## УДК 624.21.09:624.014.2-047.86

## Д. С. СПІВАК<sup>1\*</sup>, С. В. КЛЮЧНИК<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 200 07 64, ел. пошта d.s.spivak@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8155-7497
<sup>2</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 667 40 49, ел. пошта s.v.kliuchnyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-7771-8377

## Вплив матеріалів і масштабного фактора на руйнування К-подібних вузлів трубобетонних мостів: ефективність конструктивних параметрів

Мета. У роботі передбачено провести аналіз напружено-деформованого стану К-подібних вузлів трубобетонних конструкцій за допомогою програмного моделювання методом скінченних елементів з урахуванням нелінійних характеристик матеріалів, що, у свою чергу, потребує оцінки впливу матеріалів і розмірів вузлів на роботу порожнистих розкосів у решітчастих конструкціях мостів. Методика. Передбачено чисельне моделювання напружено-деформованого стану К-подібних вузлів трубобетонних поясів у програмі ANSYS. Для аналізу використано два класи бетону (С16/20 і С50/60) та дві марки сталі (16Д і 10ХСНД), які змодельовано із застосуванням критерію пластичності Друкера-Прагера для бетону та інструменту багатолінійного ізотропного зміцнення для сталі. Було підготовлено 12 варіантів моделей вузлів із різними характеристиками матеріалів та двома масштабами розмірів. Для наближення до реального стану навантаження на вузли здійснено у два етапи: спочатку було завантажено пояс, а потім розкоси до їх повної відмови. Результати. Розрахунки показали, що деформування порожнистих зразків вузлів відповідає лабораторним експериментам інших авторів. Вплив бетонного заповнення на стиснуті та розтягнуті розкоси був значним, особливо для стиснутих, де ефект досяг 20,8 %. Бетон класу С50/60 не завжди поліпшує ефективність, іноді поступаючись бетону класу С16/20. Збільшення розміру вузла позитивно впливає на ефективність бетону, зокрема для стиснутих розкосів, де приріст склав до 12,3 %. Підвищення міцності сталі з 16Д до 10ХСНД для розтягнутих розкосів показало ефективність від 0 до 8,6 %, а для стиснутих – до 22,8 %. Графіки напружень уздовж зварного шва показали, що бетон допомагає рівномірно розподіляти напруження як у стиснутих, так і в розтягнутих розкосах. Наукова новизна. У роботі проведено аналіз впливу матеріалів та геометрії сталевих вузлів, частково заповнених бетоном, на роботу порожнистих розкосів, де особливу увагу приділено малодослідженому фактору розміру вузла. Практична значимість. Завдяки скінченному елементному нелінійному аналізу та застосуванню нормативних актів України і європейських стандартів, установлено принципи оптимального підбору класів бетону та сталі для трубобетонних К-подібних вузлів. Це дозволяє забезпечити надійність сучасних мостових решітчастих конструкцій, підвищити їхню ефективність та економічність.

Ключові слова: трубобетон; решітчасті конструкції; мостові ферми; К-подібні вузли; метод скінченних елементів; нелінійне моделювання; режим руйнування

#### Вступ

На сьогодні понад 200 зведених середніх та великих мостів у світі демонструють переваги використання як головних несних елементів сталевих труб, заповнених бетоном. Понад 30 років активного будівництва трубобетон використовують в аркових та фермових мостах для пропуску залізничного чи автомобільного транспорту [11].

Завдяки двовісному обтисненню бетону трубобетонний елемент демонструє значно більшу несну здатність та жорсткість, ніж сумарна міцність його окремих компонентів. Цей ефект найбільше та найкраще проявляється в елементах круглого перерізу, де домінує сила стиску, що пояснює застосування трубобетону тільки в стиснених поясах прогонів мостів та їхніх опорах [15]. Зазвичай бетон заливають лише в пояси, тоді як розкоси залишають незаповненими, що залежить від вимог та умов будівництва. Наявність бетонного заповнення в поясах решіток не лише значно підвищує опір вузлів з'єднання елементів і втомну міцність, але й змінює режими руйнування та забезпечує рівномірний розподіл деформацій у місці з'єднання порівняно з порожнистими варіантами [16, 18].

