

Ватуля Г.Л.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

Ловська А.О.

Український державний університет залізничного транспорту

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ОБШИВКИ ДАХУ ВАГОНА-ХОПЕРА ІЗ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

У статті наведено результати дослідження міцності обшивки даху вагона-хопера для перевезень зерна. При цьому для зменшення його тари та можливого збільшення вантажопідйомності запропоновано впровадження у якості обшивки даху композиційного матеріалу. Дослідження проведено на прикладі даху вагона-хопера моделі 19-7016. Оскільки каркас даху виготовлено зі сталі, яка є ізотропним матеріалом, а обшивка – із композиту, який має ортотропні властивості, то розрахунок обшивки на міцність здійснено окремо від каркасу. При цьому використано метод скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation. Розрахунок проведено за критерієм максимальних напружень. До уваги прийнято основні схеми навантажень даху в експлуатації: дія вертикальних сил на дах; дія двох сил по 1,0 кН кожна, розподілених на площадці 0,25 м x 0,25 м і прикладених на відстані 0,5 м одна від одної; дія снігового навантаження; дія зовнішнього тиску у 30 кПа.

При складанні скінчено-елементної моделі застосовані тетраедри. Закріплення обшивки здійснювалось в зонах її прилягання до каркасу за периметром, а також в зонах обтирання на підкладні листи.

Результати розрахунків показали, що міцність даху при всіх розглянутих схемах навантажень забезпечується. Максимальні напруження в обшивці виникають при дії на неї зовнішнього тиску у 30 кПа і складають 104,4 МПа, що нижче за допустимі.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування сучасних конструкцій залізничних вагонів з покращеними техніко-економічними показниками.

Ключові слова: транспортна механіка, дах вагона-хопера, навантаженість даху, міцність даху, напружений стан даху.

Вступ. Перспективи розвитку економіки євразійських країн зумовлюють підвищення ефективності експлуатації транспортної галузі. Одним із найбільш поширених типів вантажів, які експортуються з України у країни Європи є зернові. Для їх перевезень залізницею використовуються вагони-хопери (рис. 1 [1]).

Для підвищення ефективності експлуатації вагонів-хоперів в сучасних умовах конкурентної боротьби на ринку перевізних послуг, важливим є покращення їх техніко-економічних показників. Досягти цього можливо шляхом зменшення тари вагона-хопера. Це сприятиме можливості підвищення вантажопідйомності вагона, а відповідно



а)



б)

Рис. 1. Вагони-хопери для перевезень зерна а) модель 19-7053; б) модель 19-7016

і підвищенню ефективності експлуатації. Тому дослідження присвячені покращенню техніко-економічних показників вагона-хопера є актуальними.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Зменшення тари вагона-хопера можливо досягти, наприклад, удосконаленням конструкції його даху. Питання удосконалень дахів вагонів висвітлюються в чималій кількості наукових публікацій. Так, наприклад, для зменшення тари критого вагона в роботі [2] запропоновано виготовлення обшивки його даху із композиційного матеріалу. Проведено визначення основних показників динаміки критого вагона з урахуванням зменшення його тари. Однак, необхідно сказати, що авторами не проводилося визначення міцності даху критого вагона з урахуванням запропонованого удосконалення.

В роботі [3] проводиться визначення міцності удосконаленої несучої конструкції вантажного вагона при основних експлуатаційних режимах навантаження. Встановлено, що показники міцності несучої конструкції вагона, в тому числі і даху, знаходяться в межах допустимих. Разом з цим авторами не враховано навантажень, які окремо діють на дах в експлуатації.

Оцінка напруженого стану даху залізничного вагона висвітлюється в роботі [4]. Дослідження проведено на прикладі вагона-рефрижератора. Авторами роботи приділено увагу питанням визначення стійкості даху при експлуатаційних навантаженнях, а також впливу на нього вібрацій. Разом з цим, розрахунок проведено з використанням європейських стандартів, які властиві для вагонів колії 1435 мм. Тобто визначення навантаженості даху при експлуатації його на вагонах колії 1520 мм авторами не проводилося.

Для підвищення ефективності експлуатації напіввагонів у роботі [5] запропоновано конструкцію зйомного даху з телескопічними консольними частинами. Таке рішення дозволяє його використання на напіввагонах різних моделей. Наведено обґрунтування конструкційних особливостей

даху, а також результати його розрахунку на міцність. Разом з цим, при розрахунку на міцність даху автори обмежилися основними схемами його навантажень у експлуатації.

