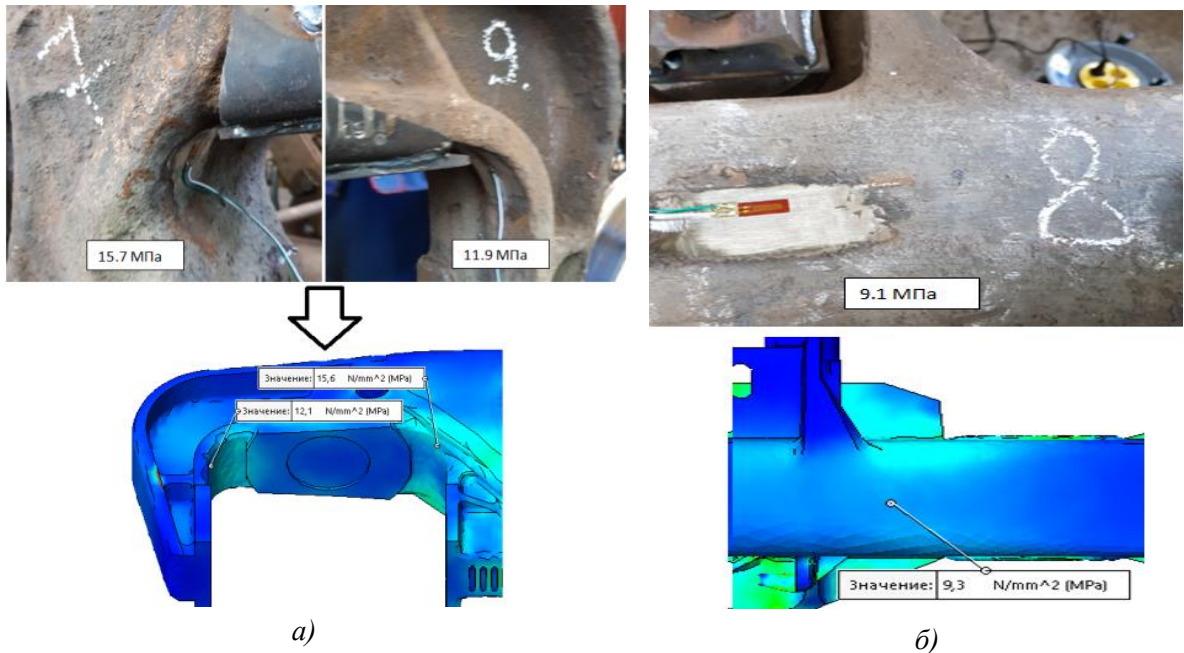


Рис. 6. Порівняння рівнів експериментальних та розрахункових динамічних напружень бічної рами візка

За результатами проведених досліджень напружено-деформованого стану та втомної довговічності несучих конструкцій рами візка 18-100 зроблено наступні висновки.

- В рамі візка 18-100 встановлено 13 імовірних зон виникнення пошкоджень:
- зона 1: галтельний перехід від зовнішнього бурту підп'ятника до верхнього поясу;
 - зона 2: кромки технологічних отворів верхнього поясу;
 - зона 3: внутрішній борт підп'ятника;
 - зона 4: перехід нижнього поясу в бокову стінку;
 - зона 5: радіусні переходи R55 буксового прорізу (внутрішні);
 - зона 6: кромка технологічного отвору;
 - зона 7: кромка технологічного отвору;
 - зона 8: кромка технологічного отвору;
 - зона 9: кут ресорного прорізу нижній;

зона 10: радіусні переходи направляючого бурта;
 зона 11: технологічний отвір над буксовим прорізом;
 зона 12: галтельний перехід від зовнішнього бурту підп'ятника до верхнього поясу;
 зона 13: радіусні переходи R55 буксового прорізу (зовнішні).

