

УДК 629.463.001.63

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-2/31>**Фомін О.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Прокопенко П.М.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Бурлуцький О.В.**

Український державний університет залізничного транспорту

**Фоміна А.М.**

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

## КОНТРОЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ ВАНТАЖНОГО ВАГОНА З МЕТОЮ ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ

Останніми роками відбулося значне старіння експлуатаційного парку вантажних вагонів, у тому числі напіввагонів. Нині у мережі залізниць України перебувають в експлуатації напіввагони (далі – вагони) різних моделей і їхніх модифікацій з нормативним строком служби 22 роки. Для вирішення питання про можливість подальшої експлуатації вагонів з вичерпаним терміном служби проводиться їхнє технічне діагностування. Аналіз технічного стану напіввагонів після проведення планових видів ремонту показує, що значна їх частина перебуває у задовільному стані. Через недостатнє фінансування придбання нових вагонів для забезпечення безперебійного виконання вантажних перевезень залізничним транспортом актуальним залишається проведення робіт з визначення залишкового ресурсу напіввагонів та можливості продовження їх експлуатації в межах України понад полуторний термін.

**Ключові слова:** залізничний транспорт, вантажний вагон, напіввагон моделі 12-532, рама кузова, хребтова балка, ударні випробування, ресурс, термін служби.

**Постановка проблеми.** Варто сформулювати необхідність проведення контрольних випробувань вагонів, їх технічного діагностування та визначити особливості досліджень. Провести теоретичні дослідження з оцінки залишкового ресурсу конструкції напіввагона. Аналіз технічного стану напіввагонів після проведення планових видів ремонту показує, що значна їх частина перебуває у задовільному стані. Проте можливість продовження їхньої експлуатації на строк понад полуторний потребує експериментального підтвердження.

**Аналіз літературних даних.** Натепер питанням дослідження несучої здатності кузовів напіввагонів приділено досить уваги, що пояснюється їх актуальністю та економічною обґрунтованістю. Так, у роботі [1] наведено результати досліджень несучої здатності напіввагонів моделі 12-9745. Проте метою таких досліджень було відшукування конструктивних резервів зі зниження матеріалоемності цієї моделі вагонів. І, відповідно, несуча здатність конструкції кузова з імітацією, характерних для 1,5 строку експлуатації зносів, не досліджувалась. У статті [2]

наведено перспективи удосконалення конструкцій напіввагонів, у тому числі і шляхом збільшення строку експлуатації. Однак збільшення строку експлуатації напіввагонів пропонується досягати шляхом удосконалення їхніх конструктивних властивостей, наприклад за рахунок упровадження матеріалів з поліпшеними характеристиками. Аналіз властивостей конструктивних матеріалів кузовів вагонів нового покоління наведений у [3]. У роботі зазначені переваги використання нових прогресивних матеріалів для окремих складових частин конструкцій вагонів. Однак питанням продовження реалізації такого напрямку у разі подовження строку експлуатації напіввагонів не приділено уваги. Заходи щодо удосконалення несучої конструкції кузова напіввагона з метою забезпечення надійності його кріплення на палубі залізничного порома наведені у [4; 5]. Розрахунок проведений у середовищі програмного забезпечення MSC Adams. Дослідження стійкості проти перекидання вагона здійснювалося у разі його вписування у криву радіусом 250 м з урахуванням різної швидкості руху. Питання оцінки точності

пропускної спроможності залізничних мереж, що призначені для перевезення сировини та готової продукції гірничо-металургійної промисловості, наведені у [6; 7]. Конструкційні особливості вагона для інтермодальних перевезень розглянуті у [8]. Вагон має понижену середню частину, а наявність оборотної частини дає можливість здійснювати завантаження/вивантаження автотехніки на/з нього самокатом. У роботі [9] наведено результати досліджень з визначення характеру та рівня впливу різних вантажних візків на міцнісні якості несучих систем вагонів. Однак у задачі такого дослідження не включались питання визначення відповідного впливу на кузови, які експлуатуються поза нормований строк. У дослідженнях [10; 11] аналізувались особливості функціонування засобів транспорту. А відповідні дослідження для одиниць з показниками, які відображають експлуатаційний знос, не проведені. Підсумовуючи результати наведеного вище аналізу, можна відзначити, що натепер питання щодо можливостей подовження строку експлуатації несучих конструкцій кузовів вагонів у повному обсязі не вирішувались.

