

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 629.464.46:624.014.2

Л. І. КЛОЧКО^{1*}

^{1*}Фак. «Будівництво, архітектура та інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 558 44 16, ел. пошта leoniddzmk@gmail.com, ORCID 0009-0009-3478-6076

Несні сталеві конструкції для встановлення залізничних тензометричних ваг

Мета. Основною метою публікації є зіставлення за основними техніко-економічними показниками двох запропонованих конструктивних варіантів опорної системи для залізничних тензометричних ваг під чотири-вісні вагони широкої колії. Це обумовлено необхідністю проведення реконструкції і модернізації основних фондів промислового підприємства, зокрема капітальної перебудови та заміни старих залізничних ваг на сучасні електронні тензометричні ваги. Також мета роботи пов'язана з необхідністю розширення номенклатури залізничних вагонів, для яких передбачена можливість зважування, включаючи й транспортні одиниці закордонного вагонного парку. **Методика.** Для досягнення зазначеної мети проаналізовано сучасні види залізничних вагонів для вантажних перевезень, визначено основні складові тензометричних ваг для зважування основних видів вагонів та розроблено спеціальну опорну систему для підтримання платформи ваг. Опорна система передбачена у двох конструктивних варіантах – з однією просторовою несною рамою та з двох окремих плоских несних рам. За допомогою вітчизняного проектно-обчислювального комплексу SCAD побудовано скінченноелементні моделі для обох запропонованих конструктивних варіантів. На основі аналізу їх напружено-деформованого стану підібрано раціональні перерізи для кожного конструктивного елемента, а також визначено загальну масу. **Результати.** Проведений порівняльний аналіз двох розроблених конструктивних рішень для опорної системи під сучасні залізничні тензометричні ваги дозволив установити, що варіант із двох окремих несних рам має меншу масу приблизно на 40 % відносно варіанта з однією просторовою несною рамою. Проте технологічність його виготовлення є дещо нижчою, оскільки при цьому задіяно 10 конструктивних елементів проти 7 варіанта № 1. **Наукова новизна.** Проведений чисельний аналіз дозволив теоретично обґрунтувати більш раціональне та ефективне конструктивне рішення для опорної системи під сучасні залізничні тензометричні ваги. **Практична значимість.** Розроблено та запропоновано для практичної реалізації конструктивний варіант сталеві опорної системи, який за своїми техніко-економічними показниками є найефективнішим для наявних умов діючого промислового підприємства. Також розроблений конструктивний варіант узгоджено з проектом капітальної реконструкції будівлі для зважування залізничних вагонів.

Ключові слова: вантажний вагон; сталева опорна система; залізничні тензометричні ваги; метод скінченних елементів; проектно-обчислювальний комплекс SCAD

Вступ

Сучасний залізничний транспорт становить доволі потужну систему, яка за обсягами перевезень і рівнем застосування технічних засобів є однією з провідних галузей багатьох країн світу. Зокрема, українська залізниця за своїми розмірами та пропускну здатністю поси-

дає дванадцяте місце серед залізниць цивілізованих країн світу (табл. 1).

Оскільки залізничні перевезення є надзвичайно різноманітними, то й вагонний парк є також доволі різнотипним як за призначенням, так і за вантажопідйомністю (рис. 1). Для перевезення різних типів вантажів використовують низку типорозмірів вагонів – платформи, криті вагони, піввагони, цистерни, хопери, ре-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

фрижератори, автовози, лісовози, бітумовози, вагони для тварин і перевезення невологостійких вантажів тощо (рис. 1). Відповідно, такий широкий спектр вагонного парку вимагає потужних можливостей щодо точного контролю ваги вантажів, які перевозять.

Для зважування вагонів використовують спеціальні пристрої – залізничні ваги. Вони бувають різноманітні, їх класифікують за такими ознаками: за принципом дії, за призначенням, за типом зважування, за типом конструктивного рішення, за типом електронного обладнання (для електронних вагів), за типом зважуваного вагона, за типом колії тощо. Основну класифікаційну схему наведено на рис. 2.

Найбільш поширеним типом є статичні електронні тензометричні ваги, які розташовують на підприємствах приймання та відправлення вантажів (на рис. 2 їх виділено жовтим кольором). Конструктивно такі ваги влаштовують у спеціальних фундаментних приміщеннях, вони не потребують додаткових обслуговувальних будівель. Зазвичай їх накривають відносно легкою конструкцією піддашка, яка виконує функцію захисту від небезпечних природно-кліматичних умов і створює прийнятні умови для роботи обслуговочого персоналу.

