

О.С. ЗАБАРА, М.С. ЛЮБИМОВ, С.Є. БАЗІКАЛО, А.Ю. ЛИСАЧЕНКО, С.О. МАЗУРЕЦЬ

ДО ПИТАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВУЗЛОВИХ З'ЄДНАНЬ МІЖ СТІЙКАМИ ТА БАЛКАМИ ЯК ЕЛЕМЕНТІВ СКЛАДСЬКИХ СТЕЛАЖНИХ СИСТЕМ

Для складських стелажних систем основними елементами конструкцій є вертикальні рами, що складаються з тонкостінних стійок та горизонтальних балок. Описувані конструкції є самонесучими, вони розраховані на великі навантаження вертикального напрямку. Найбільш значущою проблемою під час проєктування та розрахунку таких конструкцій є правильне моделювання вузлових з'єднань, а саме їх поведінки під навантаженням. Оскільки вузлове з'єднання стійки та балки дуже сильно впливає на локальну поведінку вузла і глобальну поведінку конструкції, залежно від жорсткості цього з'єднання поведінка вузла може бути більш схожа на поведінку чистого шарніру з нульовою жорсткістю або жорсткого з'єднання з «нескінченною» жорсткістю. Відповідно, це впливає на жорсткість та поведінку не тільки окремих вузлів але й всієї системи, впливає на розподіл та значення переміщень та напружень в елементах стелажних систем, стійкість розробленої конструкції, тощо. Метод скінченних елементів та сучасні програми, що базуються на ньому, дозволяють промоделювати поведінку як окремих вузлів, так і конструкцій в цілому не тільки в лінійно-пружній постановці, але і з урахуванням нелінійних ефектів (контакти, пластична поведінка матеріалів, геометрична нелінійність), що дає змогу відтворити процес із більшою точністю. Втім, з урахуванням кількості нелінійних ефектів та можливого ступеня їх взаємного впливу, визначення жорсткості вузлів виключно розрахунковими методами є проблемним та неточним процесом, якщо не виконується верифікація за допомогою натурних експериментів. Щоб підвищити точність та достовірність результатів дослідження жорсткості вузлових з'єднань стійка-балка, було виконано розробку моделі й експериментального обладнання. Надалі цю інформацію планується використовувати для створення максимально адекватних розрахункових моделей, які б описували поведінку відповідного вузла. Також вона може бути задіяна для спроб моделювання поведінки стелажних систем описаного типу в цілому. Публікація є описом роботи, виконаної для створення обладнання та моделі, а також містить експериментальні дані для з'єднань.

Ключові слова: стелажні системи, експериментальні дослідження, визначення жорсткості

O. ZABARA, M. LYUBIMOV, S. BAZIKALO, D. BURDOV, A. LYSACHENKO, S. MAZURETS

ON THE ISSUE OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF NODAL CONNECTIONS BETWEEN RACKS AND BEAMS AS ELEMENTS OF WAREHOUSE RACK SYSTEMS

The main elements of the warehouse racking systems structure are vertical frames made of thin-walled racks and horizontal beams. Such structures are designed for large vertical loads and are self-supporting. At the same time, one of the central problems in the design of such structures is the correct modeling of joint behavior, specifically under load. The joint connection between the beam and the rack influences not only the local behavior of the joint itself, but also the global behavior of the whole structure. Depending on the construction of the joint connection, its behavior may be more similar to that of a pure hinge with zero stiffness or a rigid connection with "infinite" stiffness. This, in turn, affects the stiffness and behavior not only of individual joints but also of the entire system, influencing the distribution and magnitude of displacements and stresses in the elements of racking systems, the stability (buckling) of the structure under design loads. The current publication describes the work performed to create the experimental equipment and model. The Finite Element Method (FEM) and modern software based on FEM allow us to simulate the behavior of individual components and structures as a whole. It can be done not only in a linear-elastic formulation but also by accounting for nonlinear effects (contacts, material plasticity, geometric nonlinearity). That give possibility to reproduce the process with greater accuracy. However, the given number of nonlinear effects and their possible mutual influences make joint stiffness determination problematic and imprecise if it's performed exclusively by computational methods without verification through physical experiments. To improve the accuracy and reliability of the column-beam joint connections stiffness study, a model and experimental equipment were developed. The experiment results are planned to be used to create the computational models that would perform the accurate joint behavior. Later, it can also be used to attempt the whole rack systems behavior modeling. It also contains an experiment description and the data obtained for the joints during experiments.

Keywords: racking systems, experimental studies, determination of stiffness

Вступ. Зростання виробництва складських систем стелажного типу останнім часом відмічено по всьому світу, зокрема в Україні. Системи використовують не виключно для складів, але також для зберігання різноманітних (як за розмірами, так і за вагою) об'єктів на виробництві, в супермаркетах і таке інше. Здебільшого конструкції цього типу є самонесучими, їх проєктують з розрахунком на великі вертикальні навантаження. Складаються такі конструкції з тонкостінних стійок, що кріпляться до бетонного підґрунтя та горизонтальних балок. Кріплення стійок виконується за допомогою болтових з'єднань, кріплення балок до стійок – шляхом використання зачепів із зубцями та систем перфорованих отворів. Слід брати до уваги, що геометрія стійок та балок впливає на базові показники міцності, жорсткості, стійкості, несучої здатності відносно прогнозовано, на відміну від конструкції вузлів кріплення та з'єднання. Найкраще ці питання було висвітлено в публікаціях [1–7].

