

## УДК 656.2.073.235:624.014

Г. Л. ВАТУЛЯ<sup>1</sup>, А. О. ЛОВСЬКА<sup>2\*</sup>, С. С. МЯМЛІН<sup>3</sup>, Є. С. КРАСНОКУТСЬКИЙ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Навчально-науковий інститут будівельної та цивільної інженерії, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (097) 560 91 30, ел. пошта glib.vatulia@kname.edu.ua, ORCID 0000-0002-3823-7201

<sup>2\*</sup>Каф. «Інженерія вагонів та якість продукції», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

<sup>3</sup>Каф. «Інженерія вагонів та якість продукції», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта sergeymyamin91@gmail.com, ORCID 0000-0002-9204-4435

<sup>4</sup>Філія «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту», АТ «Укрзалізниця», вул. Е. Гедройця, 5, Київ, Україна, 03150, тел. +38(044) 309 61 36, ел. пошта ek1520mm@gmail.com, ORCID 0000-0001-6978-4489

## Обґрунтування конструкційних особливостей сендвіч-панелей для виготовлення стінок контейнера

**Мета.** Основна мета цієї роботи – обґрунтування конструкційних особливостей сендвіч-панелей для виготовлення стінок контейнера типорозміру 1СС. **Методика.** Для забезпечення міцності стінок контейнера запропоновано застосувати як їх складові сендвіч-панелі. При цьому передбачено виготовлення сендвіч-панелі з двох металевих листів, між якими розміщують матеріал з енергопоглинальними властивостями. Таке рішення сприяє поліпшенню міцності контейнера за рахунок зменшення його навантаженості. Для визначення товщини листа панелі проведено відповідні розрахунки з використанням методу Бубнова–Гальоркіна. Ураховано, що лист являє собою тонкостінну плиту, на яку діє рівномірно розподілене навантаження. Для поліпшення жорсткості листа запропоновано виготовляти його гофрованим. Аналіз виконання гофр дозволив зробити висновок, що найбільш доцільно застосувати гофри, які мають прямокутну конфігурацію. **Результати.** Проведено розрахунок на міцність сендвіч-панелі. Просторову модель сендвіч-панелі створено в програмному комплексі SolidWorks, а розрахунок на міцність здійснено в SolidWorks Simulation, який реалізує метод скінченних елементів. Для проведення розрахунків узято до уваги найбільш несприятливий режим навантаження контейнера під час залізничних перевезень – маневрове співударяння. Розрахунок проведено на прикладі торцевої стінки контейнера, оскільки саме вона зазнає найбільших навантажень у разі маневрового співударяння вагона-платформи. Проведені розрахунки на міцність показали, що максимальні напруження в сендвіч-панелі, виготовленій із гофрованих листів, складають близько 258 МПа, що нижче за допустимі на 16 %. Максимальні переміщення у вузлах сендвіч-панелі виникають у її середній частині і дорівнюють 3,1 мм. **Наукова новизна.** Науково обґрунтовано конструкційне виконання сендвіч-панелей, які утворюють торцеві стінки контейнера. Визначено раціональну конфігурацію гофр листів сендвіч-панелі. **Практична значимість.** Проведене дослідження сприятиме виробленню рекомендацій щодо проектування сучасних конструкцій транспортних засобів модульного типу та підвищенню ефективності функціонування транспортної галузі.

**Ключові слова:** контейнер ISO; обшивка контейнера; сендвіч-панель; міцність сендвіч-панелі; контейнерні перевезення

### Вступ

Забезпечення конкурентоспроможності залізничної галузі зумовлює необхідність удосконалення в експлуатацію транспортних засобів із поліпшеними експлуатаційними характеристиками. Уже тривалий час однією з пріоритетних складових транспортної галузі є контейнерні перевезення [1, 6].

Для забезпечення подальшої ефективності експлуатації контейнерних перевезень важливим є впровадження нових конструкційних рішень під час проектування контейнерів. Ці рішення повинні бути спрямовані на поліпшення як технічних, так і експлуатаційних показників контейнерів.

