

РУБАШКА В.П.**СТІЙКІСТЬ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ РАМИ ПАЛЕТНОГО СТЕЛАЗЖУ**

Розглянуто питання аналізу стійкості рам збірно-розбірних палетних стелажів. Палетні стелажі пристосовані до мінімально можливого розміру займаної ними корисної площі приміщення, а також забезпечення зручного доступу до вантажів, що зберігаються. Необхідність розміщення максимальної кількості вантажів на мінімальній складській території висуває високі вимоги до методів проектування та розрахунку як стелажних систем в цілому так і їх окремих складових елементів. Метою роботи є проведення досліджень стійкості рами, що є одним із основних конструктивних елементів металокаркасної всього палетного стелажу. Для цього розроблена комбінована розрахункова схема металокаркасної, що містить 3-мірні суцільні тіла, тонкостінні оболонкові конструкції та балкові структури. Схема враховує особливості конструкції стійок, розкосів рами, під'ятників, а також основні конструктивні особливості болтових з'єднань, що зв'язують ці елементи. Як метод дослідження пропонується кінцево-елементний підхід, що дозволяє повною мірою врахувати всі конструктивні особливості складових елементів та характер їх з'єднання у збірно-розбірній конструкції. Було проведено дослідження впливу болтових з'єднань розкосів зі стійками на стійкість як окремої стійки, так і всієї рами. Проведено аналіз різних типів розкосів систем на сталість металокаркасної рами. В результаті проведених досліджень оцінювалися шляхи підвищення стійкості стелажних систем при використанні можливості їх конструктивної перебудови за рахунок властивостей збірно-розбірних вузлів. З'ясовано, що наявність болтових з'єднань якісно змінює поведінку стійок відкритого поперечного перерізу при втраті стійкості.

Ключові слова: палетний стелаж, розрахункова схема, стійкість, коефіцієнт стійкості, метод кінцевих елементів, стійка стелажу, відкритий поперечний переріз, розкос, під'ятник, болтове з'єднання.

RUBASHKA V.**STABILITY OF METAL STRUCTURE OF PALLET RACKING FRAME**

The issues of analyzing the stability of frames of prefabricated pallet racks are considered. Pallet racks are adapted to the minimum possible size of the usable space they occupy, as well as to provide convenient access to stored goods. The need to place the maximum number of cargoes in a minimum warehouse area places high demands on the design and calculation methods of both racking systems as a whole and their individual constituent elements. The purpose of the work is to conduct research on the stability of the frame, which is one of the main structural elements of the metal structure of the entire pallet rack. For this purpose, a combined design scheme for metal structures has been developed, containing 3-dimensional solid bodies, thin-walled shell structures and beam structures. The diagram takes into account the design features of the racks, frame braces, thrust bearings, as well as the main design features of the bolted connections connecting these elements. A finite element approach is proposed as a research method, allowing to fully take into account all the design features of the constituent elements and the nature of their connection in a prefabricated structure. Studies have been conducted of the effect of bolted connections of braces with racks on the stability of both an individual rack and the entire frame. An analysis of various types of bracing systems for the stability of the metal frame structure was carried out. As a result of the research, ways to increase the stability of racking systems using the possibility of their structural restructuring due to the properties of prefabricated units were assessed. It was found that the presence of bolted connections qualitatively changes the behavior of racks of open cross-section during loss of stability.

Key words: pallet rack, design diagram, stability, stability coefficient, finite element method, rack stand, open cross-section, brace, thrust bearing, bolted connection.

Вступ. Найбільш популярним і поширеним видом обладнання, яке використовується на великих складах для організації системи зберігання різних товарів, є палетні (фронтальні) стелажі. Ці металеві конструкції, що отримали другу назву фронтальні через спосіб завантаження та розвантаження, призначені для розміщення на них вантажу, покладеного на палети. Окрім великих складів дистриб'юторських компаній, вони сьогодні знаходять широке застосування для оснащення великих за площею залів гіпермаркетів та торгових центрів.



Рисунок 1 - Палетні стелажі

© В.П Рубашка 2024

Конструкція стелажів дозволяє встановлювати одинарні та здвоєні ряди, довжина яких обмежується зручністю обслуговування вантажною технікою. Донедавна використовувалися цільнозварні стелажі або стелажі зі звареними рамами та складанням на болтах, а їх елементами служив звичайний будівельний сортамент

металопрокату. Фактично, такі стелажі слід збирати раз і назавжди, але подібне обладнання не відповідає сучасним вимогам споживача.

Сучасні стелажі повинні бути швидкорозбірними, складатися зі збірних рам і легкого прокату спеціального вигляду. Для їхнього виробництва зазвичай використовують спеціальне прокатне обладнання.

Збірно-розбірний стелаж складається з декількох рам кожна з яких має дві вертикальні стійки спеціального профілю з перфорацією (1), з'єднаних між собою розкосами (3,4), що підвищують жорсткість конструкції і спираються на розташовані внизу під'ятники (6). Рами, у свою чергу, пов'язані горизонтальними вантажними балками (2) з елементами кріплення до вертикальних рам, які виконані у вигляді кронштейнів із зачепами, привареними до кінців балок (рис.2).

