

УДК 629.463.66:001.891

**В.В. Ільчишин,**  
(головний інженер, керівник випробувального центру ВЦ ПВ ДП «УкрНДІВ»);  
**А.М. Стринжа,**  
(завідувач лабораторією ДП «УкрНДІВ»);  
**В.А. Худієнко,**  
(заступник завідувача лабораторією ДП «УкрНДІВ»);  
**В.М. Полулях,**  
(науковий співробітник ДП «УкрНДІВ»);  
**В.О. Шушмарченко**  
(молодший науковий співробітник ДП «УкрНДІВ»)

## МІЦНІСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ БУНКЕРНОГО ВАГОНА

У статті розглянуто питання щодо теоретичного та експериментального дослідження міцності елементів конструкції вагона-хопера критого для зерна та інших харчових вантажів. Виконано аналіз результатів експериментальних та теоретичних досліджень напружено-деформованого стану рами вагона-хопера методом скінчених елементів (МСЕ).

**Ключові слова:** вагон-хопер, міцність елементів, розрахункові та експериментальні напруження.

**Вступ.** Шворневий вузол є одним із найбільш навантажених вузлів вантажних вагонів, що експлуатуються. Питання зменшення напружено-деформованого стану у шворневому вузлі, а також продовження терміну його безпечної експлуатації знаходяться під постійною увагою виробників, експлуатаційників та вчених.

**Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми.** Проблеми міцності рухомого складу розглядалися в роботах В.А. Лазаряна, С.П. Блохіна, М.Б. Кельріха [1], С.В. Мямліна, [2, 3], В.Д. Дановича, С.И. Соколова та інших видатних вчених.

На даний час проблема міцності конструкцій бункерних вагонів неодноразово розглядалася як в Україні, так і в країнах СНД. Роботи щодо дослідження міцності конструкції бункерних вагонів проводилися в Білоруському державному університеті транспорту (БелДУТ), Державному підприємстві "Український науково-дослідний інститут вагонобудування" (ДП «УкрНДІВ»), Петербурзькому державному університеті шляхів сполучення (ПДУШС) та інших науково-дослідних закладах. У останніх публікаціях, присвячених бункерним вагонам, розглянуті питання щодо міцності елементів конструкцій вагонів-хоперів.

© Ільчишин В.В., Стринжа А.М., Худієнко В.А., Полулях В.М., Шушмарченко В.О., 2018

У статті Макеєва С.В. [4] розглянуте питання розрахунків на міцність основних несучих елементів [5], стійок, обшиви та інших елементів. Стаття Рахімова Р.В. [6] присвячена питанню дослідження елементів кузова на міцність, виявленню найбільш напружених зон та елементів. Дані публікації вказують, що останні дослідження спрямовані на підвищення міцності та надійності, покращенню технічних та експлуатаційних характеристик вагонів-хоперів.

Однак і сьогодні, при експлуатації нових моделей вагонів-хоперів різного конструктивного виконання, виникає багато запитань щодо їх міцнісних показників.

**Мета і завдання дослідження.** Вагони-хопери мають суттєві відмінні риси від вантажних вагонів інших типів – наявність розвантажувальних бункерів та похилих торцевих стін кузова. Зазначені відмінності багато в чому визначають міцнісні якості бункерних вагонів. В експлуатації ці вагони отримують різні види ушкоджень, основні з яких обумовлені впливом ударних навантажень при розпуску вагонів з гірок. При проведенні експериментальних досліджень вагона-хопера, були виявлені зони перевищення допустимих напружень в елементах конструкції шворневого вузла [7-9]. Для зниження напружено-деформованого стану елементів конструкції шворневого вузла потрібно застосування теоретичного та експериментального методів. Один з таких методів дослідження із застосуванням математичної моделі напружено-деформованого стану, що адекватно відображує конструкцію та навантаження, що діють на неї, приведено у статті. Тому дослідження, спрямовані на підвищення міцності і надійності бункерних вагонів є актуальними.