Особливості визначення міцності даху залізничного вагона розглянуто у роботі [6]. Авторами досліджено падіння вантажу, у вигляді шматку бетону, на дах з висоти 3 м. Наведено порівняльний аналіз показників міцності даху із композиту та алюмінію. Важливо сказати, що дана задача є досить нетривіальною та не висвітлює режимів навантаження даху при основних експлуатаційних схемах.

Проведений аналіз літературних джерел доводить, що питання визначення міцності даху вагона-хопера є досить актуальними.

Мета та основні завдання статті. Метою статті є висвітлення особливостей визначення міцності обшивки даху вагона-хопера із композиційного матеріалу при основних експлуатаційних схемах навантажень. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

- обґрунтувати доцільність використання композиційного матеріалу для виготовлення обшивки даху вагона-хопера;

- провести розрахунок на міцність обшивки даху вагона-хопера із композиційного матеріалу.

Викладення основного матеріалу статті.

Проведені у попередніх дослідженнях авторів розрахунки типової конструкції даху вагона-хопера дозволили зробити висновок, що його міцність при основних розрахункових режимах забезпечується, оскільки напруження, які виникають в ньому при жодній розрахунковій схемі не перевищують допустимі – 220 МПа [7]. Крім того, мається резерв міцності складових даху. Розрахунок реалізовано на прикладі даху вагона-хопера моделі 19-7016 (рис. 2).

Для зменшення тари вагона-хопера можливим є використання для його виготовлення матеріалів з покращеними фізико-механічними властивостями, які мають зменшену у порівнянні зі сталлю масу.



Рис. 2. Просторова модель даху а) вид зверху; б) вид знизу

Розрахунок реалізовано на прикладі композиту, який має фізико-механічні властивості, наведені в табл. 1 [8].

Таблиця 1

Основні фізико-механічні властивості композиту

Назва параметру	Значення
Модуль пружності, МПа	$2,42 \cdot 10^5$
Коефіцієнт Пуасона	0,394
Модуль зсуву, МПа	318,9
Масова щільність, кг/м ³	2200
Межа міцності в напрямку волокон, МПа	1100–1300
Межа міцності в поперечному напрямку волокон, МПа	650

У відповідності до [7] товщину листів гладкої сталевобі обшивки кузовів вагонів, якщо її не обумовлено у вхідних даних на проектування, рекомендовано приймати 1,5–2,0 мм. При цьому перше значення товщини (1,5 мм) стосується листів з корозійностійких сталей, а друге (2,0 мм) – листів з інших сталей.

У зв'язку з тим, що відомості про товщину обшивки у випадку її виготовлення із композиту відсутні, то на даному етапі дослідження її товщину прийнято рівною 1,5 мм. З урахуванням цього маса обшивки даху складає 351,19 кг. Тоді загальна маса даху вагона-хопера дорівнює 1361,17 кг, що на 22,33% менше маси типової конструкції. З використанням обшивки із композитного матеріалу для даху вагона його загальна тара зменшиться на 1,7% у порівнянні з прототипом.

Для визначення міцності обшивки даху із композиційного матеріалу проведено її розрахунок. Оскільки каркас даху виготовлено зі сталі, яка є ізотропним матеріалом, а обшивка – із композиту, який має ортотропні властивості, то розрахунок обшивки здійснено окремо від каркасу. При цьому закріплення обшивки здійснювалось в зонах її прилягання до каркасу за периметром, а також в зонах обпирання на підкладні листи (лапи). Для цього на ній встановлювалися накладки, площа яких ідентична до геометрії лап.

З урахуванням цього просторова модель обшивки має вигляд, наведений на рис. 3.

При проведенні розрахунку на міцність до уваги приймалися такі схеми навантажень даху [7]:

- дія вертикальних сил на дах, які обумовлені поєднанням сили ваги даху та вертикальної динамічної сили, яка визначається множенням сили ваги даху на коефіцієнт вертикальної динаміки (I схема навантаження);

- дія двох сил по 1,0 кН кожна, розподілених на площадці 0,25 м x 0,25 м і прикладених на відстані 0,5 м одна від одної в будь-якій частині даху (II схема навантаження);

- дія снігового навантаження (III схема навантаження);
- дія зовнішнього тиску у 30 кПа. При цьому коефіцієнт запасу стійкості даху повинен бути не менше ніж 1,1 (IV схема навантаження).