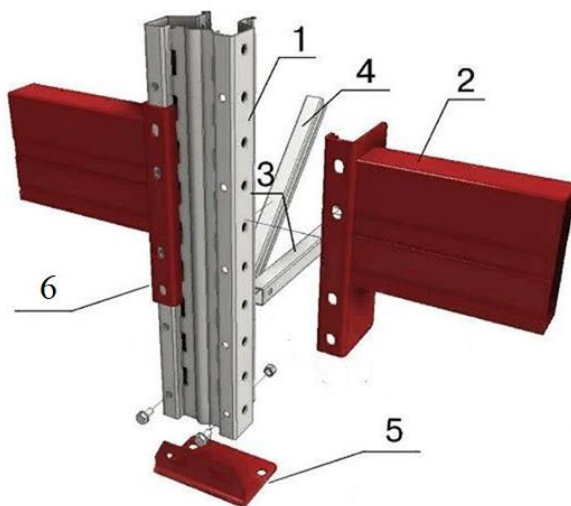


Рисунок 2 – Основні елементи металоконструкції збірно-розбірного палетного стелажу

Профіль стійки має складну конфігурацію, що має у своєму перерізі різноманітні ребра жорсткості. Приклади фрагментів стійок різних видів поперечних перерізів показано на рис. 3

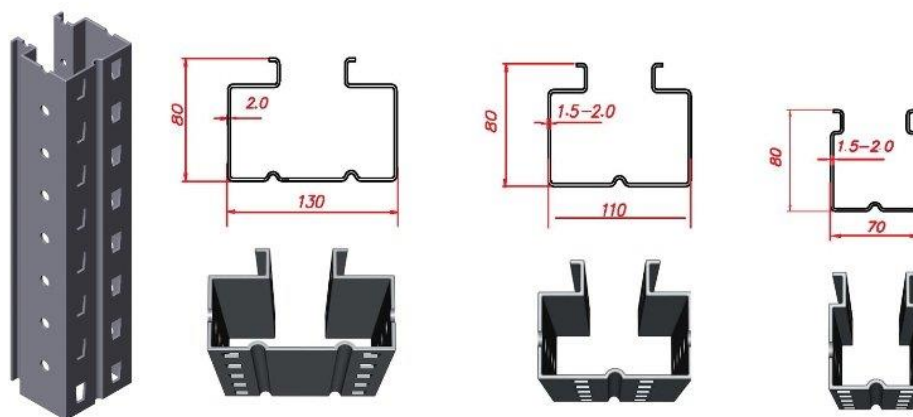


Рисунок 3 - Сійки палетного стелажу

У конструкції стійки передбачений спеціальний отвір, в який вставляються розкоси. Розкоси фіксується болтовим з'єднанням, як показано на рис. 4. За допомогою таких розкосів дві стійки поєднуються в єдину раму. Така конструкція обумовлює той факт, що болтові з'єднання жорстко пов'язують дві протилежні грані отвору стійки в місцях розташування розкосів. Таким чином болтові з'єднання розбивають стійку на ділянки з розмірними поперечними перерізами та ділянки із замкнутим поперечним перерізом, що суттєво ускладнює аналіз стійкості таких пружних систем [1,2].

Як видно з наведеного опису, рами сучасних стелажів палетних є складними просторовими металевими конструкціями, що складаються з різноманітних пружних елементів, що мають ділянки як відкритого, так і закритого поперечного перерізу, що знаходяться під впливом просторової системи сил. Оскільки стелажі схильні до значних вертикальних навантажень, особливої актуальності набувають питання дослідження стійкості як самих стійок, так і всієї металевої конструкції рами в цілому

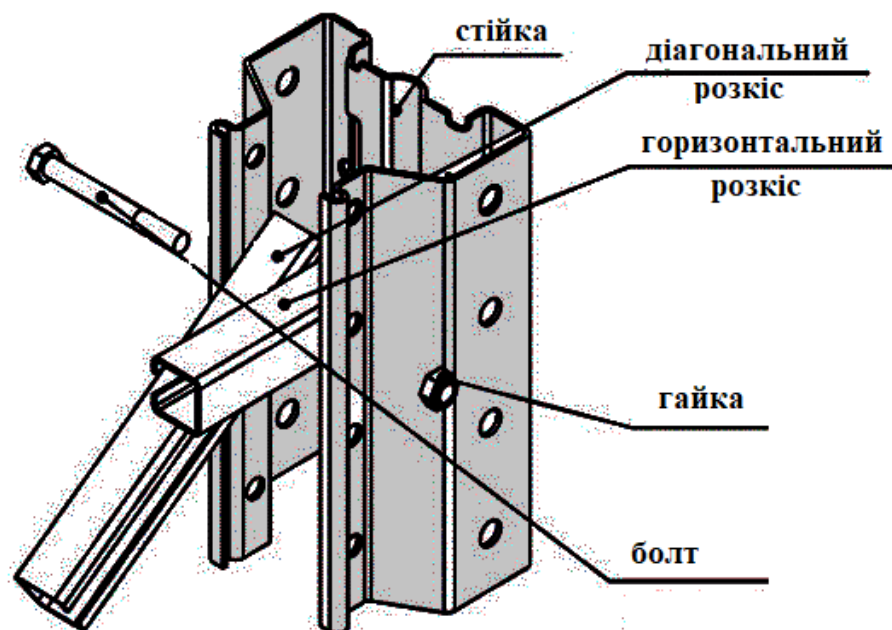


Рисунок 4. Кріплення розкосів до стійки стелажу

Мета дослідження. Аналіз впливу болтових з'єднань на стійкість рам палетних стелажів

Аналіз основних досягнень та літератури. Основи проектування та експлуатації палетних стелажів викладено у нормативній документації [3,4,5,6]. Однак ця документація не дає відповідей на найважливіші питання, пов'язані з удосконаленням конструкцій, вивчення взаємовпливу окремих конструктивних рішень на стан стелажної системи. Тому нині розвиваються науково-дослідні роботи, дозволяють вивчити ті чи інші аспекти поведінки таких систем.

