

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО
СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ВАНТАЖНОГО ВАГОНА ЗІ ЗМІННИМ КУЗОВОМ ПРИ
ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ***Інститут технічної механіки**Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: sobmb@i.ua*

Новим напрямком у сфері залізничних транспортних послуг є використання вантажних вагонів зі змінними кузовами. Екіпажною частиною таких вагонів є платформа для змінних кузовів, яка складається з рами, ходових частин, автозчепного, автогальмівного обладнання та пристроїв кріплення змінних кузовів. В разі потреби, наприклад при сезонній зміні вантажів, можуть бути використані одні й ті самі платформи, в той час як порожні кузова одного призначення відокремлюються від платформ, замінюються змінними кузовами іншого призначення. Отримані таким чином нові вантажні вагони далі експлуатуються як спеціалізовані. Перевагою технології перевезень вантажів вагонами зі змінними кузовами є те, що вона дозволяє знизити витрати на придбання і утримання рухомого складу за рахунок ефективної експлуатації платформи як найбільш вартісної частини вагона, уникнути простою вагонів при сезонних коливаннях відправки вантажів, а при пошкодженні кузовів забезпечити їх швидку заміну. Технологію вантажних перевезень доцільно впровадити на вітчизняних залізницях, використовуючи світовий досвід розробки конструкцій вагонів зі змінними кузовами. В статті розглянуто залізничний вагон зі змінним кузовом, екіпажною частиною якого є вагон-платформа для контейнерних перевезень. Метою досліджень, викладених в статті, є математичне моделювання напружено-деформованого стану (НДС) елементів вантажного вагона зі змінним кузовом при нормативних навантаженнях згідно з ДСТУ EN 12663-2:2018. Наукову новизну мають розроблені скінченно-елементні моделі для дослідження НДС елементів вагона-платформи з 45-футовим контейнером, а також вантажного вагона зі змінним кузовом при нормативних навантаженнях з урахуванням особливостей кріплення змінного кузова до рами екіпажної частини вагона та наявності зазорів в елементах кріплення. За допомогою розроблених скінченно-елементних моделей проведено дослідження НДС елементів розглянутих конструкцій при дії нормативних навантажень. Відповідно до вимог ДСТУ EN 12663-2:2018 дано оцінку міцності елементів конструкції рами вагона-платформи при різних режимах навантажень. Встановлено, що міцність досліджуваної конструкції рами вагона-платформи з 45-футовим контейнером відповідає нормативним вимогам, а міцність конструкції рами екіпажної частини вагона зі змінним кузовом не відповідає вимогам ДСТУ EN 12663-2:2018. Виконані дослідження свідчать про необхідність посилення елементів кріплення змінного кузова до екіпажної частини вагона та удосконалення самої конструкції рами екіпажної частини вагона.

Ключові слова: вантажний вагон зі змінним кузовом, елементи кріплення кузова до екіпажної частини, скінченно-елементне моделювання, напружено-деформований стан, міцність конструкції.

A new line in railway transportation is the use of swap-body freight cars. Their undercarriage is a flat car for swap bodies, which consists of an underframe, running gear, automatic couples, automatic braking devices, and body fasteners. With seasonal variations in freight shipment, the same flat cars can be used because empty bodies of one purpose are detached from the flat cars and replaced with bodies of another purpose, thus making it possible to use the freight cars obtained in this way dedicated ones. The advantage of freight transportation with swap-body cars is that it allows one to reduce the car acquisition and maintenance cost due to the effective use of a flat car as the most expensive part of a freight car, avoid car demurrage caused by seasonal variations in freight shipment, and speed up the replacement of damaged bodies. It is expedient to introduce freight transportation with swap-body cars on the Ukrainian railways using the world's experience in the development of swap-body cars. This paper considers a swap-body freight car whose undercarriage is a container flat car. The goal of the paper is a mathematical simulation of the stress and strain field of the components of a swap-body freight car at standard loads according to the Ukrainian State Standard EN 12663-2:2018. Finite-element models were developed to study the stress and strain field of the components of a 45-feet container flat car and a swap-body car at standard loads with account for the features of body-on-undercarriage fastening and clearances in the fasteners. The models underlie the scientific novelty of the paper. Using them, the stress and strain field of the car components at standard loads was studied. According to the requirements of the Ukrainian State Standard EN 12663-2:2018, the strength of the structural components of the flat car underframe was estimated under different loading conditions. It was found that the strength of the 45-feet container flat car underframe under study meets requirements of the Ukrainian State Standard EN 12663-2:2018, while the strength of the underframe of the swap-body car undercarriage does not. This study evidences the need to strengthen the body-on-undercarriage fasteners and improve the design of the swap-body car underframe itself.

Keywords: swap-body freight car, body-on-undercarriage fasteners, finite-element simulation, stress and strain field, structural strength.

Вступ. Згідно з Національною економічною стратегією України на період до 2030 року [1, 2] одним із важливіших завдань транспортної галузі нашої країни є впровадження нових ефективних технологій вантажних перевезень з урахуванням сучасних світових тенденцій. Новим напрямком у сфері залізничних транспортних послуг є використання вантажних вагонів зі змінними кузовами [3 – 14]. Екіпажною частиною таких вагонів є платформа для змінних кузовів, яка складається з рами, ходових частин, автозчіпного, автогальмівного обладнання та пристроїв кріплення змінних кузовів. В разі потреби, наприклад при сезонній зміні вантажів, можуть бути використані одні й ті самі платформи, в той час як порожні кузова одного призначення відокремлюються від платформ, замінюються змінними кузовами іншого призначення. Отримані таким чином нові вантажні вагони далі експлуатуються як спеціалізовані.