Розрахунок проведено за методом скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation [9–11]. При цьому застосовано критерій максимальних напружень.

При складанні скінчено-елементної моделі застосовані тетраедри. Кількість елементів скінчено-елементної моделі склала 304284, а вузлів – 96103. Максимальний розмір елемента становить 40 мм, а мінімальний – близько 13 мм.

Результати розрахунків наведено на рис. 4–11.

Результати проведених розрахунків доводять, що впровадження композитної обшивки даху вагона-хопера з точки зору зменшення його тари та забезпеченні умов міцності при основних експлуатаційних режимах навантажень є доцільним. Напруження, які виникають в ньому при всіх розглянутих схемах є значно нижчими за допустимі. Це обумовлено значною межею міцності розглянутого у якості прикладу, матеріалу.

Висновки.

1. Для зменшення тари вагона-хопера запропоновано виготовлення обшивки даху із композиційного матеріалу. Встановлено, що з урахуванням запропоновано рішення маса даху вагона-хопера зменшується на 22,33% за масу типової конструкції. З використанням обшивки із композитного

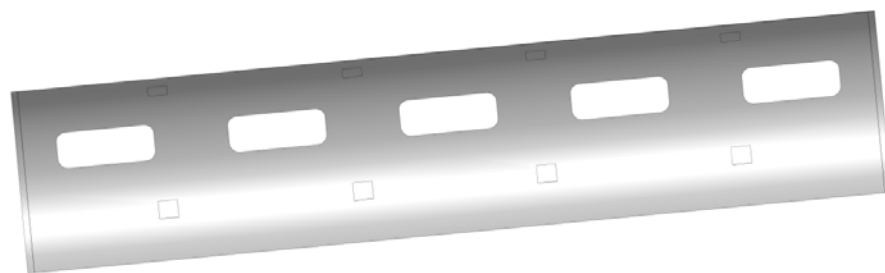


Рис. 3. Просторова модель обшивки даху

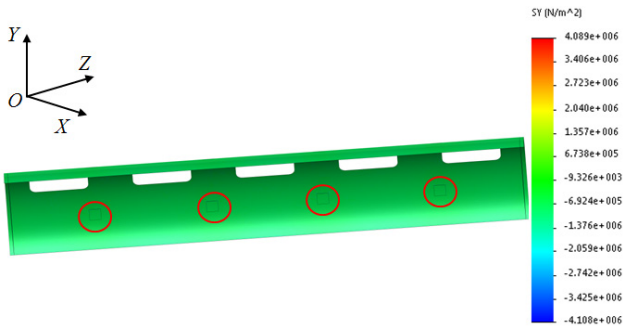


Рис. 4. Напружений стан обшивки даху (I схема навантаження)

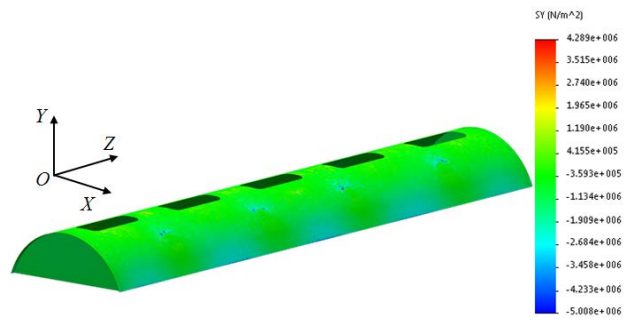


Рис. 8. Напружений стан обшивки даху (III схема навантаження)

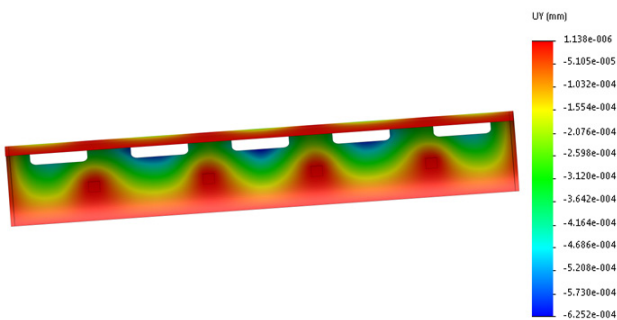


Рис. 5. Переміщення в обшивці даху (I схема навантаження)