Один із напрямів досліджень складає аналіз окремих елементів та вузлів стелажного комплексу. Наприклад, у роботах [7,8] авторами провели детальний аналіз стійкості стелажних стійок з холодногнутою сталі за складних режимах навантаження. Порівняння експериментальних досліджень із чисельним моделюванням на основі кінцево-елементних моделей показали суттєву залежність стійкості стояків від наявності перфораційних отворів.

У роботах [9,10,11] обґрунтовується необхідність детального моделювання з'єднання розкосу зі стійкою в палетних стелажі. Зазначається, що представлення таких сполук у вигляді жорстких зв'язків багаторазово збільшує жорсткість системи, що моделюється. У роботах [12,13] обґрунтовується застосування болтових з'єднань розкосу стелажу зі стійкою.

Інший напрямок досліджень пов'язаний з аналізом стійкості всієї стелажної конструкції. У роботах [14,15,16,17] автори аналізують вплив зв'язків балок стелажу зі стійками. Зазначається, що характер цих зв'язків істотно впливає на поведінку стелажної системи.

Майже всі автори відзначають складність дослідження таких конструкцій. Тому, крім експериментальних методів дослідження, найбільш поширеним є підхід на основі побудови 3-д моделей з подальшим розрахунком на основі методу кінцевих елементів. Технологію застосування кінцево-елементних моделей для аналізу стелажних тонкостінних конструкцій розглянуто в роботах [17,18,20,21]. У роботах показано ефективність використання таких моделей для визначення загальної та локальної форм стійкості систем, що вивчаються за наявності безперервних перфораційних отворів опорних стійок.

З проведеного аналізу сучасних робіт випливає, що в дослідженнях недостатньо відображені питання визначення напрямів підвищення стійкості як окремих складових елементів так і всієї системи палету за рахунок можливості її внутрішньої перебудови.

Стійкість пружної системи багато в чому визначається її жорсткими властивостями. Наявність роз'ємних з'єднань типу «зачіп» та болтових з'єднань відкриває можливість керувати жорсткістю металоконструкції за рахунок її внутрішньої перебудови. Наприклад, можна змінювати кількість і становище розкосів у рамі і цим впливати на жорсткість а, отже, і стійкість як окремих стійок і всієї рами загалом. Все це дозволяє при монтажі та експлуатації стелажу без особливих зусиль перебудувати його конструкцію, що, у свою чергу, впливає на жорсткі характеристики металоконструкції та характеристики стійкості всієї пружної системи.

Матеріали дослідження.

Стійки відкритого поперечного перерізу при позакентровому навантаженні вертикальними силами зазнають згинально-крутильних форм втрати стійкості. Аналіз таких форм втрати стійкості представляє найбільший практичний інтерес у порівнянні з класичними згинальними формами, оскільки вони виникають при значно менших значеннях критичних сил.[2].

У стелажних комплексах дві стійки пов'язані між собою системою розкосів. Для з'єднання розкосів та стійок використовуються болтові з'єднання, як показано на рис. 2. Такі з'єднання виступають як внутрішні зв'язки, які з певним кроком розташування розкосів по висоті стійки замикають її відкритий поперечний переріз. Таким чином, не можна вважати стійку стелажу пружним елементом із повністю відкритим перетином. У місцях розташування болтових з'єднань перетин стійки замкнутий, на вільних ділянках маємо відкритий переріз.

Для аналізу впливу таких зв'язків на загальну стійкість стійки було побудовано 3D модель перфорованої стійки стелажу, представлену на рис. 5.

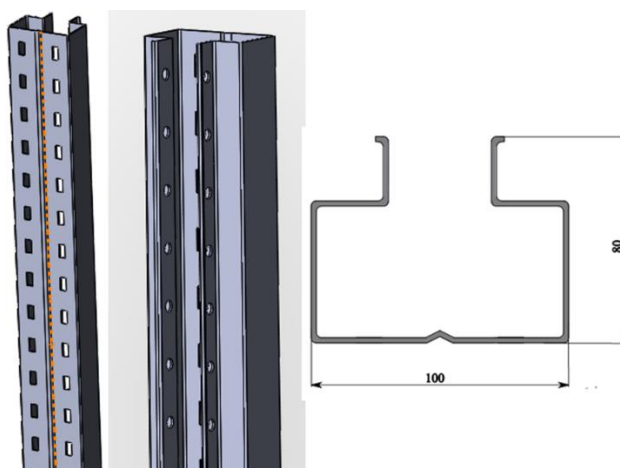


Рисунок 5 – Модель стійки палетного стелажу

На рис. 6 а) представлена 3D модель болтового з'єднання (виділена червоним кольором). При побудові розрахункової схеми приймалося, що з'єднання болтів абсолютно жорстко пов'язує протилежні грані стійки. Схема навантаження представлена на рис. 6 б). Зовнішніми впливами є сили ваги вантажів, розташованих у осередках стелажу. Це вагове навантаження передається через вантажні балки на кронштейни. Зачепи кронштейнів впливають на нижні межі прямокутних перфораційних отворів у місцях контакту зачепу кронштейна зі стійкою