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/324909

Склепіння аркових мостів часто виконують у вигляді решітки, що робить їх подібними до фермових мостів у питаннях міцності та надійності вузлів з'єднання елементів. механічної Дослідження поведінки композитних ферм 38 різних умов з'єднання навантаження показали, що елементів решітки найважливішими € ділянками в системі конструкції [13]. З'єднання поясів i розкосів зазвичай виконують зварюванням через стикові або кутові шви по периметру торця розкосу. Хоча існує метод лиття вузлів, він є менш надійним, більш трудомістким та підходить зазвичай у зонах спирання на опорну частину [19].

Останні публікації вказують на необхідність дослідження втомної міцності, місцевих деформацій відмінностей у та режимах руйнування зварних швів і хорди. Окремо слід експериментальних зазначити нестачу випробувань реальних вузлів для більш точного аналізу та розробки надійних метолів проєктування, зокрема застосування та оцінки точності формул Єврокоду 3 для розрахунків зварних швів [16].

Наразі актуальним залишається питання ефективного використання матеріалів різних класів міцності. Зазвичай вибір матеріалів для трубобетонних елементів здійснюють за їхнім призначенням і розрахунковими параметрами. У мостобудуванні широко застосовують низьколеговані сталі класів у діапазоні S235-S390. Для бетонних та залізобетонних елементів перевагу надають важкому бетону, зазвичай класів від С20/25 до С50/60, причому його вибір часто узгоджують із класом сталі: що вищий клас сталі, то вищий клас бетону [13]. У деяких випадках, наприклад, у великопрогонових мостах, використовують сталі класу Q420 (аналог S420) та бетон до класу С80 [20]. Водночас досліджень, які б детально аналізували ефективність вибору конкретного класу міцності сталі та бетону на поведінку вузлів, наразі не існує.

Попри численні дослідження трубобетонних вузлових з'єднань, досі потрібні додаткові експерименти для підтвердження та оцінки їхньої поведінки без додаткових методів їх підсилення в різних комбінаціях класів міцності матеріалів. Найпоширенішими

вузлами в решітках є К-, N- та ТК-подібні, проте більшість досліджень зосереджено саме на К-подібних вузлах, які є актуальними та були обрані для проведення дослідження в межах цієї статті [12].

## Мета

Автори ставлять за основну мету статті аналіз напружено-деформованого стану К-подібних вузлів за допомогою програмного урахуванням нелінійних моделювання 3 характеристик матеріалів. Розглянуто вплив масштабу моделей, класів бетону та сталі на напружено-деформований стан, а також оцінку їх ефективності. У дослідженні використано поширеними матеріали сталі та бетону, які часто використовують у практиці будівництва в Україні. Їх властивості задано відповідно до чинних будівельних норм.

За допомогою методу скінченних елементів продемонстровано методику реалізації розрахунку та перевірки К-подібних вузлів для мостових конструкцій. Виконано порівняння результатів деформування комп'ютерної моделі з результатами лабораторних досліджень подібних зразків, проведених іншими авторами.

## Методика

Матеріали. Для проведення дослідження використано два максимально віддалені класи важкого бетону за сталі та міцністю. Характеристики бетону обрано відповідно до B.2.6-98:2009 ЛБН [4], які найповніше описують властивості мішності та деформативності цього матеріалу. Найнижчим класом бетону обрано С16/20, що є мінімально допустимим для використання в головних елементах мостобудівництва, несних а найвищим - С50/60, який є максимальним класом, зазначеним у ДБН [4].