Перевагою технології перевезень вантажів вагонами зі змінними кузовами є те, що вона дозволяє знизити витрати на придбання і утримання рухомого складу за рахунок ефективної експлуатації платформи як найбільш вартісної частини вагона, уникнути простою вагонів при сезонних коливаннях відправки вантажів, а при пошкодженні кузовів забезпечити їх швидку заміну. Таку сучасну технологію вантажних перевезень доцільно впровадити на вітчизняних залізницях, використовуючи світовий досвід розробки конструкцій вагонів зі змінними кузовами та враховуючи, що кузовна частина та її кріплення на платформі мають бути розраховані на більші порівняно з контейнерами навантаженнями за діючими вагонними нормативами.

Постановка задачі. Оскільки в Україні поки що немає реальних проєктів зі створення вагонів зі змінними кузовами, розглянуто залізничний вагон, екіпажною частиною якого є вагон-платформа для контейнерних перевезень моделі 13-7133 Крюківського вагонобудівного заводу (рис. 1).



Рис. 1 – Вагон-платформа моделі 13-7133

Вагон-платформа моделі 13-7133 може використовуватися для транспортування 40-футових та 45-футових контейнерів. Технічні характеристики вагона-платформи моделі 13-7133 [15] наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики вагона-платформи моделі 13-7133

Назва характеристики	Значення	Розмірність
Максимальна вантажопідйомність	73,6	т
Максимальна маса тари	20,4	т
Розрахункове статичне навантаження від колісної пари на рейки	235	кН
База платформи	9700	мм
Довжина вагона по осях автозчеплень	14620	мм
Габарит по ГОСТ 9238	0-ВМ	–
Висота до осі зчеплення від рівня головки рейок	1060	мм
Конструктивна швидкість	120	км/год

Згідно зі стандартом ДСТУ ISO 668:2015 серії 1 [16], який вводить класифікацію контейнерів, регулює їх габарити та масу брутто, 40-футовий та 45-футовий контейнери мають однакові маси – 30,48 т. Різниця у їх габаритах не є суттєвою. Прийнято допущення, що габарити змінного кузова, який проєктується, відповідають габаритам 45-футового контейнера, а саме складають 13400 мм × 2530 мм × 2400 мм. При цьому маса брутто змінного кузова згідно з технічними характеристиками вагона-платформи моделі 13-7133 дорівнює його вантажопідйомності – 73,6 т, тобто більш, ніж в 2 рази вище за масу 45-футового контейнера. Фітингові упори вагона-платформи, що розглядається, повинні витримувати нормативні експлуатаційні навантаження. Використання такого вагона-платформи для змінного кузова масою 73,6 т може потребувати удосконалення конструкції рами екіпажної частини та елементів кріплення до неї кузова.

На теперішній час в Україні діють два нормативних документи, які регулюють міцність конструкцій вантажного рухомого складу: ДСТУ EN 12663-2:2018 [17] та ДСТУ 7598:2014 [18]. В обох документах розглядаються два основних режими роботи конструкції вагона: суперпозиція статичних навантажень [17] (умовний режим безпеки [18]) та втомний [17] (експлуатаційний [18]). Обидва документа подібні один одному, тому в роботі розглядався останній, що введений в дію, – ДСТУ EN 12663-2:2018. Згідно з [17] для режиму суперпозиції статичних навантажень розглядається найбільш жорстка комбінація сил, де на конструкцію вагона діють одночасно сила тяжіння та стискаюча поздовжня сила $F = 2$ МН, що передається через автозчепні пристрої.

Метою досліджень, викладених в статті, є математичне моделювання напружено-деформованого стану (НДС) елементів вантажного вагона зі змінним кузовом при нормативних навантаженнях згідно з ДСТУ EN 12663-2:2018.

Спочатку розглянуто вагон-платформу з розташованим на ній 45-футовим контейнером і розроблено базову скінченно-елементну модель для дослідження НДС елементів рами вагона-платформи з контейнером. Скінченно-елементну модель для дослідження НДС елементів рами екіпажної частини вагона зі змінним кузовом при нормативних навантаженнях розроблено на основі базової моделі з урахуванням різниці в масі контейнера та змінного кузова, а також особливостей кріплень та наявності зазорів в їх елементах.

Математичне моделювання. Для дослідження НДС елементів конструкції, що розглядається, при статичних нормативних навантаженнях використовується метод скінченних елементів (МСЕ) у вигляді методу переміщень [19, 20, 21]. Відповідно до МСЕ в залежності від прийнятих вихідних передумов і припущень континуальна система з нескінченним числом степенів вільності моделюється її дискретним аналогом, тобто сукупністю скінченного числа елементів, з'єднаних між собою в скінченному числі вузлових точок. Властивості континуальної системи зберігаються у її дискретному аналогу.