Загальне технічне рішення таких ваг для чотиривісних вагонів широкої колії, характерної для вітчизняної залізниці, представлено на рис. 3.

a – a*г – д**б – б**д – е**в – в**е – ф*

Рис. 1. Основні типи вантажних вагонів української залізниці:
a – платформа; *б* – критий вагон; *в* – піввагон; *г* – цистерна; *д* – хопер; *е* – рефрижератор
 Fig. 1. The main types of freight cars of the Ukrainian railway:
a – platform; *b* – covered wagon; *c* – semi-wagon; *d* – tank; *e* – hopper; *f* – refrigerator

Таблиця 1

Довжина залізничної мережі країн світу

Table 1

Length of the railway network in the world

№ з/п	Країна	Довжина залізниць, км
	Весь світ	1 122 650
1	США	194 731
2	Китай	71 600
3	Індія	63 518
4	Канада	49 422
5	Німеччина	45 514
6	Австралія	41 588
7	Аргентина	34 463
8	Франція	32 682
9	Бразилія	31 543
10	Польща	23 420
11	Японія	23 168
12	Україна	22 473
13	ПАР	22 298
14	Мексика	19 510
15	Італія	19 493
16	Англія	16 893
17	Іспанія	14 189
18	Казахстан	13 601

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

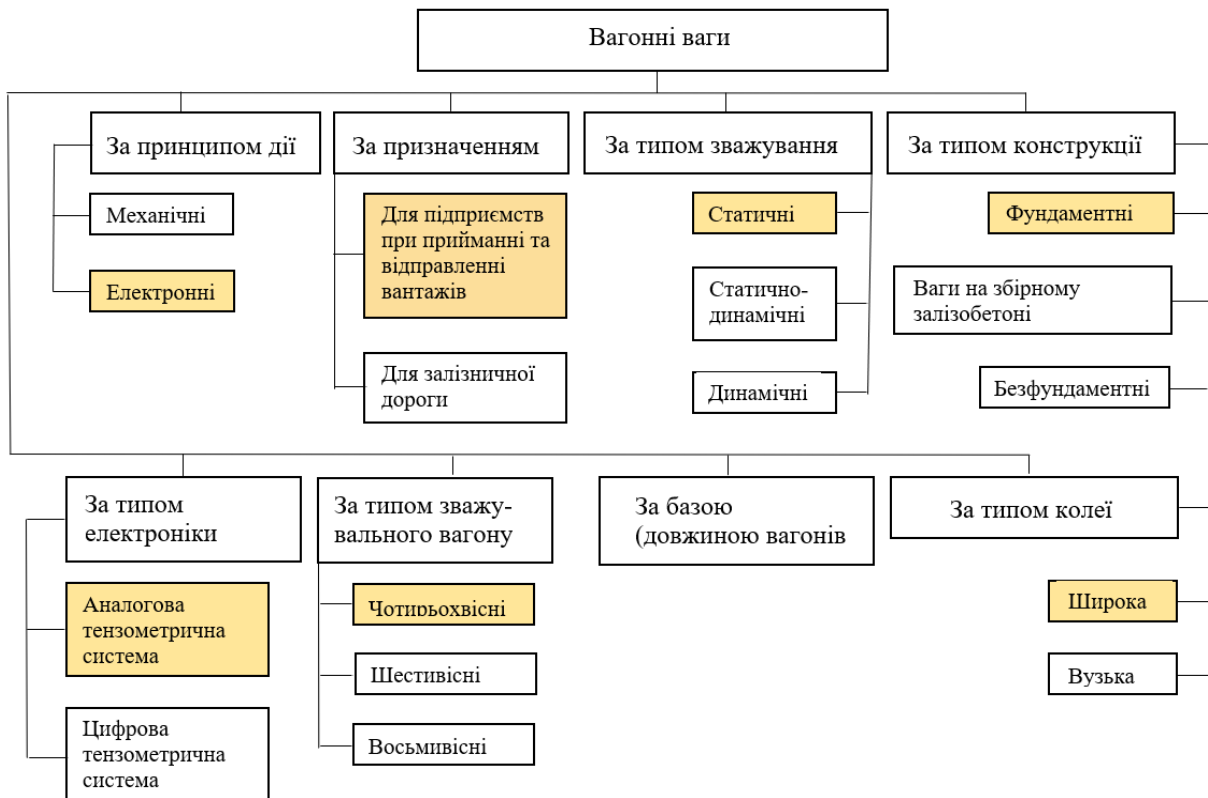


Рис. 2. Класифікація залізничних вагонних ваг

Fig. 2. Classification of railway wagon scales

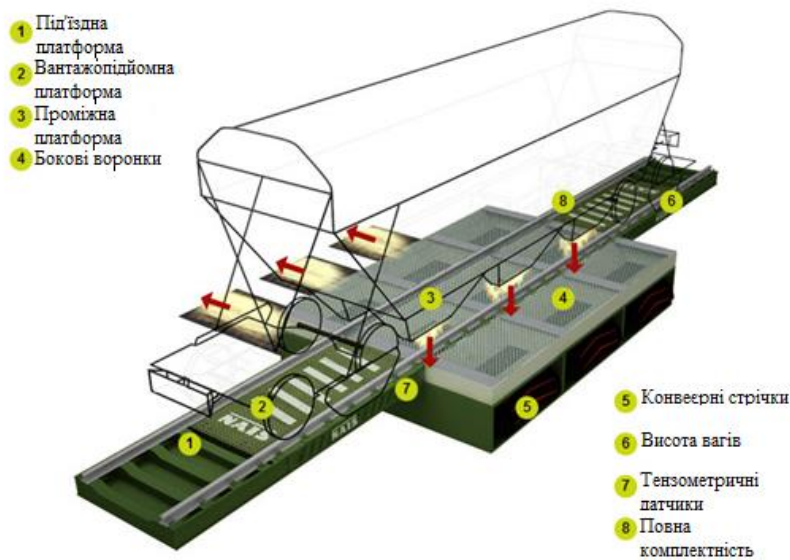


Рис. 3. Загальне технічне рішення залізничних вагонних ваг

Fig. 3. General technical solution for railroad wagon scales

Відповідно до [12], для сучасних темпів розвитку промисловості характерна доволі швидка зміна видів продукції, випуск якої залежить від виробничих потужностей. Це вимагає зміни обладнання, яка в машинобудівній галузі відбувається з періодичністю раз на 15 років, у будівельній – раз на 8 років, а в електронній – раз на 5 років. При цьому фізична довговічність промислових будівель перебуває в межах 100 років [3]. Таким чином, за життєвий цикл будівлі подібна зміна технологій відбувається в середньому до 10 разів. Тому постає необхідність проведення ефективної реконструкції таких будівель і промислових підприємств у цілому, пристосування їх до новітніх викликів ринку та нових виробничих потужностей.

Саме така ситуація все частіше виникає на підприємствах залізничної галузі України і спонукає власників цих підприємств переходити на нові, більш сучасні проектно-конструкторські рішення щодо капітальних фондів. Для підприємств, пов'язаних із залізничними перевезеннями, при цьому нерідко виникає необхідність переоснащення або додаткового встановлення ваг для зважування вантажних вагонів. Саме така ситуація – потреба модернізації застарілої конструкції під залізничні ваги – постала на одному з підприємств Дніпропетровської області.