Важливо сказати, що в умовах експлуатації можуть мати місце пошкодження контейнерів,

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

зумовлені навантаженнями, які виникають під час перевезення різними видами транспорту. Одним із найбільш вагомих серед них є динамічні знакозмінні навантаження. Таких навантажень зазнає не тільки контейнер, а й вантаж, розміщений у ньому. Унаслідок наявності власного ступеня вільності вантажу в контейнері може мати місце додаткова навантаженість його конструкції. Наслідками цього є пошкодження контейнерів (рис. 1 [14]). Така обставина призводить до додаткових витрат на утримання контейнерів в експлуатації. До того ж це може впливати і на безпеку та екологічність перевезень.

*a – a*



*б – б*



Рис. 1. Пошкодження контейнерів:

*a* – зминання конструкції;  
*б* – деформація кутової стійки

Fig. 1. Damage to containers:  
*a* – crushing of the structure;  
*b* – deformation of the corner post

У зв'язку з цим важливим є пошук шляхів удосконалення конструкцій контейнерів із метою зменшення їх динамічного навантаження за експлуатаційних режимів.

Дослідження, присвячені вдосконаленню конструкцій контейнерів, є досить актуальними, що підтверджує велика кількість публікацій. Наприклад, у статті [11] автори запропонували конструкцію контейнера для перевезень та зберігання плодоовочевої продукції. Наведено результати розрахунку контейнера на міцність із використанням методу скінченних елементів. Зазначено вимоги до умов експлуатації цього контейнера.

У роботі [8] висвітлено конструкційні особливості контейнера для плодоовочевої продукції. Запропоновані конструкційні рішення підтверджено відповідними розрахунками на міцність за основних експлуатаційних схем навантажень контейнера.

Проте під час проєктування цих конструкцій контейнерів автори не запропонували рішень щодо поліпшення міцності їх стінок.

У статті [11] представлено контейнер із пружно-фрикційними складовими в конструкції. Таке вдосконалення сприяє зменшенню динамічних навантажень, що діють на контейнер майже на 20 % порівняно з тим, які діють на типову конструкцію.

Особливості проєктування контейнера ISO розглянуто в роботі [14]. Проаналізовано основні схеми навантажень контейнера в експлуатації. Також у роботі досліджено опір конструкції зовнішнім навантаженням.

Разом із цим, необхідно сказати, що запропоновані в зазначених роботах удосконалення не сприяють поліпшенню міцності стінок контейнера в умовах транспортування, у тому числі залізницею.

Для зменшення динамічних навантажень, яких зазначають на транспорті засоби, і водночас поліпшення показників міцності в їх конструкціях знайшли використання сендвіч-панелі. Так, упровадження стільникових панелей у конструкцію залізничного транспортного засобу обґрунтовано в статті [5]. У роботі наведено алгоритм оптимізації несучої конструкції транспортного засобу. Результати розрахунків показали, що таке впровадження сприяє зменшенню тари несучої конструкції на 16,36 % порівняно з прототипом.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

У роботі [13] авторський колектив зацентрував увагу на поліпшенні показників надійності несучих конструкцій транспортних засобів шляхом впровадження композитних панелей. Доведено, що застосування таких панелей сприяє поліпшенню витривалості кузовів транспортних засобів.

Важливо сказати, що автори цих робіт не приділяли уваги питанню впровадження сендвіч-панелей у конструкції зйомних транспортних засобів, зокрема контейнерів.

Для зменшення навантаженості залізничних транспортних засобів у роботах [7, 9] автори розглянули доцільність виготовлення складових їх несучих конструкцій із труб круглого перерізу, заповнених піноалюмінієм. Дослідження проведені на прикладі піввагона. Установлено, що з використанням піноалюмінію як наповнювача хребтової балки максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції зменшуються майже на 8 % порівняно з конструкцією без наповнювача. Необхідно сказати, що така реалізація є досить складною на практиці. Крім того, автори обмежилися впровадженням запропонованого рішення лише на одному типі вагона. З урахуванням на прискорених темпах росту контейнерних перевезень виникає доцільність розгляду питань удосконалення конструкцій контейнерів.