У джерелах, що перелічені, визначено залежність поведінки вузла від жорсткості вузлового з'єднання. Ця поведінка може наближатися до поведінки чистого шарніра або жорсткого з'єднання. Якщо ж моделювати стелажні конструкції спрощено (через подання вузлів як ідеального шарніру чи абсолютно жорсткого з'єднання), це призводить до кількісної та якісної похибки. Як результат, такі дані не можуть бути використані для консервативних чи наближених методів оцінки. Для класифікації з'єднання за ступенем жорсткості призначено стандарт EN 1993-1-3 [8].

Відповідно, є питання визначення конкретної жорсткості вузлів, що з'єднують стійки та балки, а також кріплять стійки до бетонного підґрунтя. Правильне визначення ступеня жорсткості дозволяє покращити адекватність моделювання поведін-

© О.С. Забара, М.С. Любимов, С.Є. Базікало,
А.Ю. Лисаченко, С.О. Мазурець, 2026

нки стелажних конструкцій як таких. Зазначимо, що виключно розрахунково визначити жорсткість неможливо, бо в них одночасно відбуваються багато складних фізичних процесів з усіма типами нелінійностей: контактна складна поведінка, де водночас є зазори та переднатягіння, структурна нелінійність (через місцеві втрати міцності та руйнування), плинна поведінка матеріалу.

На відміну від розрахункових, експериментальні дослідження надають можливість максимально достовірно визначити поведінку вузлів. Проте вони досить складні, всебічний аналіз процесів утруднено, як і проведення параметричних досліджень. Автори поточної роботи не претендують на створення узагальненого представлення, лише пропонують розглянути певні питання, що пов'язані з експериментальними дослідженнями окремих вузлів (дослідження виконано відповідно до вимог EN 1993-1-3 [8]). Висвітлено основні параметри та конструктивні особливості досліджуваних елементів (балок, стійок, їх з'єднання у вузол) та параметри стенда. Завдяки виконаним експериментам було зафіксовано числові показники переміщень (кут обертання в "шарнірі", вигин тощо), а також реакція конструкції на навантаження. Представлено якісні картини поведінки та руйнації конструктивних елементів.

Завдяки цьому можна покращити процес аналізу отриманих результатів та визначити більш конкретно значення крутильної жорсткості та граничного навантаження.

Методи дослідження. Експеримент проводився для напівжорсткого з'єднання «стійка–балка», аналогічного до використовуваних у сучасних стелажних системах. Незважаючи на те, що конкретна геометрія елементів може відрізнятися залежно від виробника та призначення конструкції, основні їх елементи будуть принципово однаковими. На рис. 1 наведено приклад, де 1 – вузлове з'єднання «стійка–балка», 2 – вертикальна стійка з перфорацією, 3 – балка з зачепами, а на рис. 2 – варіанти виконань.

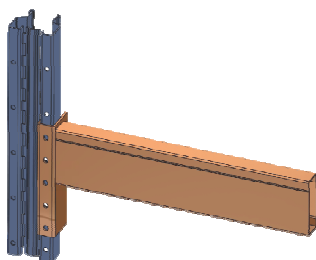


Рисунок 1 – Узагальнений вигляд базових елементів досліджуваного об'єкту

Стойка є відкритим профілем холодного прокату з тонколистової сталі (рис. 3). Він має регулярну перфорацію по всій довжині, що полегшує з'єднання з зачепами балок, закріпленими на їх торцях методом зварювання. Параметри стійки, що було задіяно в дослідженні, наведено в табл. 1.

Балка має коробчастий поперечний переріз,

виготовлена шляхом з'єднання двох профілів С-типу у прямокутну форму (рис. 4). До обох торців балки приварено зачепи, що вставляються у перфоровані отвори стійок. Основні розміри поперечних перерізів наведено в табл. 2.

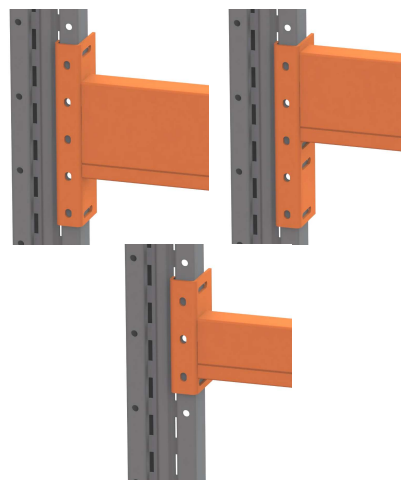


Рисунок 2. Приклади варіантів конструктивних виконань балок з зачепами

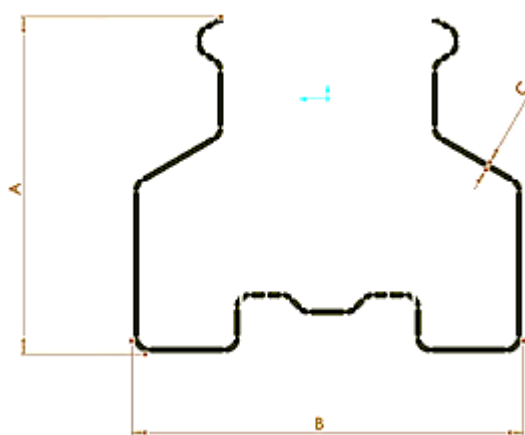


Рисунок 3 – Поперечний переріз стійки (розміри А, В, С наведено в табл. 1)