Мета

Основною метою цього дослідження є розробка ефективної опорної конструкції для встановлення сучасних залізничних тензометричних ваг.

Методика

Для розташування сучасних залізничних тензометричних ваг необхідно було виконати реконструкцію наявної виробничої одноповерхової будівлі (рис. 4). Будівля слугувала для розміщення застарілих механічних залізничних ваг, до того ж ще й доволі зношених під час тривалої експлуатації.

З архітектурної точки зору будівля мала прямокутну в плані форму з розмірами $18,0 \times 16,8$ м та висотою 7,4 м до верху покрівлі. Фундаменти стрічкові під зовнішні стіни із глибиною закладання 4,3 м.

Із конструктивної точки зору будівля виконана за каркасною системою зі збірних конструкцій. На залізобетонні консольні колони укладені горизонтальні ригельні балки, які є несними елементами конструкції покриття.

Підвальна частина будівлі має спеціальне заглиблення з розмірами в плані $7,3 \times 16,8$ м за максимальної глибини 6,56 м. Внутрішній простір заглиблення поділений на окремі блоки спеціальними залізобетонними вертикальними стінками. По зовнішньому периметру підвальна частина відгороджена від навколишнього ґрунту залізобетонними стіновими конструкціями товщиною 400 мм. Із такої ж конструкції влаштована й нижня частина підвального приміщення, яка утворює замкнену просторову коробчасту систему.

Під час модернізації передбачено, що ця коробчаста підвальна частина будівлі в конструктивному плані буде залишена без змін, проте будуть виконані деякі ремонтні роботи з її оновлення. Щодо верхньої залізобетонної каркасної конструкції будівлі було прийнято рішення її повного демонтажу й заміни на легку навісну конструкцію зі сталевих каркасу. Сам каркас спроектовано окремо відповідно до чинних стандартів [4, 5].

Задача заміни старих ваг на сучасні тензометричні потребувала розробки спеціальної опорної конструкції. Вона була необхідна для підтримання платформи залізничних ваг. Було розглянуто 2 варіанти конструкції опорної системи:

- варіант № 1 – з однією просторовою несною рамою;
- варіант № 2 – з двох окремих незв'язаних несних рам.

Обидва конструктивні варіанти виконано зі сталевих прокатних профілів відповідно до чинних в Україні стандартів на металопрокат [6–11].

Для аналізу роботи конструктивних варіантів узято метод скінченних елементів [13, 15, 16, 19, 20]. При цьому застосовано вітчизняний проектно-обчислювальний комплекс SCAD [17]. Під час скінченноелементного моделювання використано авторські розробки і напрацювання, представлені в роботах [1, 2, 14, 18].