Проведений огляд літературних джерел дозволяє зробити висновок, що питання вдосконалення конструкцій контейнерів є досить актуальним. Разом із тим поліпшенню їх міцності шляхом впровадження сендвіч-панелей досі не приділяли належної уваги. Тому постає необхідність проведення досліджень в зазначеному напрямі.

### Мета

Основною метою статті є обґрунтування конструкційних особливостей сендвіч-панелей для виготовлення стінок контейнера типорозміру 1СС. Для досягнення зазначеної мети поставлено такі завдання:

- визначити товщину листа сендвіч-панелі, що утворює торцеві стінок контейнера за умови забезпечення міцності в експлуатації;
- визначити раціональну конфігурацію гофр листів та провести розрахунок на міцність сендвіч-панелі, утвореної гофрованими листами.

### Методика

У наш час стінки контейнерів виготовляють із металевих гофрованих листів. Товщина листів у контейнері типорозміру 1СС дорівнює 1,6 мм. В умовах експлуатаційних навантажень мають місце пошкодження листів обшивки, що зумовлює необхідність здійснення позапланових ремонтів контейнерів.

Для забезпечення міцності стінок контейнера пропонуємо впровадження як їх складових сендвіч-панелей. При цьому передбачено виготовлення сендвіч-панелі з двох металевих листів, між якими розміщують матеріал з енергопоглинальними властивостями (рис. 2). Таке рішення сприятиме поліпшенню міцності контейнера за рахунок зменшення його навантаженості.

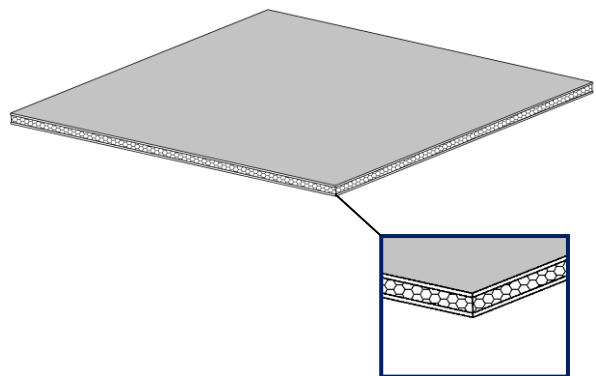


Рис. 2. Сендвіч-панель

Fig. 2. Sandwich panel

Для визначення товщини листа панелі проведено відповідні розрахунки з використанням методу Бубнова–Гальоркіна. Ураховано, що лист являє собою тонкостінну плиту, на яку діє рівномірно розподілене навантаження  $P$ . Відомо, що максимальні напруження при цьому визначають за формулою [3]:

$$\sigma = P \cdot \frac{96}{\pi^4} \cdot \frac{(b^2 + \mu \cdot a^2) \cdot a^2 \cdot b^2}{(a^2 + b^2)^2 \cdot \delta^2}, \quad (1)$$

де  $a$  – ширина плити;  $b$  – висота плити;  $\delta$  – товщина плити;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Звідси можна визначити товщину листа:

$$\delta = \sqrt{\frac{P \cdot 96 \cdot (b^2 + \mu \cdot a^2) \cdot a^2 \cdot b^2}{\sigma \cdot \pi^4 \cdot (a^2 + b^2)^2}}. \quad (2)$$

Після вибору товщини листа необхідно провести відповідні розрахунки на міцність.

### Результати

Будемо вважати, що лист виготовлений зі сталі 09Г2С [2, 4], яка є типовою для металоконструкцій контейнерів. Основну технічну характеристику сталі наведено в табл. 1.

Для проведення розрахунків узято до уваги найбільш несприятливий режим навантаження контейнера в разі залізничних перевезень – маневрове співударяння. У зв'язку з цим ураховано, що допустимі напруження складають 310,5 МПа. Лист має ширину 2,438 м та висоту 2,591 м [3, 12].