**Постановка завдання та мета.** Метою роботи є висвітлення особливостей та результатів проведених комплексних випробувань напіввагона, визначення характеристик міцності його несучих конструкцій, їх залишкового ресурсу та можливість подовження строку експлуатації понад полуторний. Завданням типових випробувань на міцність у разі зіткнення є визначення й оцінка динамічних напружень і деформацій у несучих конструкціях вагона під час прикладання нормативних ударних сил через автозчепне обладнання. Завданням випробувань на ресурс є визначення появи і розвиток пошкоджень і залишкових деформацій у несучих конструкціях вагона за багаторазової дії поздовжніх навантажень через автозчепний пристрій. Для досягнення поставленої мети було визначено та вирішено такі задачі, як: вибір дослідного зразка вагона та аналіз його технічного стану; визначення швидкості корозії несучих елементів конструкції вагона; проведення комплексних натурних випробувань напіввагона, що включали оцінку власних частот коливань та контрольні ударні випробування за загальноприйнятою схемою.

Відбір дослідного зразка для досліджень. На випробування був представлений напіввагон моделі 12-532 № 64415821 (рис. 1) з терміном експлуатації, що перевищує полуторний, встановлений заводом-виробником.



Рис. 1. Дослідний напіввагон

Випробовування та діагностування технічного стану вагона були проведені на відповідність їх характеристик вимогам нормативної документації з метою визначення можливого терміну подовження його експлуатації. Під час проведення технічного діагностування вагона особлива увага приділялась несучим елементам конструкції, а саме хребтовій і шворневій балкам та місцям їх з'єднання.

**Опис конструкції дослідного зразка напіввагона.** Креслення загального виду напіввагона моделі 12-532 наведено на рисунку 1. Цей вагон має сталеву раму, що складається із хребтової балки, звареної із двох спеціальних Z-подібних профілів № 31 (310x9x183x10,5x130x16 мм) і двотавра № 19 (190x75x7 мм), двох шворневих балок замкненого коробчастого перерізу з двох вертикальних листів (товщиною 8 мм), двох горизонтальних листів (верхній товщиною 10 мм і нижній 12 мм), двох кінцевих балок зі штампованого листового профілю, чотирьох проміжних поперечних балок двотаврового перерізу, звареного з вертикального й двох горизонтальних листів.

Кришки розвантажувальних люків мають зварний каркас і обшивку з гофрованого сталевго листа. Ці кришки шарнірно прикріплені до двотавра хребтової балки і мають знизу торсіонний механізм для полегшення їх закривання.

**Випробування вагона скиданням з клинів.** За результатами випробувань «скидання з клинів» визначаються динамічні напруження в елементах рами та надресорній балці вагона. Відповідно до розробленої схеми контрольних точок була виконана установка тензорезисторів на надресорній балці та рамі. Під колеса напіввагона залежно від досліджуваних елементів конструкції вагона встановлюються клини, а потім проводиться скидання вагона з них шляхом його накатування на клин.

Розміри клину становлять: висота 21 мм, довжина 350 мм, ширина 50 мм.



**Рис. 2. Місця встановлення тензорезисторів на несучих елементах дослідного напіввагона**

Завантажений напіввагон накочується на клини за допомогою локомотива. Клини встановлюються по черзі: під всі колеса вагона (імітація підскакування); під колеса одного боку одного візка й іншого боку другого візка (імітація скручування); під всі колеса одного візка (імітація галопування); під колеса одного боку вагона (імітація бічної хитавиці).