**Матеріали та методи дослідження.** З метою задоволення потреб перевізників, розширення номенклатури продукції, зниження собівартості перевезень та збереження вантажу, що перевозиться, багато вагонобудівних заводів України, Росії та інших країн СНД розробили й поставили на виробництво багато моделей вагонів-хоперів різного конструктивного виконання з покращеними показниками. Однак при проведенні випробувань нової продукції виникають проблеми з міцністю елементів конструкції.

У статті наведено результати досліджень напружено-деформованого стану несучої конструкції вагона-хопера критого для зерна та інших харчових вантажів моделі 19-4152 (основні технічні характеристики наведені в табл. 1) при статичних випробуваннях від дії вертикальних навантажень та випробувань на міцність при співударі нормативними навантаженнями [7-11].

Під час проведення випробувань на співудар та статичних випробувань від дії вертикальних навантажень було встановлено перевищення нормативних напружень в елементах шворневої балки. Аналіз отриманих напружень свідчить, що причиною цього є низька міцність елементів конструкції, зумовлена конструктивними особливостями вагонів-хоперів.

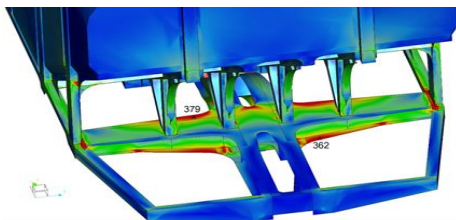
При допустимому значенні 390 МПа на нижньому листі шворневого вузла, у місці з'єднання з хребтовою балкою, отримані значення 623 МПа та 406 МПа, що є перевищенням допустимих нормативних значень [7-11]. Виникла необхідність удосконалення та підсилення конструкції з метою перерозподілу напружень у шворневому вузлі. Крім того, в шворневій балці вагона за I розрахунковим режимом під час проведення експлуатаційних випробувань отримані напруження 346 МПа, за III розрахунковим режимом – 226 МПа, при допустимих для сталі класу міцності 390 відповідно 351 МПа та 240 МПа. Отримані напруження складають 98,6% та 94,2% відповідно від допустимих нормативних значень показників.

Таблиця 1

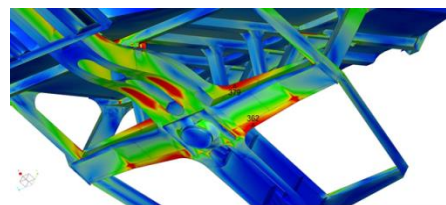
**Основні технічні характеристики вагона-хопера критого для зерна та інших харчових вантажів моделі 19-4152**

Назва параметра	Значення параметра
Вантажопідйомність, т, не більше	71,5
Маса тари, т: - max - min	22,5 21,8
Об'єм кузова, м <sup>3</sup> , не менше	133
Максимальне розрахункове статичне навантаження від колісної пари на рейки, кН (тс)	230,5 (23,5)
Питома матеріаломісткість (відношення маси тари до вантажопідйомності)	0,315
Довжина вагона по осях зчеплення автозчепів, мм	14720±20
Висота від рівня головок рейок до вісі автозчепу у порожньому стані вагона, мм	1060±20
Кількість люків, шт.: - завантажувальних - розвантажувальних	4 або 56
Розміри люків, мм: - завантажувального - розвантажувального	1625x595 1100x325
Кут нахилу до горизонтальної площини, град: - торцевих стін кузова - стін бункерів	40 42; 55
Конструкційна швидкість, км/год, не більше	120

На підставі результатів експериментальних досліджень проведено коригування розрахункової схеми та зроблені висновки про можливі варіанти перерозподілу напружень в зоні шворневого вузла. Після коригування розрахункової схеми проведені повторні розрахунки шворневого вузла на міцність. Напружено-деформований стан шворневого вузла до підсилення за I режимом наведено на рис. 1 – 2.