Таблиця 1

#### Основні технічні характеристики сталі марки 09Г2С

Table 1

#### Main technical characteristics of steel grade 09G2S

Назва параметру	Значення
Модуль пружності, МПа	2,1 · 10 <sup>5</sup>
Коефіцієнт Пуассона	0,28
Щільність, т/м <sup>3</sup>	7,8
Модуль зсуву, МПа	7,9 · 10 <sup>4</sup>
Межа міцності, МПа	490
Межа плинності, МПа	345

Розрахунок реалізовано на прикладі торцевої стінки контейнера, оскільки саме вона зазнає найбільших навантажень під час маневрового співударяння вагона-платформи. У результаті проведених розрахунків встановлено, що лист повинен мати товщину близько 3 мм. Товщина шару, який утворює енергопоглинальний матеріал може бути взята 33 мм за умови дотримання габариту стінки відповідно до типової конструкції (рис. 3 [13]).

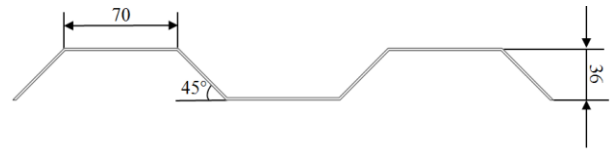
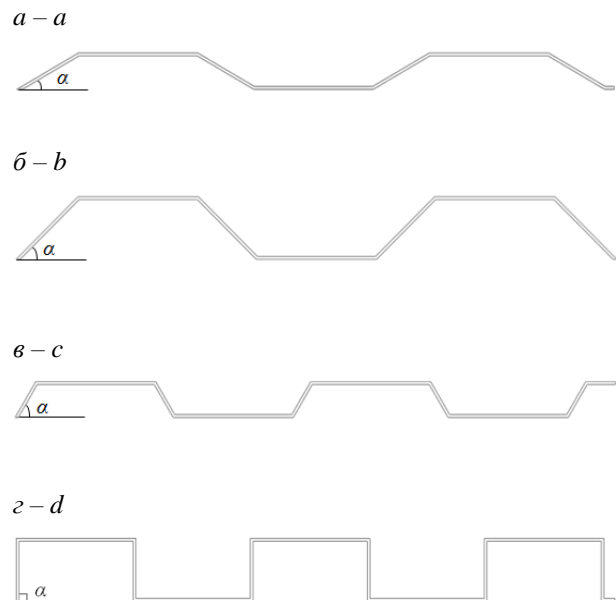


Рис. 3. Переріз типової обшивки контейнера

Fig. 3. Cross-section of a typical container lining

Для збільшення моменту опору листа можна виготовити його з гофрами. Для визначення найбільш раціонального виконання гофр побудовано просторові моделі листів (рис. 4).

За допомогою опцій програмного комплексу SolidWorks Simulation визначено моменти інерції перерізів, наведених на рис. 3, а також їх моменти опору (табл. 2).

Рис. 4. Варіанти виконання гофр листів обшивки:  $a - \alpha = 30^\circ$ ;  $b - \alpha = 45^\circ$ ;  $c - \alpha = 60^\circ$ ;  $d - \alpha = 90^\circ$ Fig. 4. Variants of corrugations of the cladding sheets:  $a - \alpha = 30^\circ$ ;  $b - \alpha = 45^\circ$ ;  $c - \alpha = 60^\circ$ ;  $d - \alpha = 90^\circ$ 

Аналізуючи дані, наведені в табл. 2, можемо зробити висновок, що найбільш доцільним є застосування гофр, які мають прямокутну конфігурацію.

Використання гофр дає можливість зменшити товщину листа. Визначити товщину гофрованого листа можна за умови дотримання його моменту інерції не нижче за той, що має місце для прямокутного листа.

Таблиця 2  
Моменти інерції та опору перерізів  
гофрованих листів

Table 2

Moments of inertia and resistance  
of corrugated sheet sections

Кут нахилу гофр	Момент інерції, см <sup>3</sup>	Момент опору, см <sup>3</sup>
30°	3,79	3,64
45°	12,52	6,95
60°	4,66	4,48
90°	19,53	10,85

Варіант виконання сендвіч-панелі з листів, які мають гофровану конфігурацію, наведено на рис. 5.