У разі скидання вагона з клинів залежно від кількості використаних клинів і місця їх розташування під відповідними колесами візків вагона визначалися величини напружень залежно від виду коливання. Напруження під час випробувань скиданням з клинів та під час ресурсних ударних випробувань вимірювалися за допомогою тензодатчиків, що встановлювалися на елементах рами вагона та надресорній балці його візків (рис. 2).

**Визначення міцності напіввагона під час ресурсних ударних випробувань.** У разі проведення типових і ресурсних випробувань вагонів на співудар вимірюються такі показники, як: швидкість набігання вагона-бойка; сила удару в автозчеп; кількість циклів до відмови; напруження в елементах вагона, які досліджуються.

Для визначення поздовжніх зусиль, що діють на випробовуваний вагон у момент удару, застосовувався автозчеп-динамометр, обладнаний тензорезисторами і попередньо проградуйований статичним навантаженням на стенді. Автозчеп-

динамометр забезпечував реєстрацію діючих сил у діапазоні 3–3,5 МН.

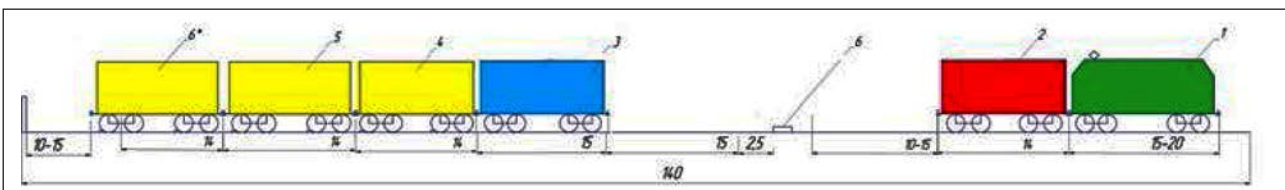
Випробування на співудар проводилися на прямій горизонтальній ділянці залізничної колії за допомогою локомотива. Крім локомотива, використовували таке обладнання: вагон-бойок масою 90,1 т; підпірний склад з трьох загальмованих вантажних вагонів загальною масою 300 т, розміщення яких було обмежено рейковими башмаками. Розбіжність між осями автозчепів дослідного вагона і вагона-бойка становила не більш 12 мм. Схему розміщення рухомого складу під час випробувань наведено на рисунку 3.

Обладнання, яке використовувалося для випробувань, засоби вимірювальної техніки і пристрої перебували в технічно справному стані, мали оформлені паспорти і повірочні тавра.

Ресурсні та випробування дослідного напіввагона на співудар виконувалися у такому порядку: завантаження вагона до номінальної вантажопідйомності; зважування завантаженого вагона; обладнання вагона спеціальним автозчепом-динамометром, попередньо проградуйованим статичним навантаженням до 3,5 МН; установка вагона на ділянку залізничної колії для випробувань, а також пікетів для визначення швидкості накочування вагона-бойка; випробування дослідного вагона на співудар, з проведенням вимірювань напружень у його несучих елементах, швидкості накочування та сили удару вагона-бойка за допомогою засобів вимірювальної техніки; огляд стану конструкції вагона після кожних 5 ударів за типових випробувань, а за ресурсних – після 10 ударів.

Співудари проводилися способом накочування вагона-бойка на випробовуваний вагон з допомогою локомотива. Ресурсні випробування виконувалися окремими серіями співударів, що за обсягами ушкоджень, що наносилися, відповідали впливу експлуатаційних динамічних дій на вагон за один рік його експлуатації. Після кожної серії співударів проводилася перевірка технічного стану вагона і його устаткування.

Ударні випробування були проведені з одиночним напіввагоном, який ударявся в групу загаль-



**Рис. 3. Розміщення рухомого складу під час випробувань, де: 1 – локомотив; 2 – вагон-бойок; 3 – дослідний напіввагон; 4, 5, 6 – підпірний склад**

мованих вагонними башмаками завантажених вагонів, що стояли на прямій ділянці залізничної колії. Завантажений вагон-бойок накочувався на вагон, установлений перед групою вагонів, локомотивом, який відчеплюється від вагона-бойка у разі досягненої ним приблизно заданої швидкості співударяння за GPS модулем.