Таблиця 1 – Основні параметри досліджуваної стійки

Тип стійки	Код стійки	Висота А, мм	Ширина В, мм	Товщина С, мм
90.20	C1	80	90	2

Таблиця 2 – Основні параметри досліджуваних балок

Тип балки	Код балки	Висота А, мм	Ширина В, мм	Товщина С, мм
80	T1	80	40	1,5
120	T2	120	40	1,5
130	T3	130	40	1,5

У поточній роботі розглянуто п'ятизубчастий зацеп, що виготовлено зі сталі 4 мм завтовшки, як

елемент, що з'єднує.



Рисунок 4 – Форма та базові розміри поперечного перерізу балок (розміри А, В, С наведено в табл. 2)

Таблиця 3 – Досліджені зразки вузлів стійка-балка на вигин

Код збірки	Стойка	Балка	Кількість досліджень
C1-T1	C1	T1	5
C1-T2	C1	T2	6
C1-T3	C1	T3	5

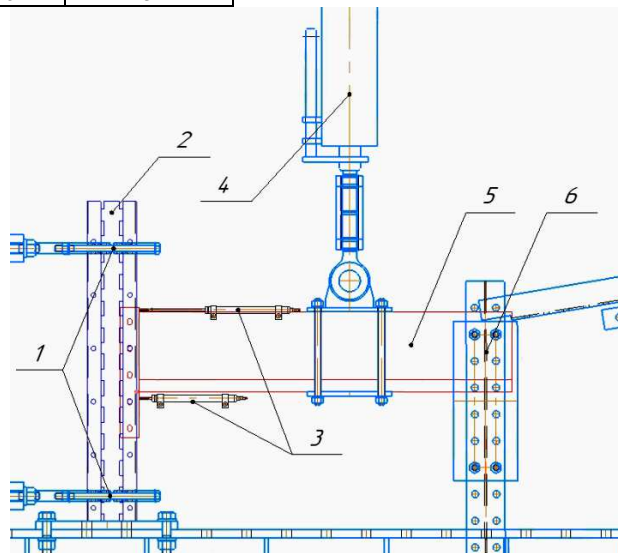


Рисунок 5 – Схема експериментальної установки для дослідження жорсткості вузлових з'єднань

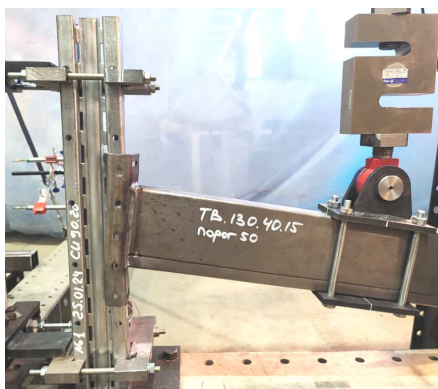


Рисунок 6 – Світлина дослідження на згинаючий момент згідно до EN 15512 (датчики переміщень було видалено перед фото-документуванням для зручності візуального аналізу)

Усі досліджені екземпляри, що необхідні для визначення жорсткості з'єднань, наведено в табл. 3 зі вказанням коду кожної збірки та кількості випробувань.

Методи проведення випробувань. Для проведення випробувань та теоретичного аналізу досліджених зразків вузлових з'єднань було використано сертифіковану сталь 350GD [9] для стійок та СтЗПС [10] для балок та зачепів.

Випробування на вигин. Дослідження проводилось згідно до стандарту EN 15512 [11]. Схема навантаження та світлини експериментальної установки наведено на рис. 5 та 6.

На рис. 5 відображено схематичний ескіз досліджувального стенду, що складається з наступних компонентів:

1. закріплення стійки;
2. досліджувана стійка;
3. датчики переміщень;
4. поршень, що передає зусилля на балку;
5. досліджувана балка;
6. розкріплення вільного кінця балки.

Коротку ділянку стійки з отворами було закріплено на жорсткій рамі у двох точках, що знаходяться на відстані 470 мм одна від одної. До стійки прикріплено коротку балку (довжина 650 мм). Бокові переміщення та кручення балки було виключено. Вільний кінець балки міг довільно рухатися лише вертикально завдяки конструкції паралельного шарніру. Вертикальне навантаження було прикладено на відстані 400 мм від передньої сторони стійки за допомогою датчика сили з точністю 0.001 кН та максимальним навантаженням 12.5 кН.

Кутове переміщення кінця балки у місці з'єднання зі стійкою вимірювалось за допомогою чотирьох датчиків переміщення. Використовувалися датчики з точністю 0.001 мм та максимальним діапазоном 100 мм.