Рис. 5. Варіант виконання сендвіч-панелі

Fig. 5. Sandwich panel version

Для визначення міцності сендвіч-панелі, яка утворює торцеву стінку контейнера, створено її просторову модель (рис. 6).

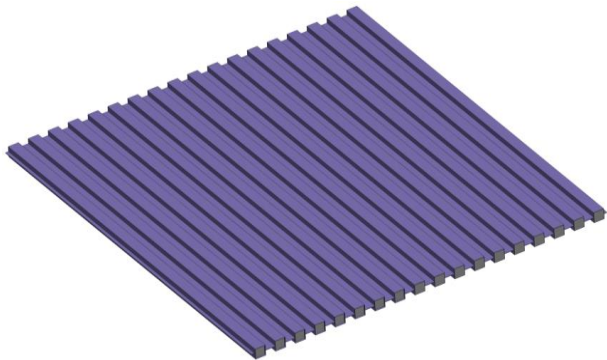


Рис. 6. Просторова модель сендвіч-панелі

Fig. 6. Spatial model of a sandwich panel

Як енергопоглинальний матеріал між листами панелі застосовано піноалюміній один із найбільш поширених енергопоглинальних матеріалів у сучасному машинобудуванні. Розрахунок на міцність реалізовано методом скінченних елементів у програмному комплексі SolidWorks Simulation. Під час складання роз-

рахункової схеми враховано, що панель навантажена рівномірно розподіленою силою  $P_n$  (рис. 7), яка дорівнює  $0,4 \cdot P \cdot g$ .

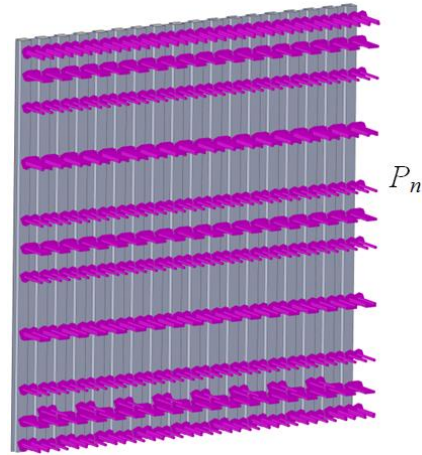


Рис. 7. Розрахункова схема сендвіч-панелі

Fig. 7. Design scheme of a sandwich panel

Скінченно-елементна модель утворена тетраедрами з чотирма точками Якобіана (рис. 8). Кількість скінченних елементів моделі визначено графоаналітичним способом. Кількість вузлів моделі складала 16 930, елементів – 72 027. Максимальний розмір елемента дорівнює 60 мм.

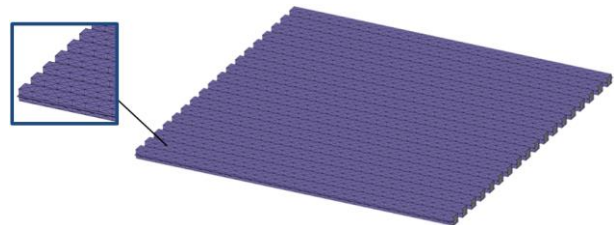


Рис. 8. Скінченно-елементна модель сендвіч-панелі

Fig. 8. Finite element model of a sandwich panel

Закріплення моделі здійснено за периметром. Результати розрахунків наведено на рис. 9 і 10.

Максимальні напруження зафіксовано в центральній верхній та нижній зонах панелі. При цьому чисельні значення напружень склали близько 258 МПа, що нижче за допустимі на 16 %. Максимальні переміщення виникають у середній частині панелі й дорівнюють 3,1 мм.