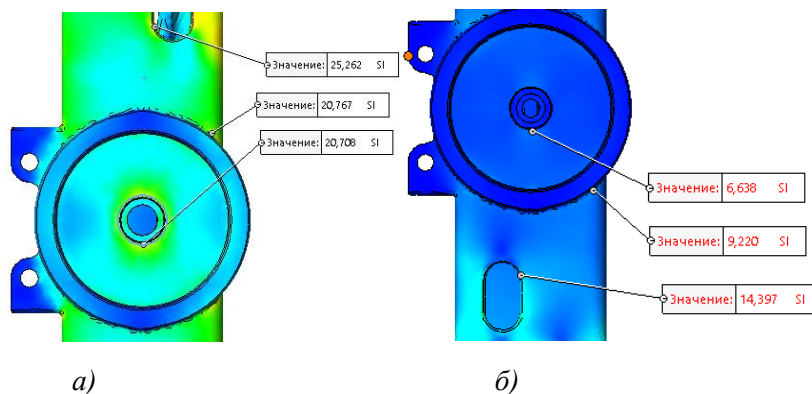


Рис. 7. Епюра середньоквадратичних значень дотичних напружень, статичних дотичних напружень від сил тяжіння

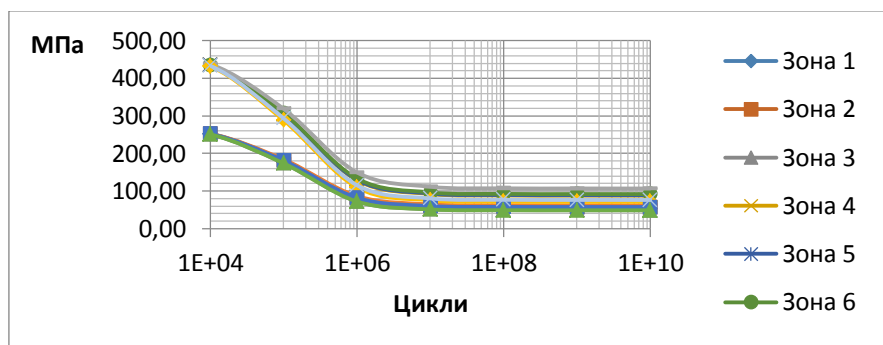


Рис. 8. Криві втоми

Згідно з [8], з урахуванням схематизованих діаграм з визначення границь витривалості, будуються криві втоми за параметром імовірності відмови для кожної дослідної зони НК візка. Криві втоми для всіх 13 зон приведено на рис. 8.

Параметри скінчено-елементної моделі візка вантажного вагону приведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Параметри скінчено-елементної моделі візка вантажного вагону

№ п/п	Параметр скінчено-елементної моделі	Значення
1	Розмір елемента	12 і 6
2	Кількість елементів	2298613
3	Кількість вузлів	555374

Таким чином, з урахуванням [1, 5–7, 9–11] розроблено високоточну розрахункову модель трьохелементної конструкції візка вантажного вагону, яка враховує якісну 3D-модель, пружні зв'язки візка, двоступінчасту валідацію моделі (по прискоренням на напруженням при експериментально отриманих блоках навантажень). Розроблена модель дозволяє проводити більш глибокі дослідження напружено-деформованого стану візка вантажного вагону з урахуванням модернізацій, різноманітних блоків навантажень для існуючих та перспективних завдань.

Ця публікація виконана в рамках проекту: «Розроблення концептуальних засад для

відновлення ефективного функціонування застарілих вантажних вагонів (Development of conceptual frameworks for restoring the efficient operation of obsolete freight cars)» (Рестраційний номер проєкту: 2020.02/0122), фінансування якого здійснюється Національним фондом досліджень України за кошти державного бюджету.

Висновки. Розроблено високоточну розрахункову модель трьохелементної конструкції візка вантажного вагона, яка враховує розробку 3D-моделі, пружних зв'язки візка, проведення та оцінку результатів ходових випробувань, двоступінчасту валідацію моделі. За результатами порівняння рівнів прискорень елементів візка похибки знаходяться на рівні 1,5–5,3%.