Первісно прикладалося початкове навантаження близько 10% від граничної, далі вертикальна сила збільшувалася аж до руйнації вузлового з'єднання. Всі зразки, вказані в таблиці 3, було випробувано однаково, з мінімум п'ятьма повторними випробуваннями.

Значення зовнішньої сили F було використано для обчислення вигинаючого моменту M за формулою (1):

$$M = F \times b, \quad (1)$$

де b – відстань від стійки до точки прикладення навантаження.

Отримані переміщення D_1 та D_2 було використано для розрахунку кутового повороту θ за формулою:

$$\theta = \frac{D_2 - D_1}{h}, \quad (2)$$

де h – відстань між датчиками. Кут θ виражено в радіанах.

Вигинаючий момент M та кут повороту θ , що було отримано в результаті експерименту, скориговано відповідно до вимог стандарту EN 15512. Коригування є необхідним через розбіжності в характеристиках матеріалів, якто межа плинності та товщина кожного з компонентів. Для цього було введено коефіцієнт коригування C_m , розрахований за формулою

$$C_m = \left[\left(\frac{f_y}{f_t} \right)^a \times \left(\frac{t}{t_t} \right) \right]_{max}, \quad \text{при цьому } C_m \leq 1, \quad (3)$$

де f_t – межа плинності, згідно до сертифікатів сталі,

f_y – номінальна межа плинності згідно до стандарту EN 10346 [12],

t_t – виміряна товщина зразка,

t – розрахункова товщина,

$a = 0$, якщо $f_y \geq f_t$, та $a = 1$, якщо $f_y < f_t$.

Для коригування кривої “момент - кут обертання”, згідно до EN 15512, потрібно:

1. Побудувати базову криву ($M - \theta$) для кожного вузлового з'єднання.

2. Визначити початковий нахил K_0 (жорсткість у початковій фазі).

3. Визначити пластичний кут повороту θ_p за формулою

$$\theta_p = \theta - \frac{M}{K_0}. \quad (4)$$

4. Скоригований момент M_n розраховується за формулою:

$$M_n = M \times C, \quad (5)$$

де $C = 0,15 + C_m$, при цьому

$$C \leq 1. \quad (6)$$

5. Еластичний кут повороту після коригування визначається за формулою:

$$\theta_e = \frac{M_n}{K_0}. \quad (7)$$

6. Загальний скоригований кут повороту:

$$\theta_n = \theta_p + \theta_e = \theta_p + \frac{M_n}{K_0}. \quad (8)$$

Отримана скоригована крива $M_n - \theta_n$ зберігає такий самий початковий нахил K_0 , як і початкова крива.

Максимальне значення скоригованого моменту M_n вважається точкою руйнації M_{ni} (для кожного дослідження $i = 1 \dots n$). Середнє значення M_m розраховують за формулою:

$$M_m = \left(\frac{1}{n} \right) \times \sum_{i=1}^n M_{ni}. \quad (9)$$

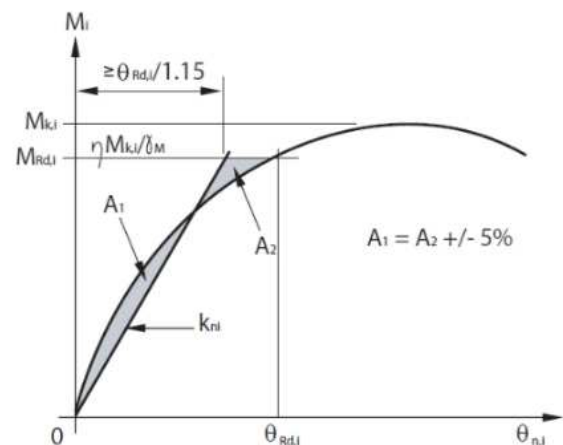


Рисунок 7 – Визначення жорсткості з'єднання відповідно до EN 15512

Стандартне відхилення скоригованих результатів випробувань, позначене як s , розраховуємо за формулою (10) відповідно до EN 15512:

$$s = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{n-1} \right) \times \sum (M_{ni} - M_m)^2 \right]}. \quad (10)$$

Характеристичне значення моменту руйнації

$$M_k = M_m - sK_s, \quad (11)$$

де K_s — коефіцієнт, що базується на 95-му відсотку фракталу при рівні вірогідності 75% відповідно до EN 15512.

Розрахунковий вигинаючий момент

$$M_{Rd} = \eta \times \frac{M_k}{\gamma M}, \quad (12)$$

де η - коефіцієнт зменшення (≤ 1),

$\gamma M = 1,1$ – окремий коефіцієнт надійності з'єднання.

Кутова жорсткість вузла k визначається як нахил прямої, що проходить через початок координат та дає рівні площі між цією прямою та експериментальною кривою до рівня M_{Rd} (див. рис. 6):

$$k_{ni} = 1,15 \times \frac{M_{Rd}}{\theta_{ki}}, \quad (13)$$

де θ_{ki} – кут повороту при моменті M_{Rd} на кривій $M_n - \theta_n$.

Середня розрахункова жорсткість

$$k_m = \left(\frac{1}{n}\right) \times \sum_{i=1}^n k. \quad (14)$$

Теоретичні основи розрахунку впливу жорсткості вузлового з'єднання. Для аналізу впливу напівжорстких (пружних) з'єднань у межах поточної роботи розглядаються три типи закріплення вузлів: шарнірне, абсолютно жорстке та напівжорстке.