**Визначення залишкового строку служби.** Для визначення залишкового строку служби вагона враховувалося вертикальне та поздовжнє динамічні навантаження, які виникають у процесі експлуатації. Розрахунок здійснювався за формулою:

$$T_r = \frac{(\frac{\sigma_{aN}}{[n]})^m \cdot N_0}{N_{cl} \cdot \sum_j (\sigma_{aj}^I)^m \cdot P_j^I + N_{clII} \cdot \sum_k (\sigma_{ak}^{II})^m \cdot P_k^{II}} \quad (1)$$

де  $T_r$  – розрахунковий залишковий строк служби вагона, роки;

$\sigma_{aN}$  – межа витривалості (по амплітуді) для контрольної зони за симетричного циклу та встановленого режиму навантаження за базового числа циклів, МПа;

$m$  – показник ступеня в рівнянні кривої втоми. Для зварних конструкцій із прокату без зміцнюючої обробки швів згідно з [5]  $m=4$ ;

$[n]$  мінімально допустимий коефіцієнт запасу опору втоми для вибраної зони вагона,  $[n]=1,5$ ;

$N_0$  – базове число циклів,  $N_0=10^7$ ;

$N_{cl} N_{clII}$  – число циклів за 1 рік експлуатації для кожного із експлуатаційного навантаження (вертикального та поздовжнього);

$\sigma_{aj}^I, \sigma_{aj}^{II}$  – амплітуди динамічних напруг, приведені до симетричного циклу для кожного із експлуатаційних навантажень та їх діапазонів, МПа;

$P_j$  – ймовірність появи амплітуди з рівнем  $\sigma_{aj}$ .

$$\sigma_{aN} = \sigma_{aN}^- (1 - Z_p v), \quad (2)$$

де  $Z_p$  – квантиль розподілення, що відповідає односторонній ймовірності 95%,  $Z_p=1,645$ ;

$v$  – коефіцієнт варіації порогу витривалості деталі:

– для зварних рам і балок з листового і фасонного прокату у разі автоматичної зварки під слоєм флюса і всередині захисного газу  $v = 0,05$ ;

– також у разі напівавтоматичної і ручної зварки  $v = 0,07$ ;

$\sigma_{aN}^-$  – середнє розрахункове значення порогу витривалості рами:

$$\sigma_{aN}^- = \frac{\sigma_{-1}}{(K_{\sigma})_k},$$

$\sigma_{-1}$  – середнє значення порога витривалості гладкого стандартного зразка із матеріалу рами у разі симетричного циклу згину на базі  $N_0$ .

$(K_{\sigma})_k$  – середнє значення коефіцієнта зниження порога витривалості рами стосовно порога витривалості гладкого стандартного зразка,  $(K_{\sigma})_k = 4,5$ .

10.3.  $N_c$  – кількість циклів вертикальних коливань завантаженого вагона, які виникають за його строк служби один рік:

$$N_c = 365 \cdot f_e \frac{L_c \cdot 0,5 \cdot 10^3}{\bar{v}_T} \cdot T_k; \quad (3)$$

$T_k$  – розрахунковий строк служби вагона;

$L_c$  – проектний середньодобовий пробіг вагона (приймаємо 162 км, за даними ГІОЦ АТ «УЗ»);

$\bar{v}_T$  – проектна середня технічна швидкість руху вагона 22,4 м/с;

0,5 – коефіцієнт порожнього пробігу;

$f_e$  – ефективна частота процесу зміни динамічних навантажень визначається за результатами скидання з клинів або за формулою.