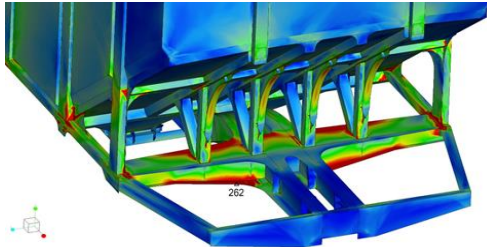


**Рис. 1. Напружено-деформований стан шворневого вузла до підсилення за I режимом (вид зверху), МПа**

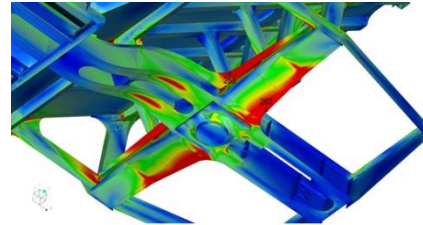


**Рис. 2. Напружено-деформований стан шворневого вузла до підсилення за I режимом (вид знизу), МПа**

Напружено-деформований стан шворневого вузла до підсилення за ІІІ режимом наведено на рисунках 3 – 4.

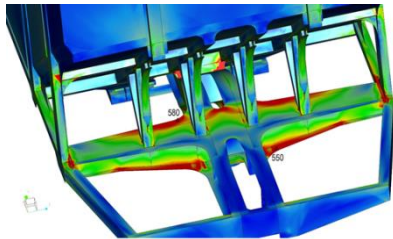


*Рис. 3. Напружено-деформований стан шворневого вузла до підсилення за ІІІ режимом (вид зверху), МПа*

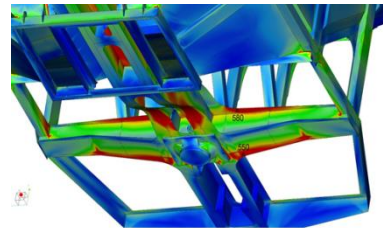


*Рис. 4. Напружено-деформований стан шворневого вузла до підсилення за ІІІ режимом (вид знизу), МПа*

Напружено-деформований стан шворневого вузла до підсилення у режимі співудару наведено на рисунках 5–6.



*Рис. 5. Напружено-деформований стан шворневого вузла до підсилення у режимі співудару (вид зверху), МПа*

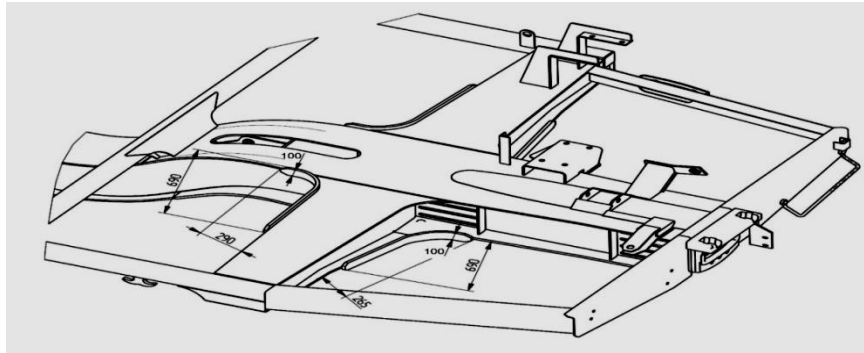


*Рис. 6. Напружено-деформований стан шворневого вузла до підсилення у режимі співудару (вид знизу), МПа*

Збіжність результатів розрахунку і експериментальних досліджень за І режимом склала 96%. Збіжність результатів розрахунку і експериментальних досліджень за ІІІ режимом склала 86%. Збіжність результатів розрахунку і експериментальних досліджень у режимі співудару склала 93%.

Результатами повторних розрахунків фактично співпали з результатами експериментальних досліджень, що свідчить про достовірність розрахункової схеми.