Для аналізу НДС елементів конструкції розглядається задача статички, повна система рівнянь якої складається з таких рівнянь:

- рівняння рівноваги $A\bar{\sigma} + \bar{f} = 0$;
- рівняння нерозривності чи сумісності деформацій $B\bar{\epsilon} = 0$;
- геометричні рівняння Коші, що встановлюють зв'язок між деформаціями та переміщеннями $\bar{\epsilon} = A^T \bar{u}$;
- фізичні рівняння (узагальнений закон Гука), що встановлює зв'язок між напруженнями та деформаціями $\bar{\epsilon} = D\bar{\sigma}$;
- граничні умови $L\bar{\sigma} = \bar{p}$,

де A – матриця зв'язку між напруженнями, елементами якої є відповідні оператори диференціювання 1-го порядку; $\bar{\sigma}$ – вектор напружень; $\bar{f}$ – вектор інтенсивності об'ємних навантажень; B – матриця зв'язку між деформаціями, елементами якої є відповідні оператори диференціювання 2-го порядку; $\bar{\epsilon}$ – вектор деформацій; A^T – транспонована матриця A ; $\bar{u}$ – вектор переміщень; D – матриця зв'язку між напруженнями та деформаціями, елементами якої є відповідні оператори диференціювання 2-го порядку; L – матриця, елементами якої є напрямні косинуси нормалі на дотичній площадці у довільній точці тіла; $\bar{p}$ – вектор інтенсивності поверхневих навантажень.

Розрахунок НДС елементів конструкції при дії на неї статичних навантажень зводиться до розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь, визначення вузлових переміщень, деформацій скінченних елементів за знайденими вузловими переміщеннями, обчислення напружень в елементах за визначеними деформаціями. Для кожного скінченного елемента визначається еквівалентне напруження

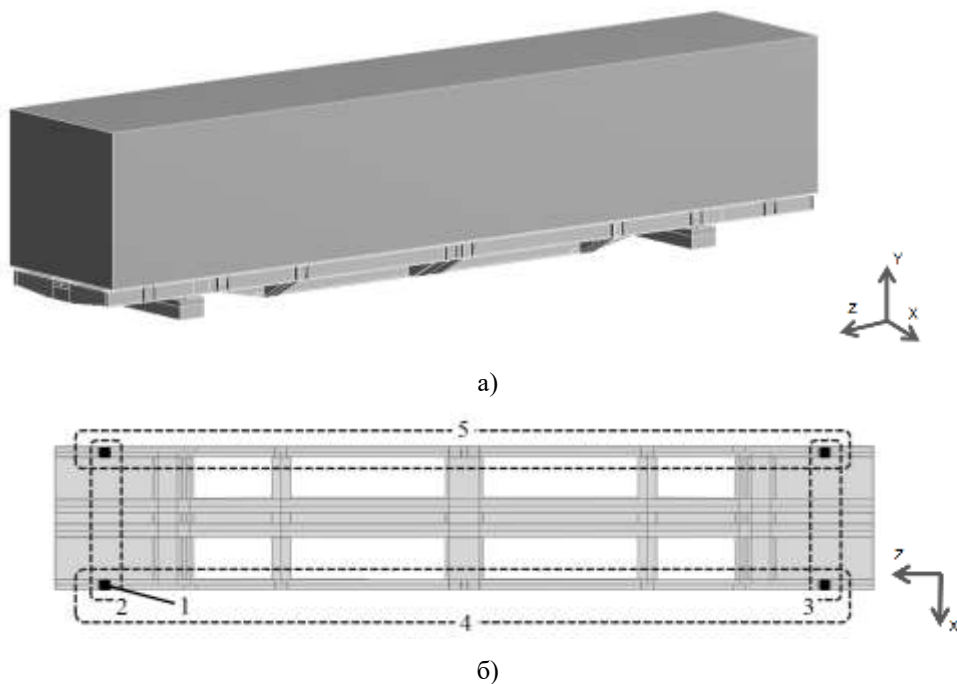
$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)},$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – компоненти нормальних напружень; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ – компоненти дотичних напружень.

Оцінка міцності елементів конструкції здійснюється шляхом порівняння отриманих в результаті розрахунку максимальних еквівалентних напружень σ_e в елементах конструкції з допустимим напруженням $[\sigma]$

$$\sigma_e \leq [\sigma].$$

Побудовану геометричну модель вагона-платформи з 45-футовим контейнером показано на рис. 2.



- 1 – упор; 2 – передня пара упорів; 3 – задня пара упорів;
 4 – ліва пара упорів; 5 – права пара упорів
 а) – загальний вид; б) – схема розміщення упорів

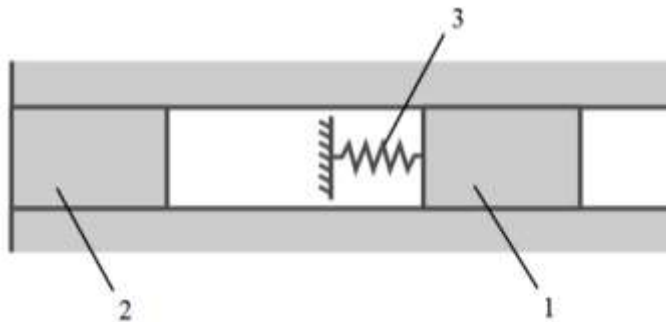
Рис. 2 – Геометрична модель вагона-платформи з контейнером

Геометрична модель складається з наступних елементів: контейнер, елементи його з'єднання з рамою, рама платформи, візки двовісні моделі 18-7055, упори та поглинальні апарати автозчепних пристроїв. Контейнер представлено абсолютно твердим тілом. Об'єм 45-футового контейнера масою 30,48 т дорівнює $81,19 \text{ м}^3$. Густина твердого тіла, що моделює контейнер, дорівнює $375,4 \text{ кг/м}^3$. Густина твердого тіла, що моделює змінний кузов масою 73,6 т, дорівнює $939,8 \text{ кг/м}^3$.