$K_{di}$  – визначається з використанням формули:

$$K_{di} = \frac{\bar{K}_{di}}{\omega} \sqrt{\frac{4}{\pi} \ln \frac{1}{1 - P(K_{di})}}. \quad (4)$$

Середнє можливе значення визначається за формулами:

– При  $V \geq 15$  м/с:

$$\bar{K}_{di} = a + 3,6 \cdot 10^4 \cdot b \cdot \frac{V-15}{f_{st}} \quad (5)$$

– При  $V \leq 15$  м/с:

$$\bar{K}_{di} = a \cdot \frac{V}{15}, \quad (6)$$

де  $a$  – коефіцієнт рівний для елементів кузова – 0,05;

$b$  – коефіцієнт, який враховує вплив кількості осей  $p$  у візку або групі візків під одним кінцем екіпажа,

$$b = \frac{n+2}{2n};$$

$V$  – розрахункова швидкість руху, м/с;

$f_{st}$  – статичний прогин ресорного підвищення, м.

Загальна розрахункова кількість циклів протягом розрахункового періоду експлуатації вагона для загальної мережі пробігу визначається за формулою:

$$N_{zag}^{rozr} = N_{zag}^{yd} \cdot T_{rozr} \cdot K_{rez} \cdot K_{yd}, \quad (7)$$

де  $N_{zag}^{yd}$  – загальна кількість циклів дії ударних поздовжніх сил за 1 рік середньої мережі експлуатації на конструкцію вагона такого типу, для розподілів (без урахування квазістатичних сил) становить:

– для вантажних вагонів  $N_{zag}^{yd} \approx 20200$  циклів;

$T_{rozr}$  – розрахунковий період експлуатації вагона (1 рік);

$K_{rez}$  – коефіцієнт, що враховує вплив порожнього пробігу вагона, в оцінці циклічної довговічності несучих елементів  $K_{рез}$ , (для вагона зерновоза  $K_{нор}=0,39$ ):

$$K_{rez} = 1 - K_{por} \quad (8)$$

$K_{yd}$  – коефіцієнт, що враховує несиметричність навантаження конструкції вагона по його довжині у разі зіткнень і рівномірності додатку ударних сил до автозчеплення з обох кінців вагона (в оцінці циклічної довговічності елементів консольної частини вагона рекомендується приймати рівним 0,6).

Вибір режиму навантаження здійснюється з урахуванням співвідношення середньодобового пробігу до загальномережевого.

Для напіввагонів для зерна:

$$N_{zag}^{rozr} = 20200 \cdot 1 \cdot 0,61 \cdot 0,6 \cdot \frac{192}{290} = 4879 \text{ циклів за 1 год}$$

**Висновки.** Аналіз дефектів, що виникають у конструкціях вантажних вагонів на всіх етапах їхнього життєвого циклу, дає змогу прогнозувати їх пошкодження в експлуатації та систематизувати ймовірні причини їх виникнення.

На основі проведеного аналізу технічного стану та несучих конструкцій напіввагонів вітчизняного виробництва, з характерними для 1,5 строку експлуатації зносами, визначено фактичні значення

зносів несучих елементів кузовів напіввагонів та розроблено уточнені розрахункові скінчено-елементні моделі несучих конструкцій вантажного вагона на прикладі напіввагона моделі 12-757.

Проведено розрахунок на міцність несучої конструкції кузова напіввагона з характерними для 1,5 строку експлуатації зносами та отримано значення максимальних еквівалентних напружень у його несучих елементах за основних режимів експлуатаційних навантажень. Чисельні значення максимальних еквівалентних напружень при цьому не перевищують допустимі, що дає змогу зробити висновок про можливість подальшої експлуатації вагона.

Матеріали цієї публікації отримано в процесі виконання заявки проєкту Ф84 ДФФД.

За результатами контрольних випробувань напіввагона моделі 12-532, строк служби якого перевищував полуторний (1980 р. виробництва), встановлено, що напруження в його несучих конструкціях не перевищують допустимих значень. Пошкодження рами вагона у вигляді деформацій, тріщин, розривів за основним металом та зварними швами відсутні.