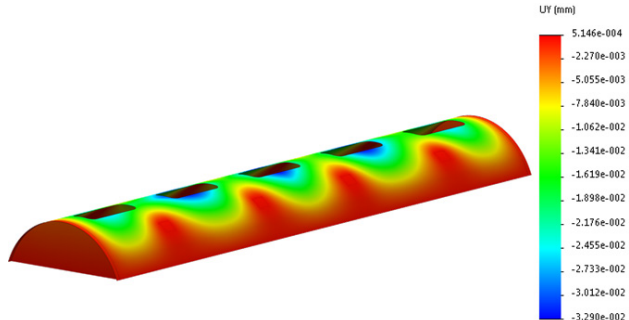


Рис. 9. Переміщення в обшивці даху (III схема навантаження)

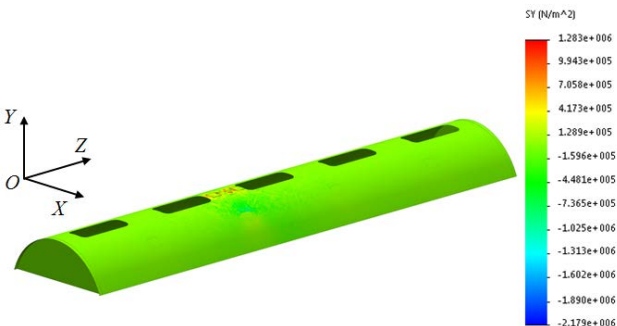


Рис. 6. Напружений стан обшивки даху (II схема навантаження)

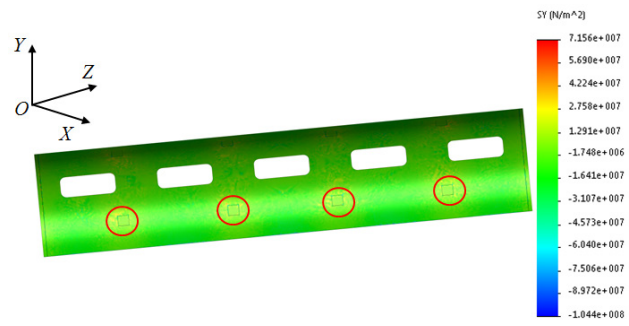


Рис. 10. Напружений стан обшивки даху (IV схема навантаження)

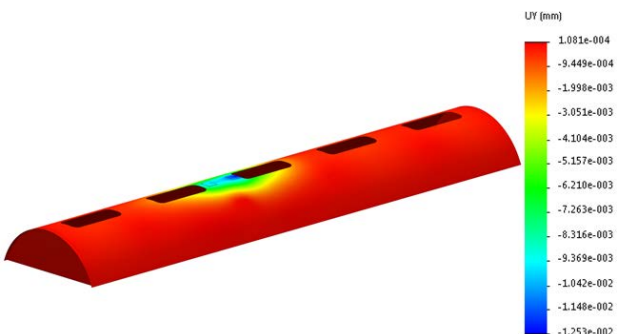


Рис. 7. Переміщення в обшивці даху (II схема навантаження)

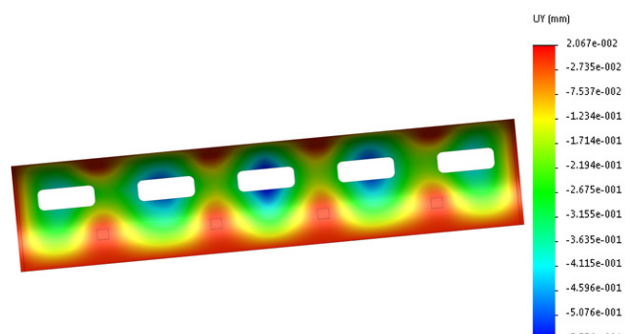


Рис. 11. Переміщення в обшивці даху (IV схема навантаження)

матеріалу для даху вагона його загальна тара зменшиться на 1,7% у порівнянні з прототипом.

2. Визначено міцність обшивки даху вагона-хопера при основних експлуатаційних режимах

навантаження. Встановлено, що міцність даху при всіх розглянутих схемах навантажень забезпечується. При цьому максимальні напруження в обшивці виникають при дії на неї зовнішнього

тиску у 30 кПа і складають 104,4 МПа, що нижче за допустимі.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування сучасних конструкцій залізничних вагонів з покращеними техніко-економічними показниками.