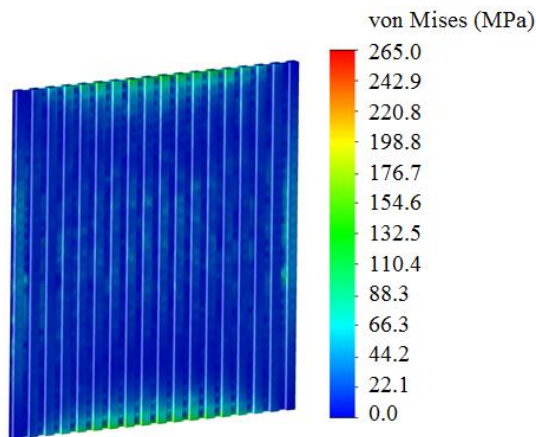


Рис. 9. Напружений стан сендвіч-панелі

Fig. 9. Stressed state of a sandwich panel

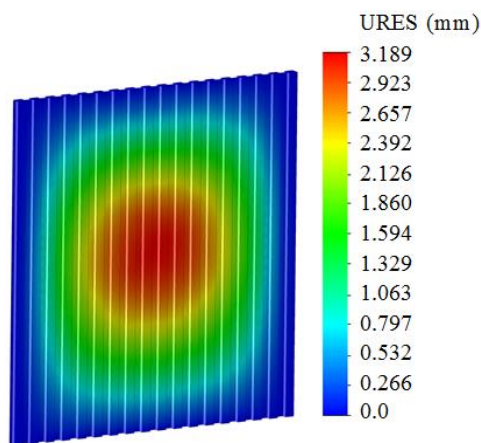


Рис. 10. Переміщення у вузлах сендвіч-панелі

Fig. 10. Moving in the sandwich panel nodes

### Наукова новизна та практична значимість

Обґрунтовано конструкційне виконання сендвіч-панелей для виготовлення торцевих стінок контейнера.

Визначено раціональну конфігурацію гофр листів сендвіч-панелі. При цьому до уваги взято гофри з різними кутами нахилу. Установлено, що найбільш доцільним є застосування гофр, які мають прямокутну конфігурацію. З урахуванням цього запропоновано варіант виконання сендвіч-панелі.

Проведене дослідження сприятиме виробленню рекомендацій щодо проектування сучасних конструкцій транспортних засобів модульного типу та підвищенню ефективності функціонування транспортної галузі.

### Висновки

1. Визначено товщину листа сендвіч-панелі для виготовлення торцевої стінки контейнера за умови забезпечення міцності в експлуатації. Установлено, що лист повинен мати товщину близько 3 мм. Товщина шару енергопоглинального матеріалу, яким заповнюють простір між листами сендвіч-панелі, може бути взята 33 мм за умови дотримання габариту стінок у межах типової конструкції контейнерів.

2. Визначено, що раціональною конфігурацією гофр листів, які утворюють сендвіч-панелі контейнера, є прямокутна. Проведені розрахунки на міцність показали, що максимальні напруження в сендвіч-панелі з гофрованими листами складають близько 258 МПа, що нижчі за допустимі на 16 %. Максимальні переміщення у вузлах сендвіч-панелі виникають у її середній частині і дорівнюють 3,1 мм.

Наступним кроком у рамках цього дослідження є створення просторової моделі контейнера зі стінками із сендвіч-панелей та проведення відповідних розрахунків на міцність.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ватуля Г. Л., Ловська А. О., Краснокутський Є. С. Математичне моделювання вертикальної навантаженості контейнера типу хопер, розміщеного на довгобазній конструкції вагона-платформи. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія : Динаміка і міцність машин. 2022. № 1. С. 34–39. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2022.1.264323>
2. 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, 2015. 250 с.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