#### Список літератури:

1. Fomin O.V., Burlutsky O.V., Fomina Yu.V. Development and application of cataloging in structural design of freight car building. Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». № 2. 2015. 250 p.
2. Фомін, О.В. Розробка методики впровадження різних профілів як складових елементів несучих систем вантажних вагонів. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Харків, 2012. 29 с.
3. Freight cars major metals. Trains. 2015. 20 p.
4. Lovska A.A. Peculiarities of computer modeling of strength of body bearing construction of gondola car during transportation by ferry-bridge, Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». № 1. 2015. 49 с.
5. Mirosław Nader, Marian Sala, Jarosław Korzeb, Arkadiusz Kostrzewski. Kolejowy wagon transportowy jako nowatorskie, innowacyjne rozwiązanie konstrukcyjne do przewozu naczep siodłowych i zestawów drogowych dla transportu intermodalnego. Logistyka № 4. 2014. 2272 p.
6. Фомін О.В., Гостра А.В. Варіаційне описання конструктивних виконань вантажних вагонів. Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України. Серія «Транспортні системи і технології». Київ : ДЕТУТ, 2015. 137 с.
7. Divya Priya G., Swarnakumar A. Modeling and analysis of twenty tonne heavy duty trolley. Intern. J. of Innovative Technology and Research. 2014. 1568 p.
8. Krason W., Niezgoda T. FE numerical tests of railway wagon for intermodal transport according to PN-EU standards. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. 2014. 843 с.
9. Мороз В.І. Математичний запис задачі оптимізаційного проектування напіввагонів за критерієм мінімальної матеріалоемності. Зб. наук. праць. Харків : УкрДАЗТ, 2009. 121 с.
10. Kondratiev A., Slivinsky M. Method for determining the thickness of a binder layer at its non-uniform mass transfer inside the channel of a honeycomb filler made from polymeric paper. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol 6/5 (96). P. 42–48. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.150387.
11. Kondratiev A., Gaidachuk V. Weight-based optimization of sandwich shelled composite structures with a honeycomb filler. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol 1/1 (97). P. 24–33. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154928.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГРУЗОВОГО ВАГОНА С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

*За последние годы произошло значительное старение эксплуатационного парка грузовых вагонов, в том числе полувагонов. В настоящее время на сети железных дорог Украины находятся в эксплуатации полувагоны (далее – вагоны) различных моделей и их модификаций с нормативным сроком службы 22 года. Для решения вопроса о возможности дальнейшей эксплуатации вагонов с истекшим сроком службы проводится их техническое диагностирование. Анализ технического состояния полувагонов после проведения плановых видов ремонта показывает, что значительная их часть находится в удовлетворительном состоянии. Из-за недостаточного финансирования приобретения новых вагонов для обеспечения бесперебойного выполнения грузовых перевозок железнодорожным транспортом актуальным остаётся проведение работ по исследованию определения остаточного ресурса полувагонов и возможности продолжения их эксплуатации в пределах Украины более полуторного срока.*

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, грузовой вагон, полувагон модели 12-532, рама кузова, хребтовая балка, ударные испытания, ресурс, срок службы.

## **CONTROL TESTING OF FREIGHT WAGON WITH THE AIM OF ASSESSING THE RESIDUAL RESOURCE OF NON-CONSTRUCTION STRUCTURES**

*In recent years, there has been a significant aging of the freight fleet of freight cars, including gondolas. At present, the railways of Ukraine are in service gondola cars (hereinafter – cars) of different models and their modifications with a normative term of service of 22 years. To resolve the issue of the possibility of further operation of wagons with expired service life, their technical diagnosis is carried out. Analysis of the technical state of gondolas after the planned repairs shows that a significant part of them is in satisfactory condition. Due to the lack of financing, the purchase of new cars to ensure uninterrupted performance of freight transport by rail remains relevant for research on determining the residual life of gondolas and the possibility of extending their operation within Ukraine for more than a half-year.*

**Key words:** railway transport, freight wagon, semi-wagon model 12-532, body frame, spindle beam, shock tests, life, service life.