Розрахунок міцності та вигину балок у складських стелажних системах передбачає, що на балку діє рівномірно розподілене навантаження p , яке створює маса палет із вантажем. При цьому вважається, що згинна жорсткість балки EI_b залишається постійною по всій її довжині l .

Якщо кінці балки з'єднані зі стійками через шарніри, максимальний вигин балки визначається за формулою:

$$\delta_{max} = \frac{5pl^4}{384EI_b}. \quad (15)$$

Максимальний згинний момент на середині балки в цьому випадку буде:

$$M_{max} = \frac{pl^2}{8}. \quad (16)$$

При жорсткому защемленні кінців балки максимальний вигин обчислюється за наступною формулою:

$$\delta_{max} = \frac{pl^4}{384EI_b}, \quad (17)$$

а відповідний максимальний згинний момент в середині балки дорівнює:

$$M_{max} = \frac{pl^2}{12}. \quad (18)$$

Напівжорсткі з'єднання не є повністю шарнірними та повністю жорсткими, проте мають перехідну поведінку та їх пружність виражається через крутильну жорсткість. У випадку використання поточного типу з'єднань значення згинного моменту та вигинів будуть знаходитися між значеннями, що є характерними для шарнірних або абсолютно жорстких з'єднань.

Для пружного з'єднання балок зі стійками визначення максимального вигину виглядає наступним чином:

$$\delta_{max} = \frac{5pl^3}{384EI_b} \beta_{\Delta} \left(1 - \frac{0,8 \beta_{\theta}}{\beta_{\Delta} \left(1 + \frac{2EI_b}{k_e l} \right)} \right), \quad (19)$$

де коефіцієнти навантажень на балку β_{Δ} і β_{θ} визначаються за EN 15512 та в цьому випадку дорівнюють 1.

Максимальний згинний момент в середині балки для напівжорстких вузлових з'єднань визначається за формулою:

$$M_{max} = \frac{pl}{8} \beta_m \left(1 - \frac{\frac{2}{3} \beta_{\theta}}{\beta_m \left(1 + \frac{2EI_b}{k_e l} \right)} \right), \quad (20)$$

$$\text{де } k_e = \frac{k_b}{1 + \frac{k_b h}{3EI_u}}, \quad (21)$$

h – висота рівня (ярусу);

k_b – жорсткість з'єднання балка-стійка;

I_u – момент інерції стійки;

β_m – коефіцієнт навантаження, що визначається за EN 15512.

На рис. 8 зображена розрахункова модель, використовувана відповідно до вищеописаних формул.

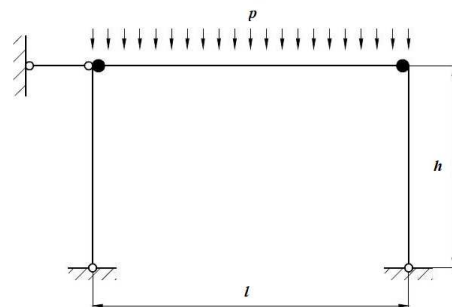


Рисунок 8 – Модель наближеного розрахунку балок

Результати досліджень. У ході поточного дослідження були випробувані всі вузлові з'єднання типу «стійка – балка», вказані в табл. 3, з використанням метода, описаного у стандарті EN 15512.

Спочатку було побудовано базові криві «момент – кут повороту» ($M - \theta$) з використанням даних від датчиків сили та переміщень. Потім, після внесення коригувань, було побудовано скориговані криві ($M_n - \theta_n$) для кожного зразка.

Форми всіх кривих ($M_n - \theta_n$) демонструють високу повторюваність: початкові відтинки, що визначають жорсткість, та максимальні згинні

моменти, близькі для повторних випробувань для одної й тої ж самої комбінації стійки та балки.

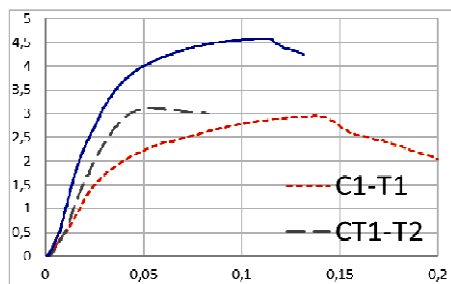


Рисунок 9 – Діаграми жорсткості вузлових з'єднань

Всі значення розрахункового згинного моменту $M_{Rd,i}$ та кутової жорсткості k було визначено за формулами (12) та (13). Для співставлення жорсткість k було розраховано за $\eta=1$. Середні значення M_{Rd} та k_m наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Вирахувані середні значення M_{Rd} та k_m

Код збірки	M_{Rd} , kNm	k_m , kNm/rad
C1-T1	2.66	49.5
C1-T2	2.82	84.7
C1-T3	4.16	104

Характер руйнації з'єднань варіювався залежно від конфігурації кожної випробуваної комбінації.

Основними механізмами руйнації є вигин зачепа (рисунок 10, а) та локальна втрата стійкості стінки стійки в зоні з'єднання, також можна спостерігати руйнації в верхній зоні приварювання до зачепа (рисунок 10, б).