З'єднання контейнера і упорів представлено пружними елементами. Спрощену схему поглинального апарата автозчепу з упорами показано на рис. 3. Упори (1) та (2) моделюються абсолютно твердими тілами у вигляді паралелепіпедів, поглинальний апарат – пружним елементом (3).

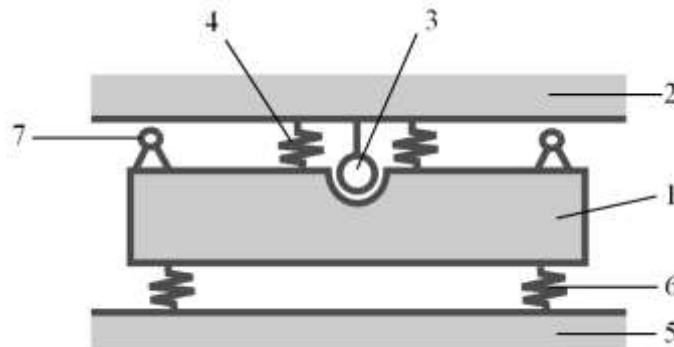
Спрощену схему візків приведено на рис. 4. Центральна балка (1) моделювалась абсолютно твердим тілом у вигляді паралелепіпеду. Ресорні комплекти (6) моделюються об'ємним пружним тілом, яке має інтегральну вертикальну жорсткість, що відповідає жорсткості ресорних комплектів візка. При бокових силах, коли відбувається нахил рами вагона-платформи відносно візка, моделюється контакт рами з візком через ковзун (7) у формі “поверхня-поверхня без сил тертя”.

Принципову схему вузла з'єднання рами та кузова показано на рис. 5.



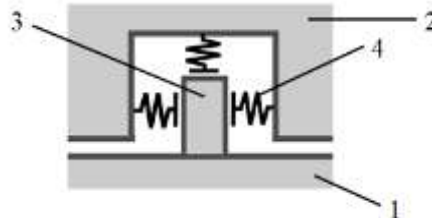
1 – передній упор; 2 – задній упор; 3 – поглинальний апарат автозчепу

Рис. 3 – Спрощена схема поглинального апарата автозчепу з упорами



1 – центральна балка візка; 2 – рама вагона-платформи;
3, 4 – шарнірний вузол та пружини, що моделюють п'ятник та підп'ятник; 5 – колія; 6 – ресорні комплекти візка; 7 – ковзун

Рис. 4 – Спрощена схема візка



1 – рама вагона-платформи; 2 – вантаж; 3 – упор; 4 – пружні елементи

Рис. 5 – Принципова схема вузла з'єднання рами вагона-платформи та кузова

Контейнер або змінний кузов (2) кріпиться на рамі вагона-платформи (1) за допомогою фітингового упору або іншого з'єднання (3). Пружні елементи (4) характеризують інтегральну жорсткість конструкції контейнера або змінного кузова в трьох напрямках.

Скінченно-елементну схему вагона-платформи з контейнером приведено на рис. 6 – 7.

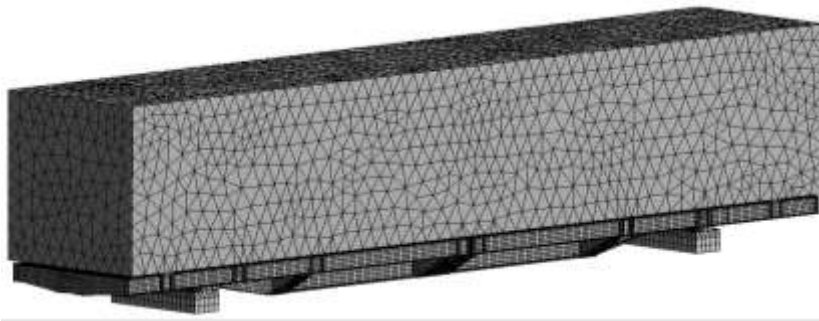


Рис. 6 – Скінченно-елементна схема вагона-платформи з контейнером



а)



б)

а) – вид зверху; б) – вид знизу

Рис. 7 – Скінченно-елементна схема рами вагона-платформи (вид знизу)

Рама вагона-платформи моделюється пластинчастими елементами з трьома або чотирма вузлами, кожен з яких має по три лінійні та кутові переміщення. Ці елементи дозволяють враховувати мембранні та згинальні деформації. Поглинальні апарати автозчепів, упори, візки та контейнер моделюються об'ємними елементами. Використовувались десяти- та двадцятивузлові елементи, кожен вузол із яких має три лінійні переміщення.

При моделюванні контактної взаємодії між елементами досліджуваної конструкції обрано контакт у формі “поверхня-поверхня” і використано розширений метод Лагранжа. Відстань для ініціації контакту складає 1 мм.

Лінійні розміри елементів рами вагона-платформи дорівнюють 50 мм, візка – 100 мм, поглинального апарата – 75 мм, контейнера – 250 мм. Скінченно-елементна схема вагона-платформи з контейнером включає 108067 елементів і 147789 вузлів. Скінченно-елементна схема рами вагона-платформи налічує 29906 елементів і 29887 вузлів, контейнера – 71855 елементів та 103134 вузлів.