На основі розробленої моделі візка вантажного вагону, проведено комплекс розрахунків та встановлено ймовірні зони накопичення втоми: галтельний перехід від зовнішнього бурту під'ятника до верхнього поясу, кромки технологічних отворів верхнього поясу, внутрішній борт під'ятника, перехід нижнього поясу в бокову стінку, радіусні переходи буксового прорізу R55 (з обох сторін буксового прорізу), кромки всіх технологічних отворів, нижній кут ресорного прорізу, радіусні переходи направляючого бурта, технологічний отвір над буксовим прорізом, галтельний перехід від зовнішнього бурту під'ятника до верхнього поясу.

Розроблена модель дозволяє проводити більш глибокі дослідження напружено-деформованого стану візка вантажного вагону з урахуванням модернізацій, різноманітних блоків навантажень для існуючих та перспективних завдань.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кара С.В. Підвищення міцності та покращення показників динаміки елементів ходової частини вантажних вагонів шляхом конструктивного вдосконалення: дис. канд. техн. наук / С.В. Кара. Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2018. – 146 с.
2. Сенько В.И. Анализ причин повреждения и возможности продления срока службы боковых рам тележек грузовых вагонов / В.И. Сенько, М.И. Пастухов, С.В. Макеев, И.Ф. Пастухов. – Гомель: *Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого*. №4, 2010. – С. 13–18.
3. Разуметов Я.О. Повышение прочности боковых рам тележек грузовых вагонов: дис. канд. техн. наук / Я.О. Разуметов. – Санкт-Петербург, 2014. – 145 с.
4. Туранов Х.Т., Ситников С.А. Математическое моделирование сил, действующих на вагон при скатывании с горки / Х.Т. Туранов, С.А. Ситников. – Луганск: *Вісник СНУ ім. В. Даля*. №12, Ч. 1, 2011. – С. 225–236.
5. РД 24.050.37-95 Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. – М., 1995 г.
6. ДСТУ ГОСТ 33211:2017 Вагони вантажні. Вимоги до міцності та динамічних якостей.
7. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колес 1520 мм (несамоходных). ВНИИВ-ВНИИЖТ. М., 1983.
8. РД 50-694-90 Методические указания. Надежность в технике. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций. М. – 1991, 84 с.
9. Fomin, O. Determining strength indicators for the bearing structure of a covered wagon's body made from round pipes when transported by a railroad ferry / O. Fomin, A. Lovska, V. Masliyev, A. Tsybaliuk, O. Burlutski. – *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 7, Issue 1 (97), 2019. — P. 33–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154282.
10. Fomin Oleksij Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry / Fomin Oleksij, Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Kateryna Kravchenko, Pavlo Prokopenko, Anna Fomina, Vladimir Hauser. – *Communications-Scientific letters of the University of Zilina* 21, no. 1, 2019. – P. 28–34.
11. Turpak S.M. Logistic technology to deliver raw material for metallurgical production / S.M. Turpak, I.O. Taran, O.V. Fomin, O.O. Tretiak. – *Scientific Bulletin of National Mining University*, Issue 1, 2018. – P. 162–169 DOI: 10.29202/nvngu/2018-1/3.
12. Бондарев А.М. Оценка ресурса несущих конструкций подвижного состава и разработка мероприятий по продлению его срока службы / А.М. Бондарев, В.Л. Горобец, В.В. Колбун, Д.А. Ягода, И.М. Грушак, Л.А. Манашкин. – Днепр: *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. Вип. 30, 2009. – С. 92–102.
13. ДСТУ 2444-94 Розрахунки та випробування на міцність. Опір втоми. Терміни та визначення. Київ Держстандарт України 1994, – 23 с.
14. ДСТУ 2825-94 Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять. Київ Держстандарт України 1994, – 41с.
15. ВНД.32.0.07.123-03 Положення про організацію робіт щодо продовження термінів служби тягового рухомого складу Укрзалізниці (рам візків, головних рам кузовів і кузовів) Міністерство транспорту України, 2003 – 16 с.