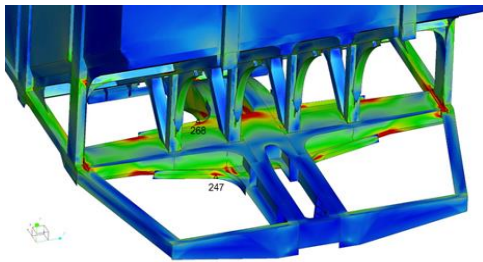
Після отримання позитивних результатів розрахунків з результатами експериментальних досліджень було виконане доопрацювання конструкції шворневого вузла з метою його підсилення. Для зменшення напружень, отриманих в ході випробувань вагона, в верхньому і нижньому листах шворневої балки було виконано армування крайок даних листів. Армування виконано листом товщиною 16 мм зі сталі класу міцності 390 МПа. Схема розташування армування крайок наведена на рис. 7.



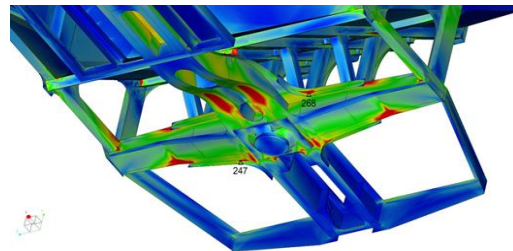
*Рис. 7. Схема виконання армування листів шворневої балки вагона-хопера моделі 19-4152*

Розрахунок на міцність підсиленого вузла показав суттєві зниження напружень в елементах конструкції шворневого вузла:

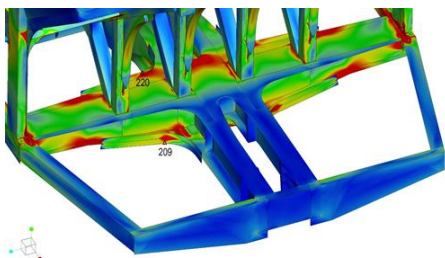
- за I режимом – до 268 МПа (рис. 8 – 9);
- за III режимом – до 220 МПа (рис. 10 – 11);
- у режимі співудару – до 322 МПа (рис. 12 – 13).



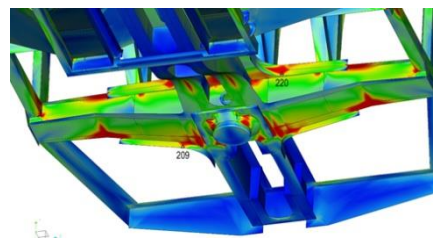
*Рис. 8. Напружено-деформований стан шворневого вузла після підсилення за I режимом (вид зверху), МПа*



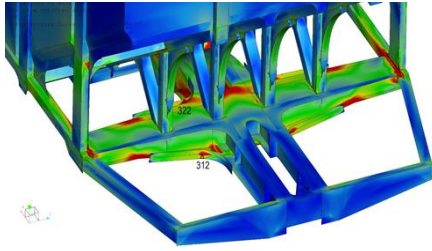
*Рис. 9. Напружено-деформований стан шворневого вузла після підсилення за I режимом (вид знизу), МПа*



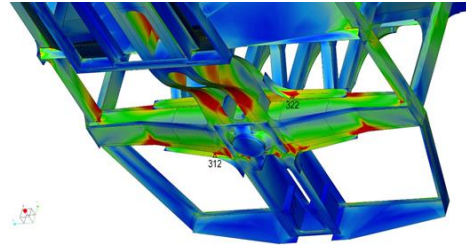
*Рис. 10. Напружено-деформований стан шворневого вузла після підсилення за III режимом (вид зверху), МПа*



*Рис. 11. Напружено-деформований стан шворневого вузла після підсилення за III режимом (вид знизу), МПа*



*Рис. 13. Напружено-деформований стан шворневого вузла після підсилення у режимі співудару (вид зверху), МПа*



*Рис. 14. Напружено-деформований стан шворневого вузла після підсилення у режимі співудару (вид знизу), МПа*

Після підсилення шворневого вузла проведені додаткові експериментальні дослідження. Аналіз результатів показав, що максимальні сумарні напруження від статичних випробувань на міцність та на співудар в зоні підсилення склали 369 МПа та 384 МПа. Збіжність результатів теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень склала 84% – 87%, що є задовільним результатом та підтверджує адекватність розрахункової схеми та достовірність можливих результатів розрахунків по іншим елементам конструкції вагона-хопера.