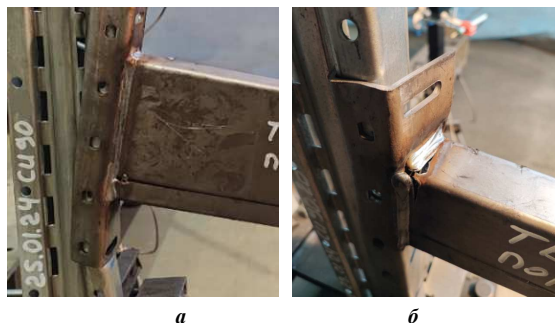


Рисунок 10. Руйнації досліджуваних зразків:
а – деформація зачепа,
б – розрив зварювального шва

Аналіз жорсткості з'єднань. Аналіз експериментальних даних та графіків залежності моменту від кута поворота ($M-\theta$) демонструє, що визначення реальної жорсткості вузлових з'єднань є

достатньо складним та ітераційним завданням. На жорсткість можуть впливати різні параметри, як – от товщина та розміри стійки, габаритна висота балки, товщина та форма зачепа, а також орієнтація балки відносно до зачепа. У поточній роботі, зокрема, показано, як на жорсткість з'єднання впливає висота балки.

Практично ж значення розрахункового моменту M_{Rd} та кутової жорсткості з'єднання, отримані експериментально, є дуже корисними для оцінки надійності роботи вузла як із точки зору міцності, так і з точки зору жорсткості.

Для демонстрації впливу жорсткості з'єднання розглянуто три моделі балки при однаковому навантаженні:

1. Шарнірне навантаження ($k_m = 0$).
2. Напівжорстке навантаження $k_m = 49,5$ кНм/рад.
3. Жорстке (нерухоме) з'єднання ($k_m \rightarrow \infty$).

Розглянуто типовий випадок у стележних системах: дві балки завдовжки 2.7 м підтримують три пелети з вантажем, кожна масою до 500 кг. Загальна вага 14.71 кН. Оскільки навантаження розподіляється між двома балками, на одну балку припадає 7.355 кН, що відповідає розподіленому навантаженню $p = 2,724$ кН/м.

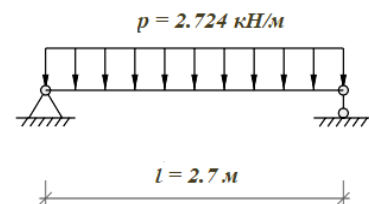


Рисунок 11 – Схема навантаження

Моделювання виконано у програмному пакеті RSTAB [13], розрахунок вигинів та напружень представлено на рис. 12, 13. У табл. 5 продемонстровано результати моделювання завдання.

Таблиця 5 – Результати моделювання теоретичного розрахунку балки

Тип вузлового закріплення	Максимальний вигин, мм	Максимальне напруження, МПа
Шарнірне	17,8	195
Напівжорстке	12,4	145
Жорстке	3,7	132

Відповідно до вимог EN 15512, максимальний вигин балки довжиною 2.7 м не повинен перевищувати 13.5 мм. Аналіз моделювання демонструє, що балка з шарнірним закріпленням не відповідає поточній вимозі, оскільки розрахунковий вигин в цьому випадку складає 17.8 мм. Модель з жорсткими закріпленнями балки зі стійкою показує кращі результати за вигинами та напруженнями, але не є реалізуємою, бо фактична робота з'єднання стійка-балка є напівжорсткою. Водночас модель на напівжорстким закріпленням по кі-

нцях забезпечує відповідність нормативним обмеженням за вигином та не перевищує за напруженням межі плинності сталі балки. Це підкреслює важливість ролі жорсткості з'єднань, що суттєво впливає на поведінку балки – зокрема, на ви-

гини, розподілення моментів та напружень. Таким чином, врахування жорсткості з'єднань є важливим аспектом при проектуванні стележних конструкцій.

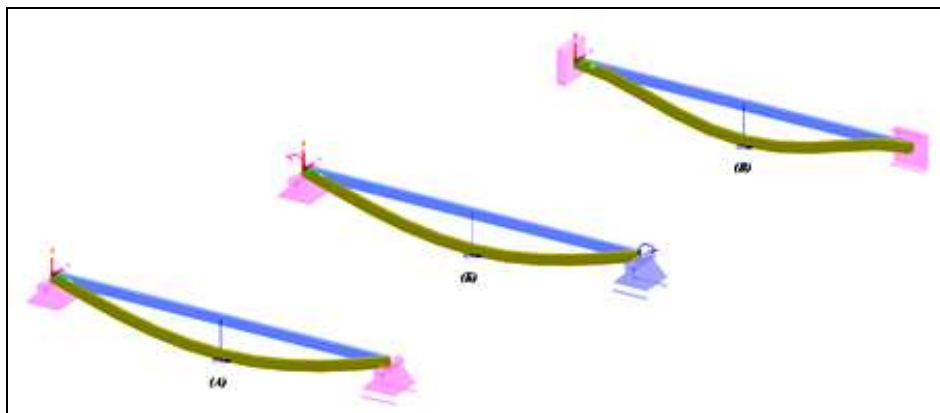


Рисунок 12 – Порівняння максимальних вигинів для різних типів закріплення:
А – шарнірно-оперта балка, Б – балка з напівжорстким закріпленням, В – жорстке защемлення