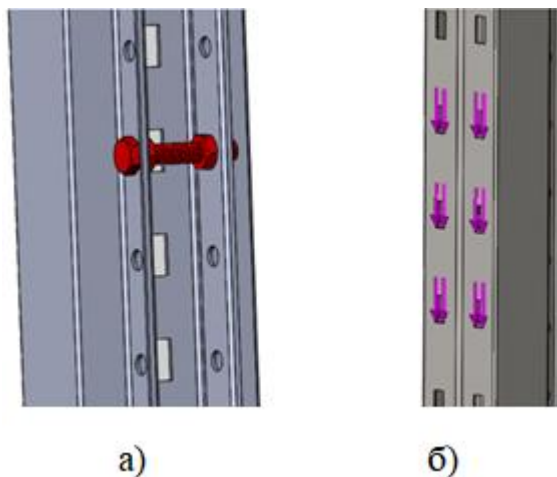


Рисунок 6 - 3D модель стійки рами стелажу:
а) – модель із болтовими зв'язками; б) – навантаження зусиллями від ваги вантажів

Розрахунки проводилися до різних схем розташування болтових зв'язків. Результати розрахунків першої форми втрати стійкості стійки представлені таблиці 1. У цій же таблиці дається короткий опис розташування болтових зв'язків кожної схеми.

Аналіз результатів розрахунків показує:

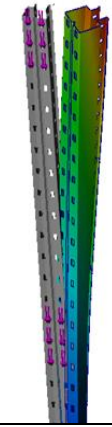
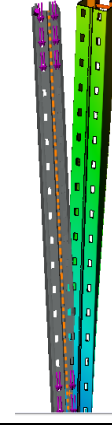
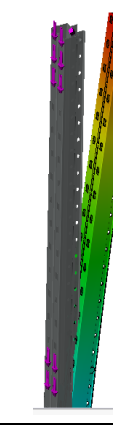


1) стійка стелажу без внутрішніх болтових зв'язків (схема №1) має згинально-крутильну форму втрати стійкості, яка проявляється в елементах відкритого поперечного перерізу.

2) введення в конструкцію стійки навіть одного болтового з'єднання (схема №2) різко підвищує стійкість стійки, хоча форма втрати стійкості залишається, як і раніше, згинально-крутильна.

3) Введення в конструкцію нових болтових з'єднань, з одного боку, підвищує стійкість, а з іншого боку переводить форму втрати стійкості з згинально-крутильної у звичайну згинальну форму, яка характерна для елементів із замкнутим поперечним перерізом.

4) Збільшення числа болтових з'єднань не призводить до суттєвого підвищення стійкості конструкції та зміни згинальної форми.

Таблиця 1 – Форми втрати стійкості стійки рами стелажу

	Схеми розташування внутрішніх зв'язків (болтових з'єднань)				
	1	2	3	4	5
Кількість внутрішніх зв'язків (Розташування)	Без зв'язків	1 зв'язок (верхній переріз)	2 зв'язки (верхній перетин, середина стійки)	3 зв'язки (верхній, нижній переріз, середина стійки)	4 зв'язки (рівномірно по висоті стійки)
Коефіцієнт стійкості	1,68	2,38	2,84	2,84	2,85
Форма пружної деформації					
Перша форма втрати стійкості	згинально-крутильна	згинально-крутильна	згинальна	згинальна	згинальна

З проведених розрахунків можна дійти невтішного висновку у тому, що стійка, завдяки наявності внутрішніх болтових зв'язків має лише згинальну форму втрати стійкості і поводить себе як елемент замкнутого поперечного перерізу. Отже, аналіз стійкості стійки палетного збірно-розбірною стелажу немає сенсу без урахування її взаємозв'язків з іншими елементами конструкції.

На другому етапі досліджень аналізували вплив болтових зв'язків на стійкість рами стелажу. Кількість болтових з'єднань у рамі визначається типом розкритої системи та кількістю розкосів. Державним стандартом України [3]. передбачені наступні типи рам (рис.6)