Експериментальні дослідження виконані тензометричним методом, причому особлива увага приділялася вимірюванню деформацій в шворневому вузлі, як найбільш навантаженому.

Обробка даних статичних випробувань на міцність виконувалася з використанням автоматизованих комплексів обробки дослідних даних з використанням статистичних методів.

Вимірювана величина при статичних випробуваннях визначалася за різницею показань засобів вимірювальної техніки до навантаження і після нього:

$$\sigma = (\Delta - \Delta_0) \cdot K, \quad (1)$$

де  $\Delta$  – показання засобів вимірювальної техніки в завантаженому стані об'єкта випробувань;

$\Delta_0$  – показання засобів вимірювальної техніки в порожньому стані об'єкта випробувань;

$K$  – калібрувальний коефіцієнт засобів вимірювальної техніки, визначений за формулою (2).

$$K = \frac{R_o}{R_{ш} \cdot A_{ш}}, \quad (2)$$

де  $R_o$  – опір тензорезистора, Ом;

$R_{ш}$  – опір калібрувального шунта, Ом;

$A_{ш}$  – амплітуда (відхилення) процесу, яка виміряна при калібруванні, В.

Напруження  $\sigma$ , МПа, в елементах конструкції у місцях встановлення тензорезисторів визначені за формулою для одиночних тензорезисторів (3):

$$\sigma = a \cdot \frac{R_{\delta}}{R_{ш}} \cdot \frac{E}{K_m}, \quad (3)$$

де  $a$  – амплітуда (відхилення) процесу, В;  
 $R_{\delta}$  – опір тензорезистора, Ом;  
 $R_{ш}$  – опір калібрувального шунта, Ом;  
 $A_{ш}$  – амплітуда (відхилення) процесу, виміряна при калібруванні, В;  
 $E$  – модуль пружності матеріалу досліджуваної деталі, МПа;  
 $K_m$  – коефіцієнт чутності тензорезистора.

Отримані в результаті обробки даних напруження від статичного навантаження бруто використовувалися для оцінки міцності конструкції вагона у режимі співудару.

Оцінка міцності конструкції за результатами випробувань на співудар виконувалася за формулою (4):

$$(\sigma_{верт.} + \sigma_{уд.}) \leq \sigma_m. \quad (4)$$

де  $\sigma_{верт.}$  – напруження від дії вертикального навантаження бруто, МПа;  
 $\sigma_{уд.}$  – напруження від дії удару зусиллям 3,5 МН;  
 $\sigma_m$  – межа текучості матеріалу, МН.

**Висновки.** На підставі аналізу результатів експериментальних досліджень встановлено:

– для підвищення міцності і надійності несучих вузлів і деталей бункерних вагонів, що працюють в умовах тривалого й інтенсивного впливу динамічних навантажень, потрібно використовувати матеріали підвищеного класу міцності від 390 і вище;

– необхідно розробляти і застосовувати принципово нові конструктивні форми найбільш напружених вузлів з метою перерозподілу та зниження навантажень.

Незважаючи на проведену модернізацію та виконане підсилення шворневого вузла вагона-хопера моделі 19-4152, максимальні напруження в цьому вузлі складають 98,5% від допустимого нормативного значення. Зазначене свідчить, що шворневий вузол залишається одним з найбільш напружених елементів вагона та потребує детального вивчення при виконанні подальших досліджень.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Федосов-Никонов Д.В., Кельріх М.Б. Дослідження на міцність конструкції довгобазної платформи. // «Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля». – №1. – 2016. – С. 90-94.
2. Мямлин С.В. Программа моделирования пространственных колебаний подвижного состава / С.В. Мямлин // *Залізничний транспорт України*. – 2000. – № 3. – С. 52 – 54.
3. Мямлин С.В. Методика моделирования пространственных колебаний железнодорожного экипажа / С.В. Мямлин // *Залізничний транспорт України*. – 2001. – № 2. – С. 2 – 5.