3. ДСТУ ISO 8323:2015. Вантажні контейнери. Контейнери універсальні (інтермодальні) для повітряних і наземних перевезень. Технічні умови та методи випробувань. [Чинний від 2016-01-01]. Київ, 2015.
4. ДСТУ ISO 1496-1:2013. Вантажні контейнери серії 1. Технічні вимоги та методи випробування. Частина 1. Контейнери загальної призначеності універсальні. [Чинний від 2014-07-01]. Київ, 2014. 34 с.
5. Al-Sukhon A., ElSayed M. S. Design optimization of hopper cars employing functionally graded honeycomb sandwich panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*. 2021. Vol. 236. Iss. 8. P. 920–935. DOI: <https://doi.org/10.1177/095440972111049640>
6. Chuan-jin O., Bing-tao L. Research and application of new multimodal transport equipment-swap bodies in China. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 145. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014502001>
7. Fomin O., Gerlici J., Gorbunov M., Vatulia G., Lovska A., Kravchenko K. Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam. *Materials*. 2021. Vol. 14 (12). P. 3420–3430. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123420>
8. Fomin O., Gerlici J., Vatulia G., Lovska A., Kravchenko K. Determination of the Loading of a Flat Rack Container during Operating Modes. *Applied Science*. 2021. Vol. 11. P. 7623–7636. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11167623>
9. Fomin O., Lovska A., Gorbunov M., Gerlici J., Kravchenko K. Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills. *Materials*. 2021. Vol. 14 (8). P. 1915–1927. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14081915>
10. Giriunas K., Sezen H., Dupaix R. B. Evaluation, modeling, and analysis of shipping container building structures. *Engineering Structures*. 2012. Vol. 43. P. 48–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.001>
11. Khadjimukhametova M. A., Merganov A. M. Development of the Design and Conditions of Operation of Containers for Transportation of Fruit and Vegetable Products. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2020. Vol. 8. Iss. 5. P. 252–256. DOI: <https://doi.org/10.35940/ijrte.e4856.018520>
12. *Technical specification for steel dry cargo container. Specification NO : «CTX 20 DVDR – Domestic Spec. HH»*. 2013. 27 p. URL: <https://www.passeidireto.com/arquivo/87185868/technische-beschreibung-seecontainer>
13. Wróbel A., Płaczek M., Buchacz A. An Endurance Test of Composite Panels. *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 260. P. 241–248. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.260.241>
14. *2022 Damages and breakages of containers*. URL: <https://ppt-online.org/20611>

G. L. VATULIA<sup>1</sup>, A. O. LOVSKA<sup>2\*</sup>, S. S. MYAMLIN<sup>3</sup>, YE. S. KRASNOKUTSKYI<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Educational and Scientific Institute of Construction and Civil Engineering, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshala Bazhanova str. 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (097) 560 91 30, e-mail [glib.vatulia@kname.edu.ua](mailto:glib.vatulia@kname.edu.ua), ORCID 0000-0002-3823-7201

<sup>2\*</sup>Dep. «Wagon Engineering And Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail [alyonalovskaya.vagons@gmail.com](mailto:alyonalovskaya.vagons@gmail.com), ORCID 0000-0002-8604-1764

<sup>3</sup>Dep. «Wagon Engineering And Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail [sergeymyamin91@gmail.com](mailto:sergeymyamin91@gmail.com), ORCID 0000-0002-9204-4435

<sup>4</sup>Branch «Research and Design and Technological Institute of Railway Transport», JSC «Ukrzaliznytsia», Jerzy Giedroyc str., 5, Kyiv, Ukraine, 03150, tel. +38(044) 309 61 36, e-mail [ek1520mm@gmail.com](mailto:ek1520mm@gmail.com), ORCID 0000-0001-6978-4489

## Substantiation of the Design Features of Sandwich Panels for Container Wall Lining

**Purpose.** The main purpose of this work is to substantiate the design features of sandwich panels for the manufacture of container walls of size 1SS. **Methodology.** To ensure the strength of the container walls, it is proposed to use sandwich panels as their components. This involves the manufacture of a sandwich panel from two metal sheets, between which a material with energy-absorbing properties is placed. This solution helps to improve