Граничні обмеження для механічної системи, що розглядається, показано на рис. 8.

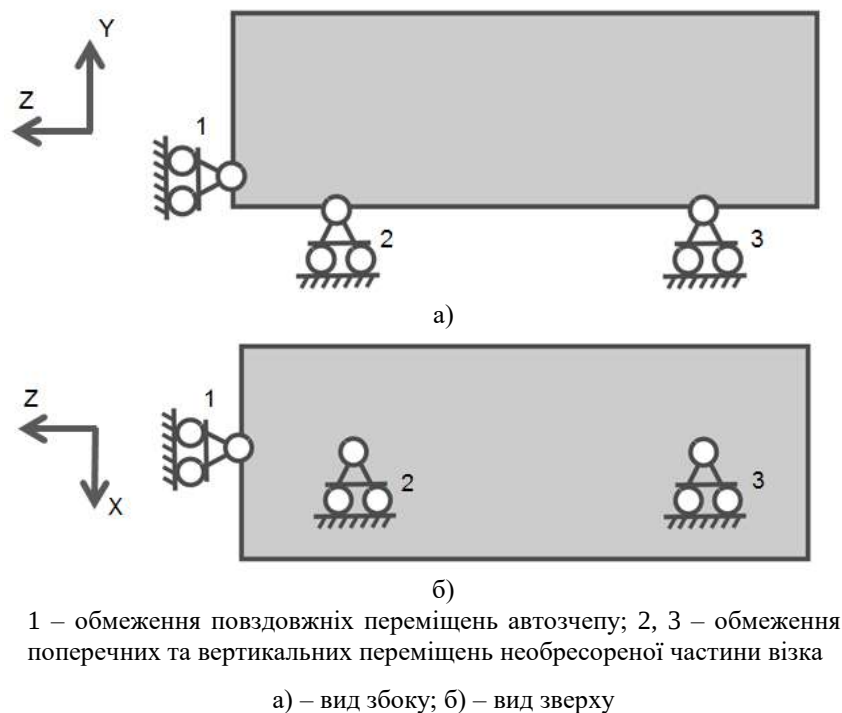


Рис. 8 – Схема граничних обмежень

Нормативні навантаження, що діють згідно з ДСТУ EN 12663-2:2018 на елементи конструкції вантажного вагона, зокрема вагона зі змінним кузовом, при визначених нормативних режимах, приведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Нормативні навантаження згідно з ДСТУ EN 12663-2: 2018

Номер режиму	Назва режиму	Навантаження
1	Режим суперпозиції статичних навантажень для оцінки міцності в експлуатації	$a_x = 0$; $a_y = 1,3 g$; $a_z = \frac{F}{m_b}$.
2	Режим втомного навантаження	$a_x = \pm 0,2 g$; $a_y = (1 \pm 0,3) g$; $a_z = 0$.

Маса тари досліджуваної моделі конструкції екіпажної частини вагона зі змінним кузовом дорівнює 16,1 т, вантажопідйомність 73,6 т. Загальна маса бруто – 89,7 т. В цьому випадку для режиму 1

$$a_z = \frac{F}{m_b} = 22,3 \text{ м/с}^2.$$

Для режиму 2 розглянуто тільки $a_x = 0,2 g$, оскільки конструкція вагона є симетричною відносно поздовжньо-вертикальної площини, та $a_y = 1,3 g$, оскільки це більш важкий випадок вертикального навантаження.

В ДСТУ EN 12663-2:2018 окремо вказано нормативні вимоги до пристроїв кріплення контейнерів. При розгляді роботи конструкції рами вагона-платформи потрібно урахувати зазори в елементах кріплення та передачу навантаження тільки через частину кріплень. При цьому зазначено, що поздовжні та поперечні навантаження повинні розраховуватись для двох кріплень контейнера, тому що одночасно через наявність зазорів усі кріплення разом не зможуть працювати. В той же час вертикальні навантаження повинні розраховуватись для всіх кріплень контейнера до рами вагона-платформи. Вимоги до пристроїв кріплення контейнерів згідно з ДСТУ EN 12663-2: 2018, а саме нормативні навантаження (прискорення), на які потрібно розраховувати конструкції кріплень контейнера до вагона-платформи, приведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Вимоги до пристроїв кріплення контейнерів згідно з ДСТУ EN 12663-2: 2018

Напрямок	Прискорення	Кількість точок фіксації
Поздовжній	2 g	дві точки
Поперечний	1 g	дві точки
Вертикально вниз	2 g	чотири точки
Вертикально вгору	1 g	дві точки

Тобто при розрахунку НДС елементів вагона-платформи з контейнером поздовжні прискорення для режиму 1 повинні дорівнювати 2 g.