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

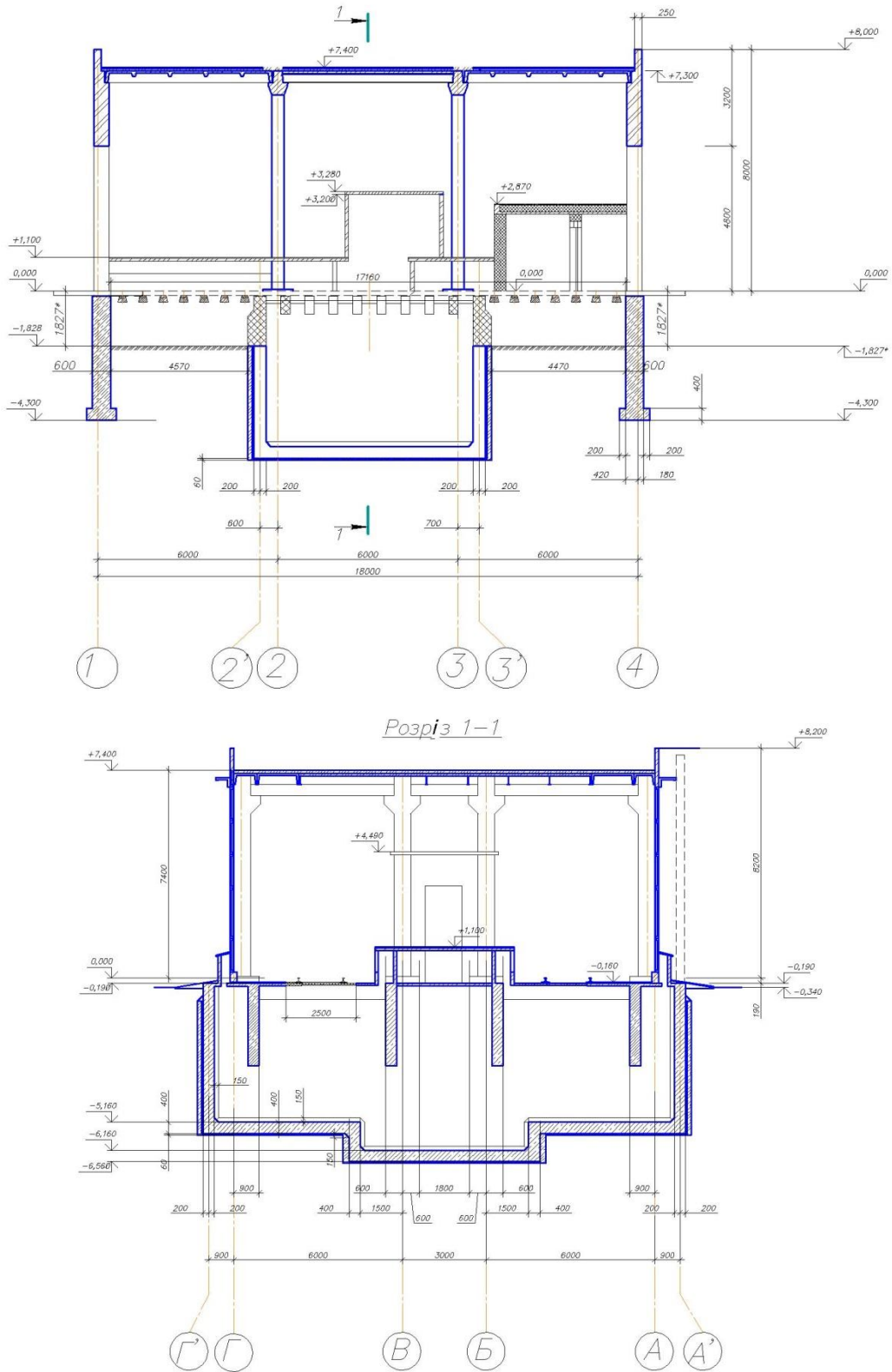


Рис. 4. Конструктивне рішення будівлі для реконструкції під залізничні ваги

Fig. 4. Structural solution of the building for reconstruction for railway scales