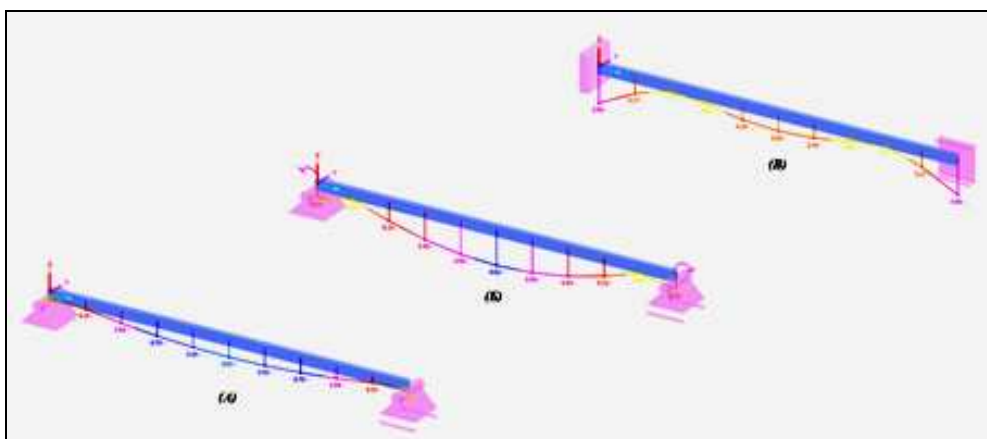


Рисунок 13 – Порівняння співвідношення напружень для різних типів закріплення:
А – шарнірно-оперта балка, Б – балка з напівжорстким закріпленням, В – жорстке защемлення

Висновки. Напівжорсткі з'єднання широко застосовуються у проектуванні стележних складських систем. У поточному дослідженні представлено експериментальне вивчення механічних характеристик зачепів, що використовуються для з'єднання балок із вертикальними стійками. Основною метою роботи є оцінка впливу жорсткості вузлових з'єднань на поведінку балок, а також визначення розбіжностей між шарнірними, пружними та жорстко закріпленими з'єднаннями. Окрім того, дослідження дозволяє оцінити актуальність та перспективність подальшого вивчення даної теми в контексті підвищення надійності та ефективності складських стележних конструкцій.

Варто врахувати, що поточне дослідження проводилося лише з одним типом геометрії профіля стійки.

Як один із можливих напрямів для подальших досліджень напівжорстких з'єднань становить інтерес вивчення впливу товщини стінок стійки та її

геометричних розмірів, а також орієнтації приварювання балки до зачепу.

Експериментальні дослідження, на відміну від розрахункових, надають можливість отримати максимально достовірні результати, проте є складними для повного всебічного аналізу процесів, що відбуваються при цьому, та для проведення параметричних досліджень.

Проте саме проведення параметричних досліджень є важливою частиною, яка дозволяє знайти не тільки конкретну жорсткість одного окремого вузла, а визначити закономірності для всієї лінійки виробів та їх можливих комбінацій у вузлі.

Таким чином, виконано розрахункове дослідження, що поєднує проведення серії натурних експериментів та пошук параметрів чисельних розрахунків. Воно дозволить проводити більш глибокий аналіз процесів та отримувати числові значення жорсткості вузлів для усього спектру найбільш живих комбінацій вузлів. У подальшому пропонується

перенести методику на розв'язання задачі аналізу та синтезу конструктивних рішень.

Список літератури

1. Shah S.N.R., Sulong N., ..., Jumaat M. Z. (2016). Behavior of steel pallet rack beam-to-column connections at elevated temperatures *Engineering, Materials Science. Thin-walled Structures* Vol. 106, September 2016, P. 471-483. DOI:10.1016/J.TWS.2016.05.021
2. Zhao X.Z., Wang T., Chen Y.Y., Sivakumaran K.S. (2019). Flexural behavior of steel storage rack beam-to-upright connections. *Steel and Composite Structures*. Vol. 33, no. 3, pp. 357-373. DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2019.33.3.357>
3. Godley M.H.R., J. Michael Davics. A European Design Code for Pallet Racking.
4. Tuo Wang, Xianzhong Zhao, Yiyi Chen. (2014). Calculation for Moment Capacity of Beam-to-Upright Connections of Steel Storage Pallet Racks. *International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. no. 1. pp. 587-600 <https://scholarsmine.mst.edu/isccss/22icfss/session08/1>
5. Teoman Pekoz, Kotha Rao. (2016). Design of industrial storage racks. *Progress in Structural Engineering and Materials* no. 3(1), pp. 28-35. DOI:10.1002/pse.63
6. Shariati M., Tahir M.M., Wee T.C., Shah S.N.R., Jalali A., Abdullahi M.M., Khorami M. (2017). Experimental investigations on monotonic and cyclic behavior of steel pallet rack connections. *Engineering Failure Analysis* 85(6). DOI:10.1016/j.engfailanal.2017.08.014
7. Prabha, P., Marimuthu, V., Saravanan, M., and Jayachandran, S. A. (2010). Evaluation of connection flexibility in cold formed steel racks. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 66(7), pp. 863-872.
8. Eurocode 3: Design of steel structures: Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. In Design of Joints; EN 1993-1-3; European Committee for Standardization. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-3. Загальні правила. Додаткові правила для холодноформованих елементів і профільованих листів (EN 1993-1-3:2006, IDT). 3 поправкаю
9. SSAB Domex® 350GD <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/ssab-domex/product-offer/350gd>
10. Сталь Ст3пс <https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/st3ps>
11. Standard, B. Steel Static Storage Systems—Adjustable Pallet Racking Systems—Principles for Structural Design; EN 15512; European Committee for Standardization. ДСТУ EN 15512:2015 Системи складські стаціонарні сталеві. Збірно-розбірні палетні стелажні системи. Принципи проектування конструкцій (EN 15512:2009, IDT)
12. ДСТУ EN 10346:2022 Сталевий плоский прокат із неперервним гарячим покриттям для холодного формування. Технічні умови постачання (EN 10346:2015, IDT)
13. <https://www.dlupal.com/en/products/rfem-fea-software/rfem/what-is-rfem>