Згідно з ДСТУ EN 12663-2:2018 допустимі напруження для оцінки міцності конструкції при розгляді режиму 1 (суперпозиції статичних навантажень) приведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Допустимі напруження згідно з ДСТУ EN 12663-2:2018 для режиму 1

Умови	Характеристика матеріалу	Допустимі напруження, $[\sigma] = [\sigma]_{\text{СТАТ}}$, МПа
Базовий метал	$R_p < 0,8 R_m$	R_p
	$R_p > 0,8 R_m$ і $A_e > 10 \%$	R_p
	$R_p > 0,8 R_m$ і $A_e < 10 \%$	$\frac{R_m}{1,25}$
Метал поблизу зварних швів	$R_p < 0,8 R_m$	$\frac{R_p}{1,1}$
	$R_p > 0,8 R_m$ і $A_e > 10 \%$	$\frac{R_p}{1,1}$
	$R_p > 0,8 R_m$ і $A_e < 10 \%$	$\frac{R_m}{1,375}$

В табл. 4 введено такі позначення:

- R_p – межа плинності;
- R_m – межа міцності;
- A_e – подовження, що береться згідно діючих Європейських або національних стандартів;
- $[\sigma]_{\text{СТАТ}}$ – допустиме напруження для режиму 1 суперпозиції статичних навантажень.

Для виготовлення рами вагона-платформи використано сталь марки 09Г2С. Така сталь має характеристику

$$R_p < 0,8 R_m,$$

і згідно з табл. 4 для неї допустиме напруження $[\sigma] = 325$ МПа, а поблизу зварних швів – $[\sigma] = 295$ МПа.

При аналізі міцності конструкції для режиму 2 втомного навантаження згідно з ДСТУ EN 12663-2:2018 допустимі напруження визначаються таким чином

$$[\sigma] = \sigma_{\text{maxlim}};$$

$$\sigma_{\text{maxlim}} = \text{MIN}(\sigma_{\text{Alim}} \cdot (1 + K) / K; [\sigma]_{\text{СТАТ}});$$

$$\sigma_{\text{Alim}} = (0,46 \cdot R_p) / 2,$$

де σ_{Alim} – допустимий рівень втомного напруження; K – коефіцієнт вертикальної динаміки, що залежить від типу вагона.

Для основних елементів та оброблених швів σ_{maxlim} обчислюються за аналогічним понижувальним коефіцієнтом як і для режиму 1. Для місць, що мають інші зварні шви, σ_{maxlim} задано в стандарті константами. Значення допустимих напружень для сталі 09Г2С приведено в табл. 5.

Таблиця 5 – Значення допустимих напружень для сталі 09Г2С
для режиму 2 згідно з ДСТУ EN 12663-2:2018

Марка сталі	Значення допустимих напружень [σ], МПа				
	1	2	3	4	5
09Г2С клас 325	323 (294)	195	173	143	117
Примітка. 1 – основний метал (або оброблені стикові шви); 2 – стикове зварювання; 3 – стикове зварювання зі зміною інерції; 4 – кутове зварювання; 5 – виступаючий зварний шов.					

Таким чином, розроблено скінченно-елементні моделі для дослідження напружено-деформованого стану елементів вагона-платформи з розташованим на ній 45-футовим контейнером, а також вантажного вагона зі змінним кузовом при статичних нормативних навантаженнях згідно з ДСТУ EN 12663-2:2018, враховуючи особливості кріплення відповідно контейнера до рами вагона-платформи або змінного кузова до рами екіпажної частини вагона та наявності зазорів в елементах кріплень.

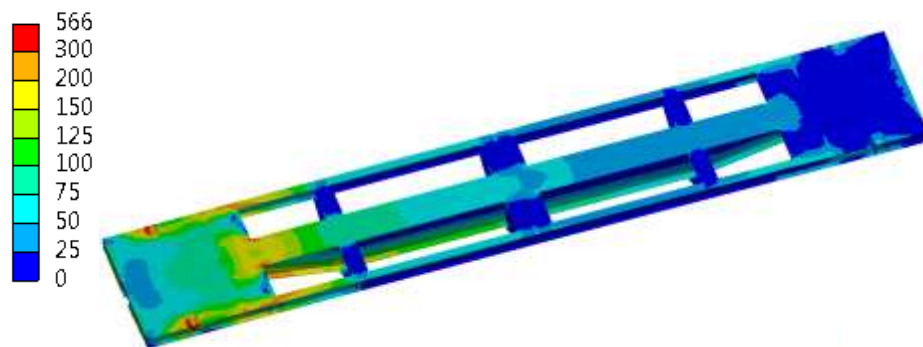
Результати досліджень. За допомогою розроблених скінченно-елементних моделей проведено дослідження НДС елементів вагона-платформи з 45-футовим контейнером масою 30,48 т, а також вантажного вагона зі змінним кузовом масою 73,6 т при нормативних навантаженнях (режими навантажень див. в табл. 2). Опис розрахункових варіантів наведено в табл. 6. При цьому згідно з ДСТУ EN 12663-2:2018 розглянуто чотири випадки взаємодії контейнера з рамою вагона-платформи або змінного кузова з екіпажною частиною вагона (див. рис. 2, б)).