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

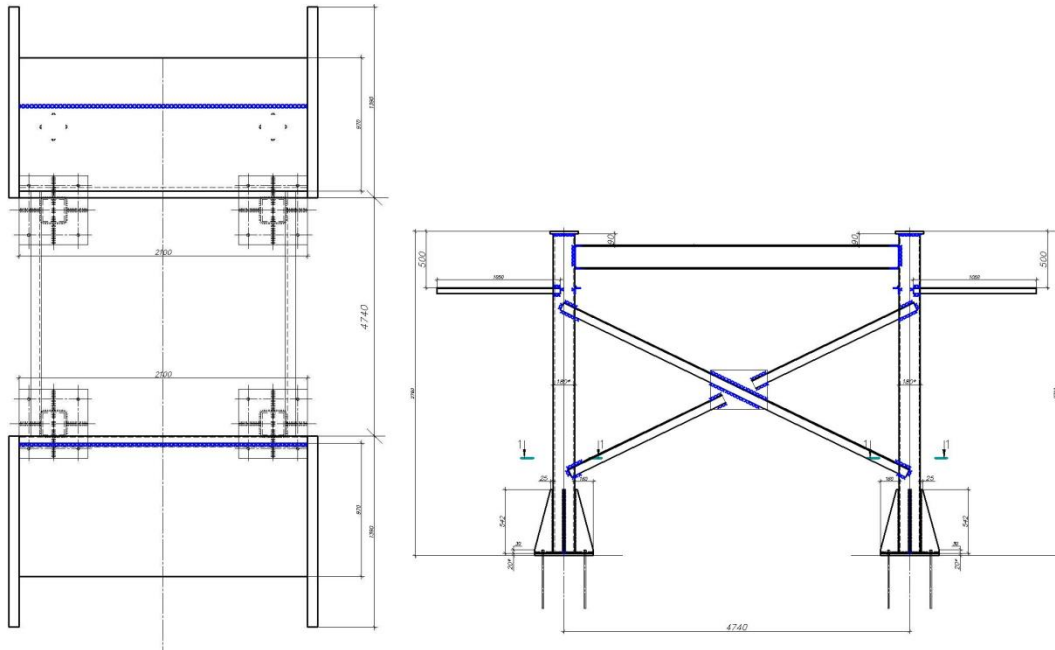
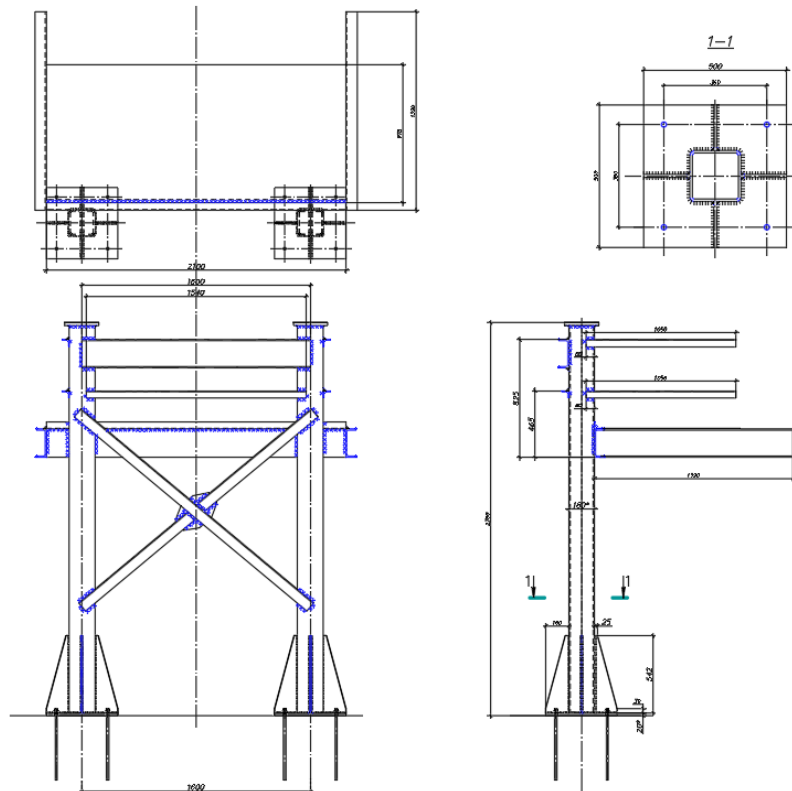
a – a*б – б*

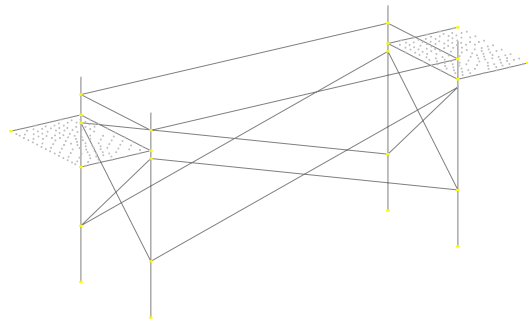
Рис. 5. Конструктивне рішення опорної системи під залізничні ваги:
a – варіант № 1; *б* – варіант № 2

Fig. 5. Constructive solution of the support system for railway scales:
a – variant No. 1; *b* – variant No. 2

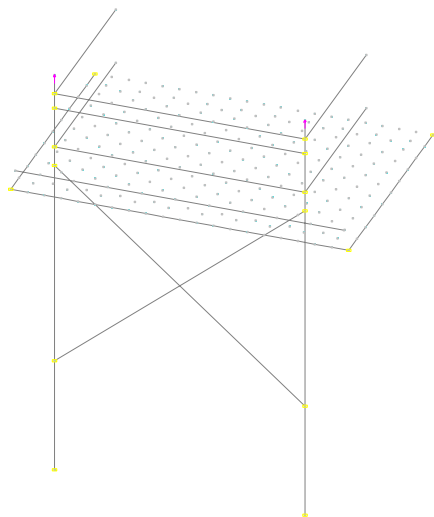
Результати

Побудовані скінченноелементні моделі в проектно-обчислювальному комплексі SCAD для обох розглядуваних конструктивних варіантів опорної системи під залізничні ваги наведено на рис. 6. Моделі являють собою пластинчасто-стрижневі системи, у яких для підвищення достовірності отриманих результатів використано спеціальні скінченні елементи з односторонніми зв'язками. Це дозволило більш коректно відобразити передачу зовнішніх навантажень від власної ваги платформи

a – a



б – б



залізничних ваг і власної ваги вагона для зважування.

На рис. 6 також представлено отримані зображення деформацій від заданого навантаження, а в табл. 1 і 2 наведено результати підбору поперечних перерізів для обох конструктивних варіантів разом із розрахованими показниками маси. Оскільки роботи було виконано у 2020–2021 рр., то розраховані тоді цінові показники сьогодні не є актуальними, а тому в цій публікації з етичних і економічних міркувань їх не наведено.