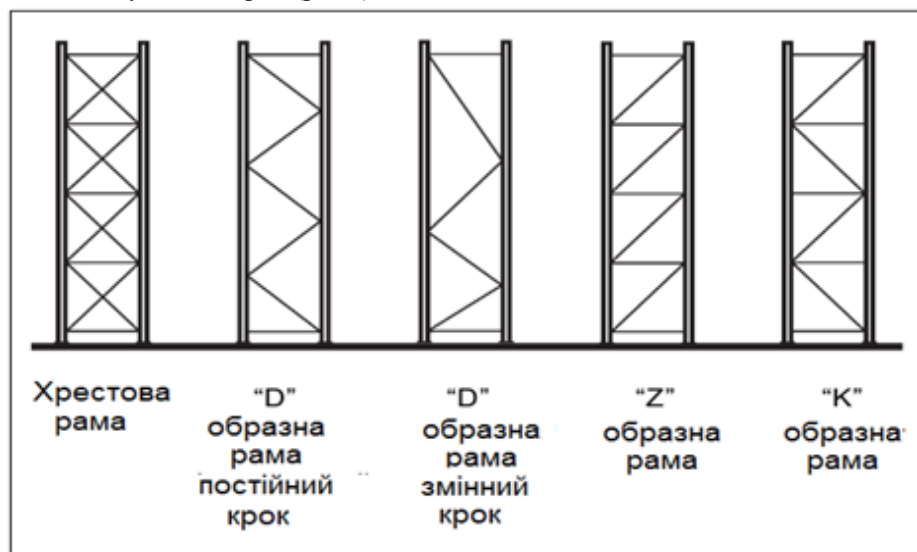


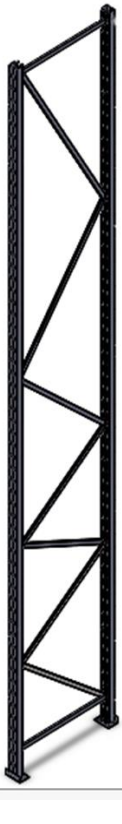


Рисунок 7 - Типові форми рам стелажів згідно ДСТУ EN 15512

Були розроблені 3D моделі найпоширеніших типів рам – «D»-образна рама з постійним кроком, «D»-образна рама зі змінним кроком та «Z»-образна рама. Моделі цих рам представлені в таблиці 2. При побудові моделей рам враховувалися всі конструктивні особливості стійок, болтові з'єднання розкосів зі стійками, болтові з'єднання під'ятників зі стійками (рис. 8).

Таблиця 2 – 3D моделі рам палетного стелажу

Моделі рам палетного стелажу		
«Z»-образна рама	«D»-образна рама з постійним кроком	«D»-образна рами зі змінним кроком
		

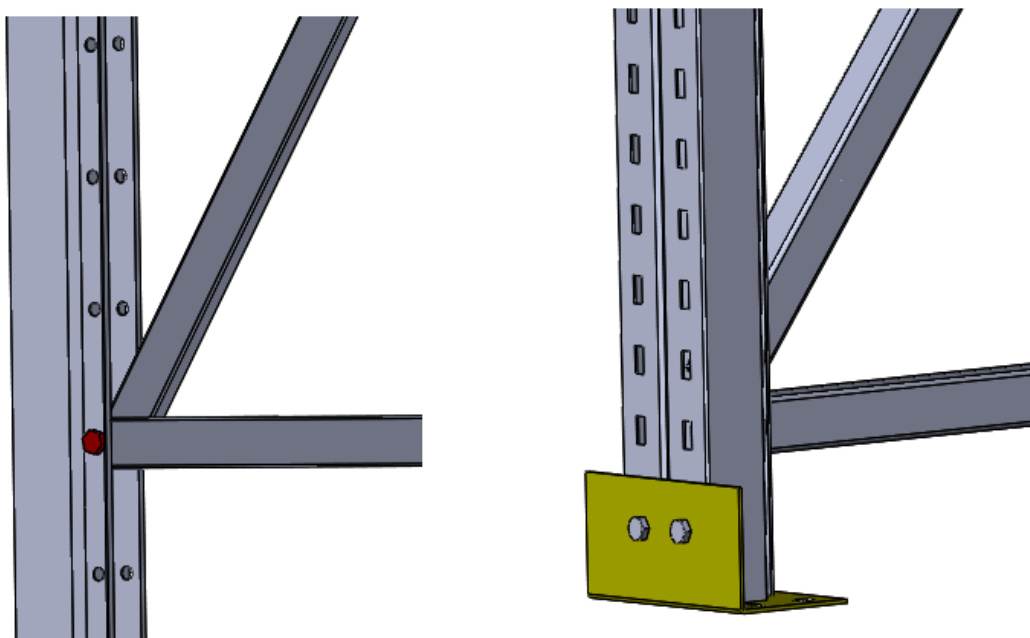
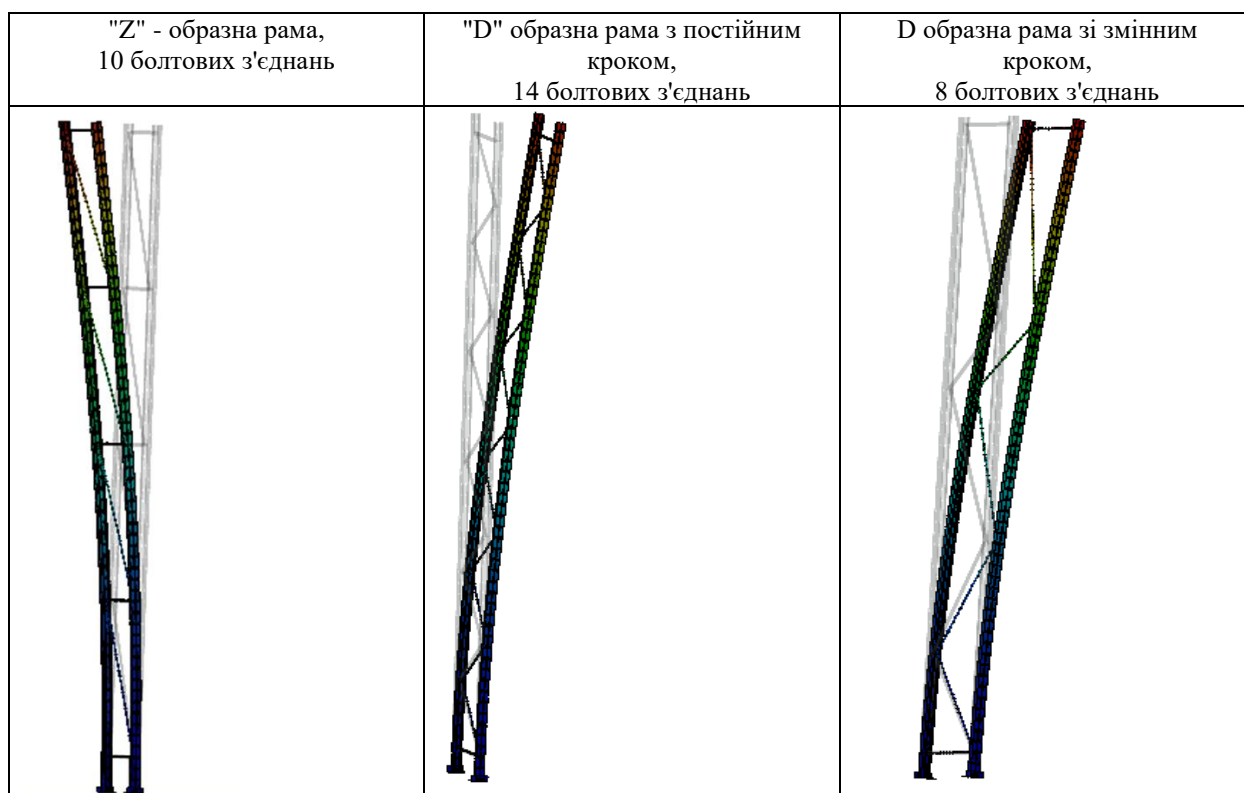