Таблиця 6 – Розрахункові варіанти

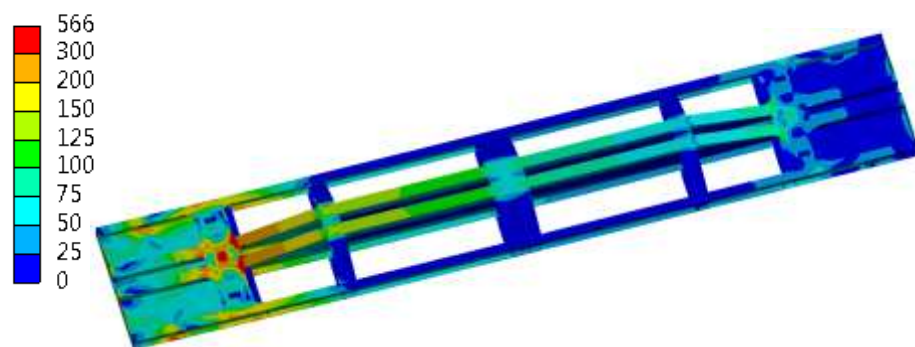
Тип вагона	Номер варіанта	Номер режиму навантажень	Номер випадку взаємодії	Пара фітінгових упорів, через яку передаються навантаження
Вагон-платформа з 45-футовим контейнером масою 30,48 т	1	1	1	Передня
	2	1	2	Задня
	3	2	3	Ліва
	4	2	4	Права
Вагон зі змінним кузовом масою 73,6 т	5	1	1	Передня
	6	1	2	Задня
	7	2	3	Ліва
	8	2	4	Права

На рис. 9 – 10 показано розподіл напружень в елементах конструкції рами екіпажної частини вагона зі змінним кузовом (варіант 5).

Максимальні значення напружень в елементах досліджуваних конструкцій для різних розрахункових варіантів наведено в табл. 7.



а)

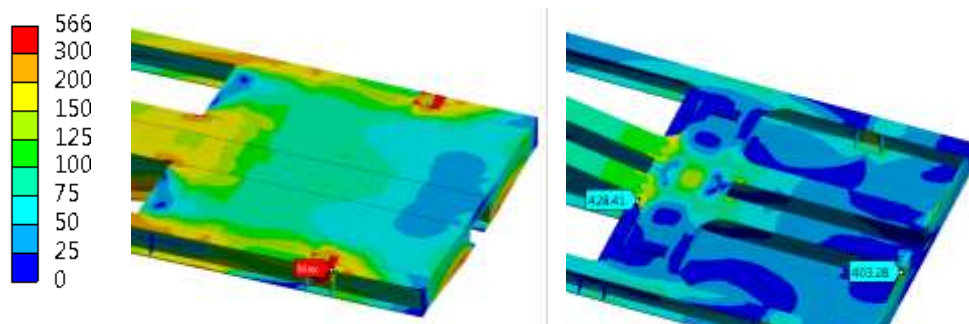


б)

а) – вид зверху; б) – вид знизу

Значення напружень дано в МПа

Рис. 9 – Розподіл напружень в елементах рами екіпажної частини вагона зі змінним кузовом (варіант 5)



а)

б)

а) – зона розташування передньої пари фітингових упорів;
б) – передня шворнева балка

Значення напружень дано в МПа

Рис. 10 – Розподіл напружень в найбільш навантажених елементах рами екіпажної частини вагона зі змінним кузовом (варіант 5)

Таблиця 7 – Максимальні значення напружень в елементах досліджуваних конструкцій для різних розрахункових варіантів

Вагон-платформа з 45-футовим контейнером масою 30,48 т		Вагон зі змінним кузовом масою 73,6 т	
Номер варіанта	Максимальне значення напруження, МПа	Номер варіанта	Максимальне значення напруження, МПа
1	207	5	567
2	225	6	620
3	132	7	329
4	134	8	309

Аналіз результатів розрахунків показав, що максимальний рівень напружень в конструкції рами вагона-платформи (варіанти 1 – 2) спостерігається в зоні розміщення тієї пари упорів, що працює. Для варіантів 3 – 4 максимальний рівень напружень спостерігається на торцевій балці рами. Для варіантів 1 – 4 міцність конструкції рами вагона-платформи відповідає нормативним вимогам ДСТУ EN 12663-2:2018.

В результаті розрахунків НДС елементів конструкції вагона зі змінним кузовом (варіанти 5 – 6) отримано, що максимальний рівень напружень спостерігається в зоні розміщення тієї пари фітингових упорів, через яку виконується передача поздовжнього навантаження від змінного кузова на раму екіпажної частини вагона. Для варіантів 7 і 8 максимальні напруження спостерігаються на торцевих балках рами екіпажної частини вагона. Таким чином, в результаті виконаних досліджень встановлено, що характер розподілу напружень в елементах вагона зі змінним кузовом є аналогічним розподілу напружень в елементах вагона з 45-футовим контейнером для відповідних розрахункових варіантів.

Як видно з табл. 7, на відміну від отриманих результатів розрахунків НДС вагона-платформи з 45-футовим контейнером (варіанти 1 – 4), що підтвердили виконання вимог до міцності конструкції рами вагона-платформи, аналіз результатів розрахунків НДС елементів конструкції вагона зі змінним кузовом (варіанти 5 – 7) показав, що міцність конструкції рами екіпажної частини вагона не відповідає вимогам ДСТУ EN 12663-2:2018. Виконані дослідження свідчать про необхідність посилення елементів кріплення змінного кузова до екіпажної частини вагона та удосконалення самої конструкції рами екіпажної частини вагона. Для забезпечення міцності конструкції рами екіпажної частини вагона зі змінним кузовом потрібно зробити перерозподіл навантажень та перейти від зосереджених навантажень до розподілених за рахунок збільшення кількості елементів кріплення, які передають експлуатаційні навантаження від кузова на раму.

Висновки. Розроблено скінченно-елементні моделі для дослідження напружено-деформованого стану елементів вагона-платформи з 45-футовим контейнером, а також вантажного вагона зі змінним кузовом при нормативних навантаженнях з урахуванням особливостей кріплення змінного кузова до рами екіпажної частини вагона та наявності зазорів в елементах кріплень.