REFERENCES

1. Kara S. (2018) *Pi`dvishhennya mi`cznosti` ta pokrashhennya pokazniki`v dinami`ki elementi`v khodovoyi chastini vantazhnikh vagoni`v shlyakhom konstruktivnogo vdoskonalennya* [Strength improvement and dynamics indicators improvement of elements of freight cars crew by constructive improvement] Severodoneck [in Ukrainian].
2. Senko V., Pastuhov M., Makieev S., Pastuhov I. (2010) *Analiz prichin povrezhdeniya i vozmozhnosti prodleniya sroka sluzhby` bokovy`kh ram telezhek gruzovy`kh vagonov* [Analysis of the causes of damage and the possibility of extending the service life of the side frames of freight car bogies] Bulletin of GSTU im. BY. Sukhoi. [in Russian].
3. Razumetov Ya. (2014) *Povy`shenie prochnosti bokovikh ram telezhek gruzovy`kh vagonov* [Strengthening the side frames of freight car bogies] St. Petersburg [in Russian].
4. Turanov Kh., Sitnikov S. *Matematicheskoe modelirovanie sil, vozdeystvuyushhikh na vagon pri skaty`vanii s gorki* [Mathematical modeling of forces acting on a car when rolling down a hill] Luhansk: Visnik SNU im. V. Dahl [in Russian].
5. RD 24.050.37-95 (1995) *Vagony` gruzovy`e i passazhirskie. Metody` ispy`taniy na prochnost` i khodovy`e kachestva* [Freight and passenger cars. Test methods for strength and driving performance] Moscow [in Russian].
6. DSTU GOST 33211:2017 (2017) *Vagoni vantazhni`. Vimogi do mi`cznosti` ta dinami`chnikh yakostej* [Freight cars. Requirements for strength and dynamic qualities]. Ukraine [in Ukrainian].
7. Standard (1983) *Normy` dlya rascheta i proektirovaniya novy`kh i moderniziruyemy`kh vagonov zhelezny`kh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodny`kh)* [Standards for calculation and design of new and modernized railway cars of the Ministry of Railways of 1520 mm gauge (non-self-propelled)]. Moscow: VNIIV-VNIIZHT [in Russian].
8. RD 50-694-90 (1991) *Metodicheskie ukazaniya. Nadezhnost` v tekhnike. Veroyatnostny`j metod rascheta na ustalost` svarny`kh konstrukcij* [Methodical instructions. Reliability in technology. Probabilistic method of fatigue analysis of welded structures]. Moscow [in Russian].
9. Fomin, O., Lovska A., Masliyev V., Tsymbaliuk A., Burlutski O. (2019) Determining strength indicators for the bearing structure of a covered wagon's body made from round pipes when transported by a railroad ferry. –Eastern-European Journal of Enterprise Technologies [in English].
10. Fomin O. Gerlici Juraj, Lovska Alyona, Kravchenko Kateryna, Prokopenko Pavlo, Fomina Anna, Hauser Vladimir (2019) Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. Communications-Scientific letters of the University of Zilina [in English].
11. Turpak S.M. I.O. Taran, O.V. Fomin, O.O. Tretiak. (2018) Logistic technology to deliver raw material for metallurgical production. Scientific Bulletin of National Mining University, Issue 1 [in English].
12. Bondarev A.M., Gorobecz V.L., Kolbun V.V., Yagoda D.A., Grushhak I.M., Manashkin L.A. (2009) *Oczenka resursa nesushhikh konstrukcij podvizhnogo sostava i razrabotka meropriyatij po prodleniyu ego sroka sluzhby`* [Assessment of the resource of the bearing structures of the rolling stock and the development of measures to extend its service life] Dnipro: DIIT [in Russian].
13. DSTU 2444-94 (1994) *Rozrakhunki ta viprobuvannya na mi`czni`st`. Opi`r vtomi`. Termini ta viznachennya* [Calculations and strength tests. Resistance to fatigue. Terms and definitions]. Kyiv: State Standard of Ukraine.
14. DSTU 2825-94 (1994) *Rozrakhunki ta viprobuvannya na mi`czni`st`. Termini ta viznachennya osnovnykh ponyat`* [Calculations and strength tests. Terms and definitions of basic concepts]. Kyiv: State Standard of Ukraine [in Ukrainian].
15. IRD.32.0.07.123-03 (2003) *Polozhennya pro organi`zaczi`yu robi`t shhodo prodovzhennya termi`ni`v sluzhbi tyagovogo rukhomogo skladu Ukrzali`zniczi` (ram vi`zki`v, golovnykh ram kuzovi`v i` kuzovi`v)* [Regulations on the organization of work to extend the service life of traction rolling stock of Ukrzaliznytsia (frames of carts, main frames of bodies and bodies)] Kyiv: Ministry of Transport of Ukraine, Ukrzaliznytsia [in Ukrainian].