Рисунок 8 – Моделі болтових з'єднань у рамі стелажу

Зовнішнє навантаження від вантажів у осередках стелажу моделювалося аналогічно тому, як показано на рис.4 б).

Розрахунки проводилися кожному за типу рами при різному числі розкосів, отже, і кількості болтових з'єднань. Аналізувався коефіцієнт стійкості та перша форма втрати стійкості. Деякі результати розрахунків першої форми втрати стійкості для трьох типів рам з різним числом з'єднань болтових представлено в табл. 3.

Таблиця 3 – Форми втрати стійкості рами палетного стелажу



На рис. 9 представлений графік зміни коефіцієнта стійкості для трьох типів рам в залежності від числа болтових зв'язків в розкисній системі. При розрахунках кожного типу приймалося 8, 10, 12, 14 болтових з'єднань.

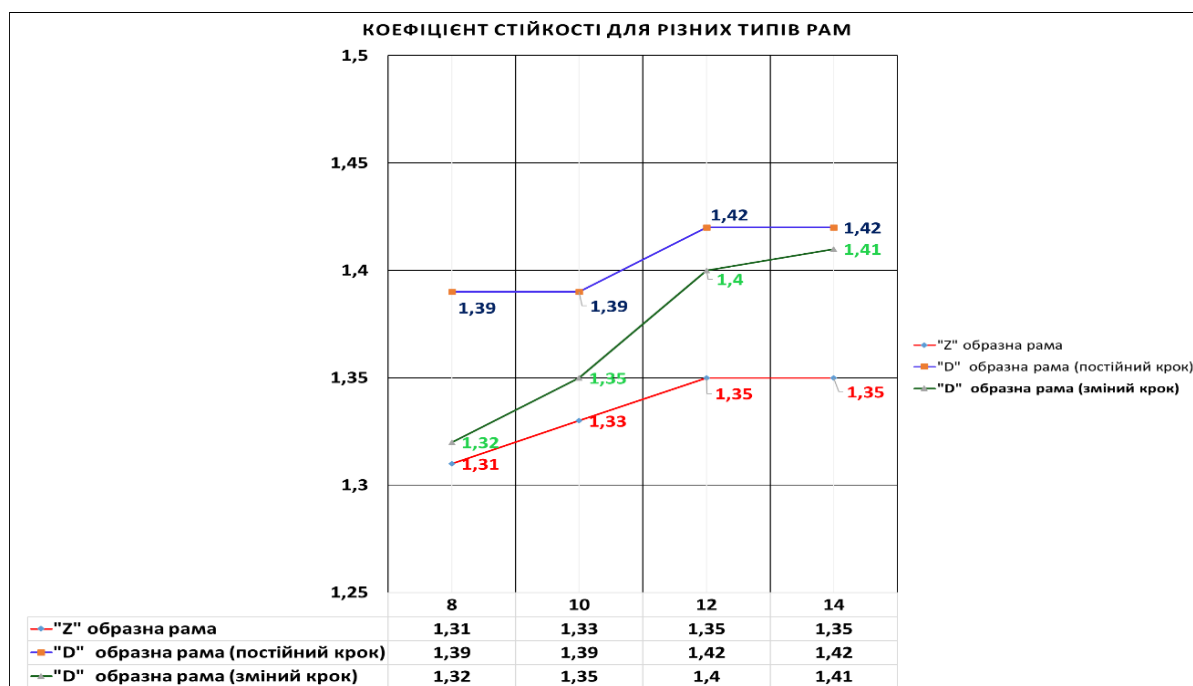


Рисунок 9 - Залежність коефіцієнта стійкості від типу рами та кількості болтових з'єднань

Як видно з наведених розрахунків, рама при втраті стійкості має згинальну форму втрати стійкості. Вплив відкритого перерізу основних елементів рами – стійок не позначається на характері першої форми. З графіків на рис. 9 слід, що величини коефіцієнтів стійкості істотно залежить від кількості болтових зв'язків у розкисній системі рами. Це повністю узгоджується з висновками для однієї окремої стійки. Проте тип рами впливає динаміку зміни коефіцієнта стійкості. Найбільше ця залежність проявляється для «D»-образних рам зі змінним

кроком. Тут збільшення коефіцієнта стійкості становить близько 7%. Крім цього з розрахунків слід, що стійкість трохі вища для стелажів з «D»- образною рамою з постійним кроком.