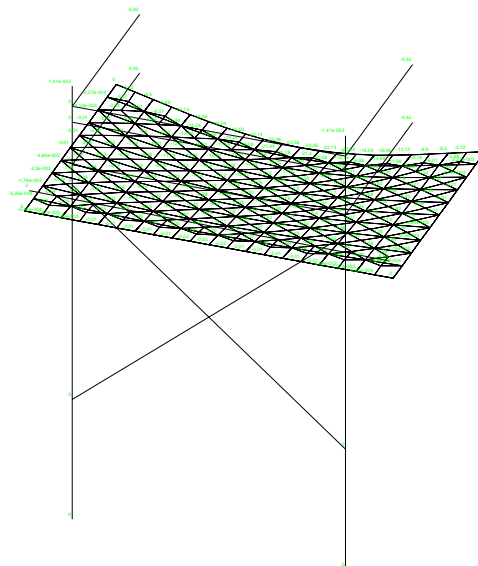
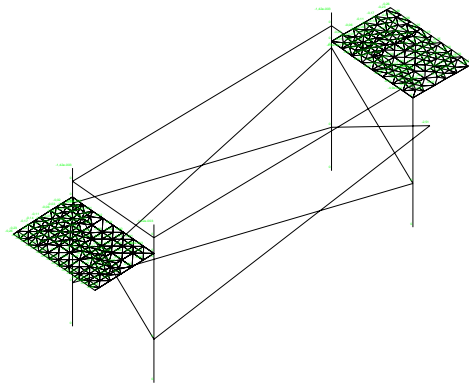


Рис. 6. Модель і деформована схема опорної системи під залізничні ваги:
a – варіант № 1; *б* – варіант № 2

Fig. 6. Model and deformed diagram of the support system for railway scales:
a – variant No. 1; *b* – variant No. 2

Таблиця 1

Підібрані поперечні перерізи для конструктивного варіанта № 1

Table 1

Selected cross-sections for design option No. 1

Елемент	Кількість, шт.	Переріз	Вага кг/м.п.(м ²)	Загальна маса конструкції, т
Стояк	4	□ 180 × 12	61,36	2,1
Вертикальна в'язь (поперечний напрям)	2	└ 60 × 4	2,70	
Вертикальна в'язь (поздовжній напрям)	2	└ 140 × 9	19,41	
Конструкція під настил	2	└ 60 × 4	2,70	
Настил	2	t 6	47,10	
Розпірка (поперечний напрям)	2	[5	4,84	
Розпірка (поздовжній напрям)	2	[14	12,30	

Таблиця 2

Підібрані поперечні перерізи для конструктивного варіанта № 2

Table 2

Selected cross-sections for design option No. 2

Елемент	Кількість, шт.	Переріз	Вага кг/м.п.(м ²)	Загальна маса конструкції, т
Стояк	4	□ 180 × 12	61,36	1,3
Вертикальна в'язь	2	└ 60 × 4	3,68	
Конструкція під настил	2	└ 60 × 4	3,68	
Настил	2	t 6	47,10	
Розпірка (рівень 1)	2	[5	4,84	
Консольна частина (рівень 1)	4	[5	4,84	
Розпірка (рівень 2)	2	└ 40 × 3	1,85	
Розпірка (рівень 3)	2	└ 25 × 3	1,12	
Розпірка (рівень 4)	2	└ 25 × 3	1,12	
Консольна частина (рівень 4)	4	└ 25 × 3	1,12	

У цілому напружено-деформований стан для обох розглянутих конструктивних варіантів опорної системи доволі близький. Відмінності полягають у способі взаємодії вертикальних несних елементів із горизонтальними несними елементами.

Значення отриманих максимальних вертикальних деформацій для конструктивного варіанта № 1 становить 2,51 мм, а для конструктивного варіанта № 2 – 2,36 мм.

Як видно з табл. 1, загалом конструктивний варіант № 1 містить меншу кількість елементів ніж варіант № 2, тобто технологічність його

виготовлення в практичних умовах є вищою. Проте загальна маса варіанта № 1 є майже вдвічі вищою ніж варіанта № 2. Через це як остаточне рішення слід рекомендувати варіант № 2 для його практичної реалізації.

Наукова новизна та практична значимість

Таким чином, у цій публікації проведено теоретичне зіставлення двох розроблених конструктивних варіантів для опорної системи під сучасні залізничні тензометричні ваги. При цьому з наукової точки зору обґрунтовано конструктивні та масові показники кожного з варіантів за допомогою сучасного чисельного методу скінченних елементів.

Остаточний обраний конструктивний варіант доопрацьовано під конкретні місцеві умови виробничого підприємства. Це дозволяє його практичну реалізацію навіть за умов діючого виробництва.

Висновки

Проведений порівняльний аналіз двох розроблених конструктивних рішень для опорної системи під сучасні залізничні тензометричні ваги дозволив установити, що варіант із двох окремих незв'язаних несних рам має меншу масу приблизно на 40 % відносно варіанта з однією просторовою несною рамою. Проте технологічність його виготовлення є дещо нижчою, оскільки при цьому задіяно 10 конструктивних елементів проти 7 конструктивних елементів варіанта № 1.