References (transliterated)

- i. Shah S.N.R., Sulong N., ..., Jumaat M. Z. (2016). Behavior of steel pallet rack beam-to-column connections at elevated temperatures *Engineering, Materials Science. Thin-walled Structures* Vol. 106, September 2016, P. 471-483. DOI:10.1016/J.TWS.2016.05.021
2. Zhao X.Z., Wang T., Chen Y.Y., Sivakumaran K.S. (2019). Flexural behavior of steel storage rack beam-to-upright connections. *Steel and Composite Structures*. Vol. 33, no. 3, pp. 357-373. DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2019.33.3.357>
3. Godley M.H.R., Davics J. Michael. A European Design Code for Pallet Racking.
4. Tuo Wang, Xianzhong Zhao, Yiyi Chen. (2014). Calculation for Moment Capacity of Beam-to-Upright Connections of Steel Storage Pallet Racks. *International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. no. 1. pp. 587-600 <https://scholarsmine.mst.edu/isccss/22icfss/session08/1>
5. Teoman Pekoz, Kotha Rao. (2016). Design of industrial storage racks. *Progress in Structural Engineering and Materials* no. 3(1), pp. 28-35. DOI:10.1002/pse.63
6. Shariati M., Tahir M.M., Wee T.C., Shah S.N.R., Jalali A., Abdullahi M.M., Khorami M. (2017). Experimental investigations on monotonic and cyclic behavior of steel pallet rack connections. *Engineering Failure Analysis* 85(6). DOI:10.1016/j.engfailanal.2017.08.014
7. Prabha, P., Marimuthu, V., Saravanan, M., and Jayachandran, S. A. (2010). Evaluation of connection flexibility in cold formed steel racks. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 66(7), pp. 863-872.
8. Eurocode 3: Design of steel structures: Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. In Design of Joints; EN 1993-1-3; European Committee for Standardization. DSTU-N B EN 1993-1-3:2012 Yevrokod 3. Proektuvannia stalevykh konstrukttsii. Chastyna 1-3. Zahalni pravyla. Dodatkovi pravyla dlia kholodnoformovanykh elementiv i profilovanykh lystiv (EN 1993-1-3:2006, IDT). Z popravkoiu
9. SSAB Domex® 350GD <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/ssab-domex/product-offer/350gd>
10. Сталь Ст3пс <https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/st3ps>
11. Standard, B. Steel Static Storage Systems—Adjustable Pallet Racking Systems—Principles for Structural Design; EN 15512; European Committee for Standardization. DSTU EN 15512:2015 Systemy skladski statsionarni stalevi. Zbirno-rozbirni paletni stelazhni systemy. Prynysypy proektuvannia konstrukttsii (EN 15512:2009, IDT)
12. DSTU EN 10346:2022 Stalevyi ploskyi prokat iz nepervnym hariachym pokryttiam dlia kholodnoho formuvannia. Tekhnichni umovy postachannia (EN 10346:2015, IDT)
13. <https://www.dlupal.com/en/products/rfem-fea-software/rfem/what-is-rfem>

Надійшла (received) 20.02.2026

Стаття прийнята до друку 20.04.2026

Опублікована 28.04.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Забара Олексій Сергійович / Zabara Oleksii – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6613-3249> тел.: (057)7076902, e-mail: Oleksii.Zabara@mit.khpi.edu.ua

Любимов Михайло Сергійович / Liubymov Mykhailo – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9552-2133> тел.: (057)7076902, e-mail: Mykhailo.Liubymov@mit.khpi.edu.ua

Базікало Сергій Євгенович / Bazikalo Serhii – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8260-6812>; e-mail: Serhii.Bazikalo@mit.khpi.edu.ua

Лисаченко Андрій Юрійович / Lysachenko Andrii – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5616-505X> тел.: (057)7076902, e-mail: Andrii.Lysachenko@mit.khpi.edu.ua

Мазурець Сергій Олександрович / Mazurets Serhii – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5482-6648> тел.: (057)7076902, e-mail: Serhii.Mazurets@mit.khpi.edu.ua