4. *Makeev S.V.* Расчет на прочность вагона-хоппера модели 19-923 для минеральных удобрений // *Механика. : Научные исследования и учебно-методические разработки.* – Гомель: Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ, Гомель) – ISSN: 2227-1104. – 2009. – С. 71-78.
5. *Фомін, О.В.* Розробка методики впровадження різних профілів в якості складових елементів несучих систем вантажних вагонів [Текст] / О.В. Фомін // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ».* – Харків. – 26'2012. – С. 29 – 33.
6. *Рахимов Р. В.* Исследования напряженно-деформированного состояния кузова вагона-хоппера для перевозки цемента // *Молодой ученый.* – 2015. – №13. – С. 178-182.
7. ДСТУ 7598:2014 «Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних)».
8. *Фомін, О.В.* Варіаційне описання конструктивних виконань вантажних вагонів/ О.В Фомін, А.В. Гофра // *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології».* – Київ: ДЕТУТ, 2015. – Вип. 26-27. – С. 137-147.
9. *Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колее 1520 мм (несамоходных), ГосНИИВ-ВНИИЖТ, М., 1996 г., с изменениями и дополнениями (01.02.2000 г. и 01.03.2002 г.).*
10. *Мороз В. І.* Визначення перспективних напрямків удосконалення конструкції напіввагонів виробництва ДП «Укрспецвагон» // *Зб. наук. праць.* – Харків: УкрДАЗТ. – 2008. – С. 72-81.
11. *Мороз, В. І.* Математичний запис задачі оптимізаційного проектування напіввагонів за критерієм мінімальної матеріалоємності. // *Зб. наук. праць.* – Харків: УкрДАЗТ (2009). – С. 121-131.

## REFERENCES

1. Fedosov-Nikonov D.V., Kelrich M.B. (2016). Doslidennja na miznist konstrukcii dovgobaznoj platformi [Research on the structural strength of the long-wheelbase platform] *Visnik CNU im. V. Dalj*, 1, 90-94.
2. Mjamlin S.V. (2000) Programma modelirovanija prostranstvenich kolebanij podviznogo sostava [The program of modeling of spatial oscillations of rolling stock] *Zalznitschnij transport* 3, 52-54.
3. Mjamlin S.V. (2000) Metodika modelirovanija prostranstvenich kolebanij zeleznodoroznogo ekipaza [Modeling of spatial vibrations of the train crew] *Zalznitschnij transport* 2, 2-5.
4. Makeev S.V. (2009) Rastschet na protschnost vagona-chopera modeli 19-923 dlja mineralnich udobrenij, [Calculation of the strength of the hopper car model 19-923 for mineral fertilizers журнал], *gurnal «Mechanika. Nauchnie issledovanija i utshebno metoditscheskie razrabotki» BelGUT. Gomel. ISSN: 2227-1104, 71-78.*
5. Fomin O.V. (2012). Rozrobka metodiki vprovadnennja riznih profiliv v jacosti skladovih elementiv nesuchih system vantaznih vagoniv [Development of a method for the introduction of various profiles as components of carrier systems of freight cars] / O.V. Fomin // *Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI».* – Kharkiv. – 26,' pp.29-33.
6. Rachimov R.V. Issledovanija naprjagenno-deformirovanogo sostojanija kuzova vagona-chopera dlja perevozki zementa (2015). [Studies of the stress-strain state of the hopper car body for cement transportation]. *Molodoj utschenij*, 13,178-182.
7. DSTU 7598: 2014 " freight Cars. General requirements for the calculation and design of new and upgraded track cars 1520 mm (non-self-propelled)".
8. Fomin O.V. (2015). Variacijne opisannja konstruktivnih vikonan' vantaznih vagoniv [Variations describe the structural designs of freight cars] / O.V. Fomin, A.V. Gostra // *Proceedings of the State Economic and Technological University of Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine series "Transport systems and technologies".* Kyiv: DETUT, is. 26-27, pp.137-147.
9. Rules for calculation and design of cars of the Railways, MPs 1520 mm (dumb), Gogniev-VNIIZHT, Moscow, 1996, with amendments and additions (01.02.2000 G. and G. 01.03.2002).
10. Moroz, V. I. (2008). Vyznachennia perspektyvnykh napriamkiv udoskonalennia konstruktssii napivvagoniv vyrobnytstva DP «Ukrspetsvagon» [Determination of the promising direction for improvement of the open car design of SE" Ukrspetsvagon"]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi Derzhavnoi Akademii Zaliznychnoho Transportu*, 72-81.
11. Moroz V.I. (2009) Matematychnyy zapys zadachi optymizatsiynoho proektuvannja piv-vahoniv za kryteriyem minimal'noyi materia-loyemnosti [Mathematical notation of problem of optimizing design of open goods wagons by criterion of the minimum material capac-ity]. *Zbirnyk naukovykh prats* [Collection of scientific papers]. Kharkiv. Ukrainian State University of Railway Transport. No 111, p.p. 121-131.