Остаточний обраний конструктивний варіант можна рекомендувати до практичної реалізації в умовах діючого промислового підприємства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Банніков Д. О. Використання будівельно-орієнтованого ПК SCAD для аналізу роботи машинобудівних конструкцій. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. Вип. 1 (73). С. 98–111. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123406>
2. Безсалий В. М., Банніков Д. О. Ефективність сталевих тонкостінних оцинкованих профілів для аркових елементів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2019. Вип. 16. С. 20–29. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189428>
3. ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. *Норми проектування. Зі змінами № 1 та № 2* [Чинний від 2007-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2006. 70 с.
4. ДБН В.1.2-14:2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. *Зі зміною № 1* [Чинний від 2022-09-01]. Київ : Мінрегіонбуд, 2018. 36 с.
5. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. *Норми проектування. Зі зміною № 1* [Чинний від 2015-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2014. 220 с.
6. ДСТУ 2251:2018 Кутики сталеві гарячекатані рівнополічні. *Сортамент* [Чинний від 2019-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 10 с.
7. ДСТУ 3436-96 Швелери сталеві гарячекатані. *Сортамент* [Чинний від 1999-01-01]. Київ : Держстандарт України, 2004. 11 с.
8. ДСТУ 4747:2007 (EN 10058:2003, NEQ) Прокат сортовий сталевий гарячекатаний штабовий. *Сортамент* [Чинний від 2009-01-01]. Київ : Держспоживтсандарт України, 2007. 14 с.
9. ДСТУ 8540:2015 Прокат листовий гарячекатаний. *Сортамент* [Чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 11 с.
10. ДСТУ 8769:2018 Кутики сталеві гарячекатані нерівнополічні. *Сортамент* [Чинний від 2019-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 10 с.
11. ДСТУ Б В.2.6-8-95 Будівельні конструкції. Профілі сталеві гнуті замкнуті зварні квадратні і прямокутні для будівельних конструкцій. *Технічні умови* [Чинний від 1996-04-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 1996. 16 с.
12. Крет І. З., Петрушка Т. О., Товкан О. Е. Техніко-технологічна база та її оновлення як складник економічного розвитку підприємства. *Бізнес-навігатор*. 2019. Вип. 2 (51). С. 75–79.

13. Ahmed S., Abdelhamid H., Ismail B., Ahmed F. Differential Quadrature Finite Element and the Differential Quadrature Hierarchical Finite Element Methods for the Dynamics Analysis of on Board Shaft. *European Journal of Computational Mechanics*. 2021. Vol. 29. Iss. 4–6. P. 303–344. DOI: <https://doi.org/10.13052/ejcm1779-7179.29461>
14. Bannikov D., Radkevich A., Nikiforova N. Features of the Design of Steel Frame Structures in India for Seismic Areas. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 968. P. 348–354. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.348>
15. Bofang Z. *The finite element method: fundamentals and applications in civil, hydraulic, mechanical and aeronautical engineering*. Singapore : John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119107323>
16. Chen L. P., Yang, Y. A. New Mixed Finite Element Method for Biot Consolidation Equations. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*. 2020. Vol. 6, No. 12. P. 1520–1541. DOI: <https://doi.org/10.4208/aamm.OA-2019-0174>
17. Fialko S., Karpilovskyi V. Time history analysis formulation in SCAD FEA software. *Journal of Measurements in Engineering*. 2018. Vol. 6, No. 4. P. 173–180. DOI: <https://doi.org/10.21595/jme.2018.20408>
18. Kruhlikova N. G., Bannikov D. O. Rational design of shot-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Science and Transport Progress*. 2019. No. 2 (80). P. 144–152. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853>
19. Kumar A., Shitole P., Ghosh R., Kumar R., Gupta A. Experimental and numerical comparisons between finite element method, element-free Galerkin method, and extended finite element method predicted stress intensity factor and energy release rate of cortical bone considering anisotropic bone modelling. *Proceedings of the institution of mechanical engineers part h-journal of engineering in medicine*. 2019. Vol. 233, No. 8. P. 823–838. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954411919853918>
20. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Fox D. D. *The finite element method for solid and structural mechanic*. Elsevier LTD, 2014. 672 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/c2009-0-26332-x>

L. I. KLOCHKO^{1*}

^{1*}Faculty «Construction, Architecture and Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 558 44 16, e-mail leoniddzmk@gmail.com, ORCID 0009-0009-3478-6076

Bearing Steel Structures for Installation of Railway Strain Gauge Scales

Purpose. The main purpose of the publication is to compare the main technical and economic indicators of the two proposed structural variants of the support system for railway strain gauge scales for four-axle wide gauge railcars. This is due to the need to reconstruct and modernize the fixed assets of an industrial enterprise, in particular, to overhaul and replace old railway scales with modern electronic strain gauge scales. Also, the purpose of the work is related to the need to expand the range of railway cars for which the possibility of weighing is provided, including transport units of the foreign car fleet. **Methodology.** To achieve this goal, we analyzed the modern types of railroad cars for freight transportation, determined the main components of strain gauge scales for weighing the main types of cars, and developed a special support system to support the scale platform. The support system is provided in two design variants - with one spatial support frame and two separate flat support frames. Using the domestic design and computing complex SCAD, we built finite element models for both proposed design options. Based on the analysis of their stress-strain state, rational cross-sections were selected for each structural element, and the total mass was determined. **Findings.** A comparative analysis of the two developed structural solutions for the support system for modern railway strain gauges has revealed that the variant with two separate bearing frames has a lower weight by about 40 % compared to the variant with one spatial bearing frame. However, the manufacturability of its production is somewhat lower, since it involves 10 structural elements compared to 7 for variant No. 1. **Originality.** The numerical analysis made it possible to theoretically substantiate a more rational and efficient design solution for the support system for modern railway strain gauge scales. **Practical value.** A constructive variant of the steel support system has been developed and proposed for practical implementation, which is the most effective in terms of its technical and economic indicators for the existing conditions of an existing industrial enterprise. The developed design option was also coordinated with the project of major reconstruction of the building for weighing railroad cars.