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

the strength of the container by reducing its load. To determine the thickness of the panel sheet, the corresponding calculations were performed using the Bubnov-Galerkin method. It is taken into account that the sheet is a thin-walled plate subjected to an evenly distributed load. To improve the stiffness of the sheet, it is proposed to make it corrugated. The analysis of the corrugations has led to the conclusion that it is most appropriate to use corrugations with a rectangular configuration. **Findings.** The strength of the sandwich panel was calculated. The spatial model of the sandwich panel was created in the SolidWorks software package, and the strength calculation was performed in SolidWorks Simulation, which implements the finite element method. The calculations took into account the most unfavorable loading mode of the container during rail transportation - shunting impact. The calculation was performed on the example of the container's end wall, since it is the wall that is subjected to the highest loads in the event of a shunting collision with a platform car. The strength calculations showed that the maximum stresses in the sandwich panel made of corrugated sheets are about 258 MPa, which is 16% lower than the permissible stresses. The maximum displacements in the sandwich panel assemblies occur in its middle part and are equal to 3.1 mm. **Originality.** The design of the sandwich panels that form the end walls of the container is scientifically substantiated. The rational configuration of the corrugations of the sandwich panel sheets is determined. **Practical value.** The study will contribute to the development of recommendations for the design of modern modular-type vehicle structures and improve the efficiency of the transport industry.

*Keywords:* ISO container; container lining; sandwich panel; sandwich panel strength; container transportation

## REFERENCES

1. Vatulia, G., Lovska, A., & Krasnokutskyi, Y. (2022). Mathematical modeling of the vertical load of a hopper-type container placed on a long-base structure of a platform car. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: Dynamics and Strength of Machines, 1*, 34-39. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2022.1.264323> (in Ukrainian)
2. *Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv koliyi 1520 mm (nasamohidnih), 250 DSTU 7598:2014 (2015).* (in Ukrainian)
3. *Vantazhni konteinery. Konteinery universalni (intermodalni) dlia povitrianykh i nazemnykh perevezhen. Tekhnichni umovy ta metody vyprobuvan, DSTU ISO 8323:2015 (2015).* (in Ukrainian)
4. *Vantazhni konteinery serii 1. Tekhnichni vymohy ta metody vyprobuvannia. Chastyna 1. Konteinery zahalnoi pryznachenosti universalni, 34 DSTU ISO 1496-1:2013 (2014).* (in Ukrainian)
5. Al-Sukhon, A., & ElSayed, M. S. (2021). Design optimization of hopper cars employing functionally graded honeycomb sandwich panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 236*(8), 920-935. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097211049640> (in English)
6. Chuan-jin, O., & Bing-tao, L. (2020). Research and application of new multimodal transport equipment-swap bodies in China. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 145, P. 1-4). DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014502001> (in English)
7. Fomin, O., Gerlici, J., Gorbunov, M., Vatulia, G., Lovska, A., & Kravchenko, K. (2021). Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam. *Materials, 14*(12), 3420-3430. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123420> (in English)
8. Fomin, O., Gerlici, J., Vatulia, G., Lovska, A., & Kravchenko, K. (2021). Determination of the Loading of a Flat Rack Container during Operating Modes. *Applied Sciences, 11*(16), 7623-7636. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11167623> (in English)
9. Fomin, O., Lovska, A., Gorbunov, M., Gerlici, J., & Kravchenko, K. (2021). Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills. *Materials, 14*(8), 1915-1927. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14081915> (in English)
10. Giriunas, K., Sezen, H., & Dupaix, R. B. (2012). Evaluation, modeling, and analysis of shipping container building structures. *Engineering Structures, 43*, 48-57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.001> (in English)



РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

---

11. Khadjimukhametova, M. A., & Merganov, A. M. (2020). Development of the Design and Conditions of Operation of Containers for Transportation of Fruit and Vegetable Products. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(5), 252-256. DOI: <https://doi.org/10.35940/ijrte.e4856.018520> (in English)
12. *Technical specification for steel dry cargo container. Specification NO: «CTX 20 DVDR – Domestic Spec. HH»*. (2013). Retrieved from <https://www.passeidireto.com/arquivo/87185868/technische-beschreibung-seecontainer> (in English)
13. Wróbel, A., Płaczek, M., & Buchacz, A. (2017). An Endurance Test of Composite Panels. *Solid State Phenomena*, 260, 241-248. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.260.241> (in English)
14. *2022 Damages and breakages of containers*. Retrieved from <https://ppt-online.org/20611> (in Russian)

Надійшла до редколегії: 14.11.2022

Прийнята до друку: 17.03.2023