**В.В. Ильчишин,**  
*(главный инженер, руководитель испытательного центра  
ПВ ГП «УкрНИИВ»);*

**А.Н. Стрынжа,**  
*(заведующий лабораторией ГП «УкрНИИВ»);*

**В.А. Худиенко,**  
*(заместитель заведующего лабораторией ГП «УкрНИИВ»);*

**В.Н. Полулях,**  
*(научный сотрудник ГП «УкрНИИВ»);*

**В.А. Шушмарченко**  
*(младший научный сотрудник ГП «УкрНИИВ»)*

### **ПРОЧНОСТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ БУНКЕРНОГО ВАГОНА**

*В статье рассмотрены вопросы теоретического и экспериментального исследования прочности элементов конструкции вагона-хоппера крытого для зерна и других пищевых грузов. Выполнен анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований напряженно-деформированного состояния рамы вагона-хоппера методом конечных элементов (МКЭ).*

**Ключевые слова:** *вагон-хopper, прочность элементов, расчетные и экспериментальные напряжения.*

**VasylII Ilchyshyn,**  
*(Head Engineer, Head of the Testing Center for railcar-building products of State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute» TC RP DP «UkrNDIV»);*

**Andrii Strynzha,**  
*(Head of Laboratory of «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute» DP «UkrNDIV»);*

**Viktor Khudiienko,**  
*(Deputy Head of Laboratory of «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute» DP «UkrNDIV»);*

**Vitalii Poluliakh,**  
*(Research scientist of «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute» DP «UkrNDIV»);*

**VasylII Shushmarchenko,**  
*(Junior researcher scientist of «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute» DP «UkrNDIV»)*

### **STRENGTH RESEARCH OF ELEMENTS OF THE BUNKER WAGON CONSTRUCTION**

*The article deals with the theoretical and experimental study of the strength of the structural elements of the hopper car covered for grain and other food cargoes. The results of experimental and theoretical studies of the stress-strain state of the hopper car frame by the finite element method (fem) are analyzed. Analysis of the results showed that the convergence*

*of the results of theoretical and experimental studies is 84% – 87%, which is a satisfactory result and confirms the adequacy of the design scheme and the reliability of the possible results of calculations for other elements of the design of the hopper car.*

*Experimental studies were performed by the tensometric method. Special attention was paid to the measurement of deformations in the pivot assembly as the most loaded element.*

*Data processing of static strength tests was performed using automated complexes of experimental data processing using statistical methods. Despite the modernization and strengthening sordevolo node for hopper model 19-4152, the maximum voltage at that node 98,5% of the permissible normative values. This indicates that the pivot point remains one of the most stressed elements of the car and requires detailed study when performing further studies.*

*The analysis of published literature sources shows that the problems associated with the strength of the hopper cars are relevant not only in Ukraine but also in the cis countries.*

**Keywords:** *hopper car, element strength, design and experimental stresses.*