Keywords: freight car; steel support system; railway strain gauge scales; finite element method; SCAD design and computer complex

REFERENCES

1. Bannikov, D. O. (2018). Usage of construction-oriented software scad for analysis of work of machine-building structures. *Science and Transport Progress*, 1(73), 98-111.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123406> (in Ukrainian)
2. Bezsalyi, V. M., & Bannikov, D. O. (2019). Efficiency of thin-walled galvanized profiles for arch elements. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 16, 20-29.
DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189428> (in Ukrainian)
3. *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnnykh ob'ektiv. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. Zi zminamy № 1 ta № 2, 70 DBN V.1.2-2:2006.* (2007). (in Ukrainian)
4. *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnnykh ob'ektiv. Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud. Zi zminoiu № 1, 36 DBN V.1.2-14:2018.* (2018). (in Ukrainian)
5. *Stalevi konstruksii. Normy proektuvannia. Zi zminoiu № 1, 220 DBN V.2.6-198:2014.* (2014). (in Ukrainian)
6. *Kutyky stalevi hariachekatani rivnopolychni. Sortament, 10 DSTU 2251:2018.* (2018). (in Ukrainian)
7. *Shvelery stalevi hariachekatani. Sortament, 10 DSTU 3436-96.* (2004). (in Ukrainian)
8. *Prokat sortovij stalevij garjachekatannij shtabovij. Sortament, 14 DSTU 4747:2007 (EN 10058:2003, NEQ).* (2007). (in Ukrainian)
9. *Prokat lystovyi hariachekatanyi. Sortament, 11 DSTU 8540:2015.* (2016). (in Ukrainian)
10. *Kutyky stalevi hariachekatani nerivnopolychni. Sortament, 10 DSTU 8769:2018.* (2018). (in Ukrainian)
11. *Budivelni konstruksii. Profili stalevi hnuti zamknuti zvarni kvadratni i priamokutni dlia budivelnnykh konstruksii. Tekhnichni umovy, 16 DSTU B V.2.6-8-95.* (1996). (in Ukrainian)
12. Kret, I. Z., Petruska, T. O., & Tobkan, O. Ye. (2019). The technical and technological base and its renewal as a component of the economic development of the enterprise. *Business navigator*, 2(51), 75-79.
(in Ukrainian)
13. Ahmed, S., Abdelhamid, H., Ismail, B., & Ahmed, F. (2021). Differential Quadrature Finite Element and the Differential Quadrature Hierarchical Finite Element Methods for the Dynamics Analysis of on Board Shaft. *European Journal Of Computational Mechanics*, 29(4-6), 303-344.
DOI: <https://doi.org/10.13052/ejcm1779-7179.29461> (in English)
14. Bannikov, D., Radkevich, A., & Nikiforova, N. (2019). Features of the Design of Steel Frame Structures in India for Seismic Areas. *Materials Science Forum*, 968, 348-354. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.348> (in English)
15. Bofang, Z. (2018). *The finite element method: fundamentals and applications in civil, hydraulic, mechanical and aeronautical engineering.* Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.
DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119107323> (in English)
16. Chen, L. P., & Yang, Y. A. (2020). New Mixed Finite Element Method for Biot Consolidation Equations. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*, 6(12), 1520-1541. DOI: <https://doi.org/10.4208/aamm.OA-2019-0174> (in English)
17. Fialko, S., & Karpilovskyi, V. (2018). Time history analysis formulation in SCAD FEA software. *Journal of Measurements in Engineering*, 6(4), 173-180. DOI: <https://doi.org/10.21595/jme.2018.20408> (in English)
18. Kruhlikova, N. G., & Bannikov, D. O. (2019). Rational design of short-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Science and Transport Progress*, 2(80), 144-152.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853> (in English)
19. Kumar, A., Shitole, P., Ghosh, R., Kumar, R., & Gupta A. (2019). Experimental and numerical comparisons between finite element method, element-free Galerkin method, and extended finite element method predicted stress intensity factor and energy release rate of cortical bone considering anisotropic bone modelling. *Proceedings of the institution of mechanical engineers part h-journal of engineering in medicine*, 233(8), 823-838. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954411919853918> (in English)
20. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Fox D. D. (2014). *The finite element method for solid and structural mechanics.* Elsevier LTD. DOI: <https://doi.org/10.1016/c2009-0-26332-x> (in English)

Надійшла до редколегії: 08.02.2024

Прийнята до друку: 10.06.2024