Подяка.

Дослідження, представлені в даній статті, виконані в рамках реалізації двостороннього гранто-

вого наукового проекту UK-Ukraine R&I twinning grants scheme. Проект реалізується сумісно Українським державним університетом залізничного транспорту та Університетом Західної Шотландії. Номер державної реєстрації проекту в реєстрі Міжнародних науково-технічних програм, проєктів і грантів Державної наукової установи Український інститут науково-технічної експертизи та інформації – 0123U102700.

Список літератури:

1. ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод». URL: <https://www.kvsz.com/index.php/ua/produksiya/vantazhne-vagonobuduvannya/vagoni-khoperi> (дата звернення: 29.05.2023).
2. Фомін О. В., Ловська А. О., Фоміна А. М., Сергієнко О. В. Визначення вертикальної навантаженості критого вагона з дахом із композитного матеріалу // Наукові вісті Дніпровського університету. 2022. №23. <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2022-23-16>
3. Chandra Prakash Shukla, Bharti P. K. Study and Analysis of Doors of BCNHL Wagons // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2015. Vol. 4, Issue 04. P. 1195–1200. <https://doi.org/10.17577/ijertv4is041031>
4. Raffaele Sepe, Angela Pozzi. Static and modal numerical analyses for the roof structure of a railway freight refrigerated car // Frattura ed Integrità Strutturale. 2015. Vol. 33. P. 451 – 462. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.33.50>
5. Oleksij Fomin, Alyona Lovska. Justification of the Use of Square Pipes in the Frame of the Removable Roof of the Open Wagon // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. №4/7 (112). P. 18 – 25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237157>
6. J. Cuartero, A. Miravete, R. Sanz. Design and calculation of a railway car composite roof under concrete cube crash // International Journal of Crashworthiness. 2011. Vol. 16(1). P. 41 – 47. <https://doi.org/10.1080/13588265.2010.501163>
7. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 250 с.
8. Фомін О. В., Ловська А. О., Фоміна А. М., Прокопенко П. М. Розрахунок міцності кришки люка напіввагона із полімерного композиційного матеріалу // Збірник наукових праць ДУПТ. Серія «Транспортні системи і технології». – 2022. – Вип. 39. – С. 143 – 152. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-14>
9. Sergii Panchenko, Juraj Gerlici, Glib Vatulia, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov, Kateryna Kravchenko. The Analysis of the Loading and the Strength of the FLAT RACK Removable Module with Viscoelastic Bonds in the Fittings. Applied Sciences. 2023. Vol. 13(1). 79. <https://doi.org/10.3390/app13010079>
10. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks: Навчальний посібник. Херсон. 2018. 252 с.
11. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks: Навчальний посібник. Луцьк. 2018. 172 с.

Vatulia G.L., Lovska A.O. RESEARCH OF THE STRENGTH OF THE ROOF COVERING OF A HOPPER WAGON MADE OF COMPOSITE MATERIAL

The article presents the results of a study of the strength of the roof covering of a hopper car for grain transportation. In order to reduce its tare and possibly increase its carrying capacity, it is proposed to introduce a composite material as a roof covering. The study was carried out on the example of the roof of a hopper car model 19-7016. Since the roof frame is made of steel, which is an isotropic material, and the lining is made of a composite with orthotropic properties, the strength calculation of the lining was performed separately from the frame. The finite element method was used, which is implemented in the SolidWorks Simulation software package. The calculation was performed according to the maximum stress criterion. The main schemes of roof loads in operation were taken into account: the effect of vertical forces on the roof; the effect of two forces of 1.0 kN each, distributed on a 0.25 m x 0.25 m area and applied at a distance of 0.5 m from each other; the effect of snow load; the effect of external pressure of 30 kPa.

Tetrahedrons are used when building a finite-element model. Fastening of the cladding was carried out in the areas of its adjacency to the frame around the perimeter, as well as in the areas of abutment on the supporting sheets.

The results of the calculations showed that the strength of the roof is ensured under all the considered loading schemes. The maximum stresses in the cladding occur when it is subjected to an external pressure of 30 kPa and amount to 104.4 MPa, which is lower than permissible.

The conducted research will contribute to the development of developments in the design of modern railroad car structures with improved technical and economic performance.

Key words: transport mechanics, roof of a hopper car, roof load, roof strength, roof stress state.