*Фомин Алексей Викторович, д.т.н., проф.,
(профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Государственный университет
инфраструктуры и технологий, г. Киев)*

*Горбунов Николай Иванович, д.т.н., профессор
(профессор, заведующий кафедрой «Железнодорожный, автомобильный транспорт и
подъемно-транспортные машины», Восточноукраинский национальный университет
имени В. Даля, г. Северодонецк)*

*Кара Сергей Витальевич, к.т.н.,
(начальник управления инжиниринга филиала «Научно-исследовательский и опытно-
конструкторский институт железнодорожного транспорта» АО «Укрзалізниця», г. Киев)*

*Павел Николаевич Прокопенко,
(аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Государственный университет
инфраструктуры и технологий, г. Киев)*

*Гриндей Петр Анисимович,
(специалист филиала «Научно-исследовательский и опытно-конструкторский
институт железнодорожного транспорта» АО «Укрзалізниця», г. Киев)*

СОЗДАНИЕ ВЫСОКОТОЧНОЙ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ТРЕХЭЛЕМЕНТНОЙ КОНСТРУКЦИИ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА

*Разработана 3D-модель и расчетная модель тележки грузового вагона типа 18-100.
Проведено валидацию расчетной модели по сравнению с комплексом ходовых испытаний.
Проведены расчеты и оценены показатели прочности и сопротивления усталости для
дальнейших исследований. На основе проведенных расчетов установлено вероятные зоны
накопления усталости.*

Ключевые слова: подвижной состав, грузовой вагон, несущие конструкции, прочность, модель, расчеты, САПР.

*Fomin Oleksiy Viktorovych, Doctor of Technical Sciences, Professor,
(Professor of the Department of Wagons and Carriage Economy, State University of
Infrastructure and Technologies, Kyiv)*

*Gorbunov Mykola Ivanovych, Doctor of Technical Sciences, Professor
(Professor, Head of the Department "Railway, Road Transport and Hoisting and Transport
Machines", V. Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk)*

*Kara Sergey Vitalievich, Ph.D.,
(Head of Engineering Department, Branch "Research and Development Institute of Railway
Transport" JSC "Ukrzaliznytsia", Kyiv)*

*Prokopenko Pavlo Mykolayovych,
(Postgraduate student of the Department of Wagons and Carriage Economy, State University of
Infrastructure and Technologies, Kyiv)*

*Grindey Petro,
(specialist, Branch "Research and Development Institute of Railway Transport" JSC
"Ukrzaliznytsia", Kyiv)*

CREATION OF A HIGH-PRECISION CALCULATION MODEL OF A THREE-ELEMENT STRUCTURE OF A FREIGHT CAR BOGIE

*A 3D model and computational model of a freight car bogie of type 18-100 has been developed.
The design model was validated in comparison with the complex of running tests. Calculations were
carried out and indicators of strength and fatigue resistance were evaluated for further research. On
the basis of the calculations, the probable zones of fatigue accumulation have been established.*

Keywords: rolling stock, freight car, supporting structures, strength, model, calculations, CAD.