Висновки. На основі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

- незважаючи на те, що конструкція стійки передбачає відкритий поперечний переріз, при втраті стійкості вона зазнає лише згинальної форми втрати стійкості;
- наявність болтових з'єднань у місцях кріплення розкосів значно підвищує стійкість стійки. Хоча подальше збільшення числа таких зв'язків не призводить до подальшого зростання коефіцієнта стійкості;
- стійкість рами стелажу не суттєво залежить від числа болтових зв'язків у розкідній системі та типу рами. Проте виявлено, що стійкість «D»- образних рам з постійним кроком дещо вища ніж стійкість інших типів рам.

Таким чином, при аналізі стійкості стелажних систем немає сенсу розглядати окремо стійку без урахування характеру її взаємозв'язків з іншими елементами пружної системи, оскільки наявність таких з'єднань якісно змінює її поведінку при втраті стійкості.

Список літератури:

1. Лук'янченко О. О Комп'ютерне моделювання в задачах стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю з недосконалістю форми/ О. О. Лук'янченко, І. О. Охтеня // Управління розвитком складних систем. - Київ, 2021. - № 47. - С. 95 – 101.
2. Юрченко В. В. Несуча здатність стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів / В. В. Юрченко, А. В. Перельмутер. – К.: Каравела, 2020. - 310 с.
3. DSTU EN 15512:2015. Системи складські стаціонарні сталеві. Збірно-розбірні палетні стелажні системи. Принципи проектування конструкцій.
4. DSTU EN 15620:2015. Системи складські стаціонарні сталеві. Збірно-розбірні палетні стелажні системи. Допуски, деформації та зазори.
5. DSTU EN 15629:2015. Системи складські стаціонарні сталеві. Технічні умови на складське устаткування.
6. DSTU EN 15635:2015. Системи складські стаціонарні сталеві. Експлуатування та технічне обслуговування складського устаткування.
7. Talebian, N.; Gilbert, B.P.; Miller, D.; Karampour, H. Biaxial bending design of solid steel storage rack uprights in global buckling. *J. Constr. Steel Res.* 2022, 196, 107395.
8. Ren, C.; Wang, B.; Zhao, X. Numerical predictions of distortional-global buckling interaction of perforated rack uprights in compression. *Thin Walled Struct.* 2019, 136, 292–301.
9. Talebian, N.; Gusella, F., Orlando, M., Peterman K.. Stiffness and resistance of brace-to-upright joints with lipped channel braces assembled flange-to-flange. *J. Constr. Steel Res.* 2022, 193, 107258.
10. Escanio, L.A.; Elias, G.C.; de Almeida Neiva, L.H.; Alves, V.N.; Sarmanho, A.M.C. Analysis of beam-to-upright end connections steel storage systems. *Adv. Steel Constr.* 2020, 16, 279–286.
11. Zhao, X.; Dai, L.; Rasmussen, K.J.R. Hysteretic behaviour of steel storage rack beam-to-upright boltless connections. *J. Constr. Steel Res.* 2018, 144, 81–105.
12. Yin, L.; Tang, G.; Li, Z.; Zhang, M.; Feng, B. Responses of cold-formed steel storage racks with spine bracings using speed-lock connections with bolts I: Static elastic-plastic pushover analysis. *Thin Walled Struct.* 2018, 125, 51–62.
13. Dai, L.; Zhao, X.; Rasmussen, K.J.R. Flexural behaviour of steel storage rack beam-to-upright bolted connections. *Thin Walled Struct.* 2018, 124, 202–217
14. Gusella F, Arwade SR, Orlando M, Peterman KD. Influence of mechanical and geometric uncertainty on rack connection structural response. *J Constr Steel Res* 2019;153:343–55. doi:10.1016/j.jcsr.2018.10.021.
15. Bernuzzi C., Pellegrino C., Simoncelli M. Characterization of Existing Steel Racks via Dynamic Identification. *Buildings* 2021, 11(12), 603;
16. Kovalenko, V., Rubashka, V., Aliksieiev, V., Heiden, B. (2023). Stability Analysis of Dismountable Pallet Racks. In: Ciobotă, D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2023. ICoRSE 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 762. Springer, Cham.
17. Коваленко В. О., Рубашка В. П. Дослідження стійкості багатосекційних стелажів // Modern problems of science, education and society. Proceedings of the 5th International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua". Kyiv, Ukraine. 2023. Pp. 167-170.
18. Si-Wei Liu, Teoman Pekoz, Wen-Long Gao, Ronald D. Ziemian, James Crews. Frame analysis and design of industrial rack structures with perforated cold-formed steel columns. *Thin-Walled Structures*. Volume 163, June 2021, 107755
19. Neiva, L., Elias, G., Braz Starlino, J. A. ., Cunha Sarmanho, A. M. ., & Nicchio Alves, V. . (2022). Industrial storage system continuous perforated uprights: a combined design proposal. *Revista De La Construcción. Journal of Construction*, 21(2), 204–214.
20. Резніченко О. І., Рубашка В.П. Побудова розрахункової схеми аналізу стійкості розбірних палетних стелажів. *Машинобудування*, вип. 30 (Квітень), 2023. С. 29-42
21. Reznichenko O.I., Rubashka V.P. Calculation scheme for research of stability of collapsible racks. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2022, 17-20 травня 2023 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ». – с. 199.