За допомогою розроблених скінченно-елементних моделей проведено дослідження напружено-деформованого стану елементів розглянутих конструкцій при дії нормативних навантажень. Відповідно до вимог

ДСТУ EN 12663-2:2018 дано оцінку міцності елементів конструкції рами вагона-платформи при різних режимах навантажень. Встановлено, що міцність досліджуваної конструкції рами вагона-платформи з 45-футовим контейнером відповідає нормативним вимогам, а міцність конструкції рами екіпажної частини вагона зі змінним кузовом не відповідає вимогам ДСТУ EN 12663-2:2018. Виконані дослідження свідчать про необхідність посилення елементів кріплення змінного кузова до екіпажної частини вагона та удосконалення самої конструкції рами екіпажної частини вагона.

1. Національна економічна стратегія 2030. URL: <https://nes2030.org.ua/#rec246067109> (дата звернення: 08.05.2023).
2. Постанова Кабінету Міністрів України від 03 березня 2021 р. № 179 Про затвердження Національної економічної стратегії на період до 2030 року. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-nacionalnoyi-eko-a179> (дата звернення: 08.05.2023).
3. Орлова А. В чем отличия и преимущества сменных и съемных кузовов грузовых вагонов. URL: <https://wagon-cargo.ru/news/v-chem-otlichiya-i-preimushchestva-smennykh-i-semnykh-kuzovov-gruzovykh-vagonov/> (дата звернення: 30.11.2021).
4. Давидан А. Сменный кузов вагона – перспективная инновация в сфере транспортных услуг. URL: <https://spec.rzd-partner.ru/page16921814.html> (дата звернення: 30.11.2021).
5. Давидан А. Е. Бороненко Ю. П. Сменный кузов вагона – перспективная инновация в сфере транспортных услуг. URL: <http://%D0%BC%D0%BE%D1%8F%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D1%8F1520.%D1%80%D1%84/new/7411/> (дата звернення: 30.11.2021).
6. Вагоны со сменными кузовами. URL: https://www.uniwagon.com/multimedia/media_about_us/vagony-so-smennymi-kuzovami/ (дата звернення: 30.11.2021).
7. SECU-Box for Better utilization of Load Capacity. Advantage Environment – 2009. URL: <http://advantage-environment.com> (дата звернення: 08.05.2023).
8. InnoFreight. InnoWaggon – No base, no go. URL: <https://www.innofreight.com/en/logistics-solutions/inno-waggon/> (дата звернення: 08.05.2023).
9. Innovations WASCOSA flex freight system® with timber cassette swap body. URL: https://www.wascosa.ch/wagenpark/pdf/en/innovationen/inno_wascosa_flex_freight_system_timber_swap_body.pdf (дата звернення: 08.05.2023).
10. Innovations WASCOSA flex freight system® with E-type swap body. URL: https://www.wascosa.ch/wagenpark/pdf/en/innovationen/inno_wascosa_flex_freight_system_e_type_swap_body.pdf (дата звернення: 08.05.2023).
11. Wascosa introduces the Wascosa flex freight system for transporting chemical products. URL: <https://tanknewsinternational.com/wascosa-introduces-the-wascosa-flex-freight-system-for-transporting-chemical-products/> (дата звернення: 08.05.2023).
12. TransANT: инновационные грузовые вагоны. URL: <https://www.railway.supply/transant-innovacionnye-gruzovye-vagony/> (дата звернення: 08.05.2023).
13. В Австрии изготовлена первая партия инновационных модульных грузовых вагонов. URL: https://logist.today/dnevnik_logista/2019-11-23/v-avstrii-izgotovlena-pervaja-partija-innovacionnyh-modulnyh-gruzovyh-vagonov/ (дата звернення: 08.05.2023).
14. Шестиосный вагон-платформа сочлененного типа со сменными кузовами, модель 13-9994*. URL: <http://%D0%B2%D1%80%D0%B5%D0%BC%D1%8F%D0%BE%D0%B2%D0%BA.online/view/wagons/13-9994/> (дата звернення: 30.11.2021).
15. ПАТ “Крюківський вагонобудівний завод”. Вагон-платформа модель 13-7133 і 13-7133-01. URL: <https://www.kvsz.com/index.php/ua/produksiya/vantazhne-vagonobuduvannya/vagoni-platformi/item/2415-vahon-platforma-model-13-7133-i-13-7133-01> (дата звернення: 08.05.2023).
16. ДСТУ ISO 668:2015 (ISO 668:2013, IDT) Вантажні контейнери серії 1. Класифікація, розміри та номінальні характеристики. URL: <http://csm.kiev.ua/nd/nd.php?b=1&l=3776> (дата звернення: 08.05.2023).
17. ДСТУ EN 12663-2:2018 (EN 12663-2:2010, IDT) Залізничний транспорт. Конструкційні вимоги до кузовів залізничних транспортних засобів. Частина 2. Вантажні вагони. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=81572 (дата звернення: 08.05.2023).
18. ДСТУ 7598:2014 Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=73763 (дата звернення: 08.05.2023).
19. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
20. Александров А. В., Потапов В. Д. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа, 1990. 400 с.
21. Каплун А. Б. Ansys в руках инженера. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.

Отримано 16.05.2023,
в остаточному варіанті 24.05.2023