Bibliography (transliterated):

1. Luk'ianchenko O. O Komp'iuterne modelivannia v zadachakh stiikosti tonkostinnykh sterzhniv vidkrytoho profiliiu z nedoskonaliostiamy formy/ O. O. Luk'ianchenko, I. O. Okhten // Upravlinnia rozvytkom skladnykh system. - Kyiv, 2021. - № 47. - S. 95 – 101.
2. Yurchenko V. V. Nesucha zdatnist sterzhnevyykh elementiv konstrukttsii iz kholodnohnutykh profiliv / V. V. Yurchenko, A. V. Perelmutter. – K.: Karavela, 2020. - 310 s.
3. DSTU EN 15512:2015. Systemy skladski statsionarni stalevi. Zbirno-rozbirni paletni stelazhni systemy. Pryntsypy proektuvannia konstrukttsii.
4. DSTU EN 15620:2015. Systemy skladski statsionarni stalevi. Zbirno-rozbirni paletni stelazhni systemy. Dopusky, deformatsii ta zazory.
5. DSTU EN 15629:2015. Systemy skladski statsionarni stalevi. Tekhnichni umovy na skladske ustatkuvannia.
6. DSTU EN 15635:2015. Systemy skladski statsionarni stalevi. Ekspluatuvannia ta tekhnichne obsluhovuvannia skladskohu ustatkuvannia.
7. Talebian, N.; Gilbert, B.P.; Miller, D.; Karampour, H. Biaxial bending design of solid steel storage rack uprights in global buckling. *J. Constr. Steel Res.* 2022, 196, 107395.
8. Ren, C.; Wang, B.; Zhao, X. Numerical predictions of distortional-global buckling interaction of perforated rack uprights in compression. *Thin Walled Struct.* 2019, 136, 292–301.
9. Talebian, N.; Gusella, F., Orlando, M., Peterman K.. Stiffness and resistance of brace-to-upright joints with lipped channel braces assembled flange-to-flange. *J. Constr. Steel Res.* 2022, 193, 107258.

10. Escanio, L.A.; Elias, G.C.; de Almeida Neiva, L.H.; Alves, V.N.; Sarmanho, A.M.C. Analysis of beam-to-upright end connections steel storage systems. *Adv. Steel Constr.* 2020, 16, 279–286.
11. Zhao, X.; Dai, L.; Rasmussen, K.J.R. Hysteretic behaviour of steel storage rack beam-to-upright boltless connections. *J. Constr. Steel Res.* 2018, 144, 81–105.
12. Yin, L.; Tang, G.; Li, Z.; Zhang, M.; Feng, B. Responses of cold-formed steel storage racks with spine bracings using speed-lock connections with bolts I: Static elastic-plastic pushover analysis. *Thin Walled Struct.* 2018, 125, 51–62.
13. Dai, L.; Zhao, X.; Rasmussen, K.J.R. Flexural behaviour of steel storage rack beam-to-upright bolted connections. *Thin Walled Struct.* 2018, 124, 202–217.
14. Gusella F, Arwade SR, Orlando M, Peterman KD. Influence of mechanical and geometric uncertainty on rack connection structural response. *J Constr Steel Res* 2019;153:343–55. doi:10.1016/j.jcsr.2018.10.021.
15. Bernuzzi C., Pellegrino C., Simoncelli M. Characterization of Existing Steel Racks via Dynamic Identification. *Buildings* 2021, 11(12), 603;
16. Kovalenko, V., Rubashka, V., Aliksieiev, V., Heiden, B. (2023). Stability Analysis of Dismountable Pallet Racks. In: Cioboată, D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2023. ICoRSE 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 762. Springer, Cham.
17. Kovalenko V. O., Rubashka V. P. Doslidzhennia stiikosti bahatosektsiinykh stelazhiv // Modern problems of science, education and society. Proceedings of the 5th International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua". Kyiv, Ukraine. 2023. Pp. 167-170.
18. Si-Wei Liu, Teoman Pekoz, Wen-Long Gao, Ronald D. Ziemian, James Crews. Frame analysis and design of industrial rack structures with perforated cold-formed steel columns. *Thin-Walled Structures*. Volume 163, June 2021, 107755
19. Neiva, L., Elias, G., Braz Starlino, J. A. ., Cunha Sarmanho, A. M. ., & Nicchio Alves, V. . (2022). Industrial storage system continuous perforated uprights: a combined design proposal. *Revista De La Construcción. Journal of Construction*, 21(2), 204–214.
20. Reznichenko O, I., Rubashka V.P. Pobudova rozrakhunkovoi skhemy analizu stiikosti rozbirnykh paletnykh stelazhiv. *Mashynobuduvannia, vyp. 30 (Kviten)*, 2023. S. 29-42
21. Reznichenko O.I., Rubashka V.P. Calculation scheme for research of stability of collapsible racks. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2022, 17-20 травня 2023 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХП»». – с. 199.

Поступила (received) 16.09.2024

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Рубашка Володимир Петрович (Rubashka Volodymyr) кандидат технічних наук, доцент кафедри "Підйомно-транспортні машини і обладнання" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (095) 603729; e-mail: uipakriv@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9856-3850