Попри наявність мостових нормативів, найбільш чіткі рекомендації щодо нелінійного розрахунку бетону також наведено в ДБН В.2.6-98:2009 [4]. Для опису поведінки бетону використано модель пластичності Друкера-Прагера. Цей метод добре підходить моделювання руйнування крихких для матеріалів, зокрема бетону. Крім того, застосований підхід дозволяє враховувати

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/324909

пошкодження бетону, що є ефективним для оцінки матеріалу як під дією різних етапів навантаження, так і для його аналізу під час циклічних випробувань.

Для реалізації методу Друкера-Прагера було обрано підхід, виконаний та візуально продемонстрований професором цивільного будівництва Університету Міннесоти Дулут доктором Броком Хедегаардом [18]. За допомогою команд мови APDL у програмі ANSYS було налаштовано діаграму напруження-деформації бетону, відповідно до характеристичних значень параметрів одновісного стиску розтягування  $f_{ck,cube}$ ,  $f_{ctk.0.95}$ , модуля пружності  $E_{ck}$  та деформації стиску бетону за максимальних напружень  $\varepsilon_{clck}$ . Згідно з ДБН [4], коефіцієнт Пуассона  $\upsilon$ 

допустимо брати рівним 0,2, а густину бетону визначено як 2 500 кг/м<sup>3</sup>.

Для налаштування матеріалу бетону за цим підходом потрібно додатково задати 11 параметрів, які наведено в табл. 1. Параметр двовісної міцності бетону f<sub>ckc</sub> визначено на основі стандартної кореляції між двовісною та одновісною міцністю на стиск.  $f_{ck,c} = 1,15 \times f_{ck,cube}$ . Це значення є репрезентативним, його широко використовують як загальноприйняте. Для визначення параметра мінімальної площі нелокальної поведінки використовують умову  $c > 4 \times L^2$ , де L позначає розмір мінімальної сторони скінченного елемента бетонної складової в міліметрах. Решту параметрів підібрано В межах рекомендованих значень отримання ДЛЯ необхідної форми кривої.

Таблиця 1

#### Додатково взяті значення параметрів для налаштування властивостей бетону

Table 1

Назва	Позначення Од. виміру		Типове, рекомендоване	Взяті значення для бетону класу	
			значення	C16/20	C50/60
Двовісна міцність	$f_{\mathit{ck,c}}$	МПа	$1,15 \times f_{ck,cube}$	23×10 <sup>6</sup>	69×10 <sup>6</sup>
Межа стиснення	$\sigma_v^c$	МΠа	Від —2/3× <i>f<sub>ck,c</sub></i> до — <i>f<sub>ck,c</sub></i>	-23×10 <sup>6</sup>	-69×10 <sup>6</sup>
Коефіцієнт обмеження стиснення	R	Безрозмірний	2	2	2
Константа зміцнення	D	МПа	Від 1×10 <sup>16</sup> до 5×10 <sup>17</sup>	3×10 <sup>16</sup>	3×10 <sup>16</sup>
Зміцнення під час розтягу	$R_T$	Безрозмірний	1	1	1
Межа накопичення пошкоджень під час розтягу	$\gamma_{t0}$	Безрозмірний	0	0	0
Межа накопичення пошкоджень під час стиснення	$\gamma_{c0}$	Безрозмірний	Від 1×10 <sup>-5</sup> до 1×10 <sup>-4</sup>	5×10 <sup>-5</sup>	4,5×10 <sup>-5</sup>
Розвиток пошкоджень під час розтягу	$\beta_t$	Безрозмірний	$1,5 \times \beta_c$	6 000	6 000
Розвиток пошкоджень під час стиснення	$\beta_c$	Безрозмірний	Від 1 000 до 10 000	4 000	4 000
Площа нелокальної поведінки	С	мм <sup>2</sup>	$>4 \times L^2$	8 000	8 000
Наднелокальний параметр	т	Безрозмірний	Від 1 до 3	2	2

#### Additionally, the values of the parameters for setting the properties of concrete were taken

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/324909

© Д. С. Співак, С. В. Ключник, 2025





# Fig. 1. Minimum principal stresses in a cube of concrete of class C16/20 during uniaxial compression

Діаграми бетонів визначено шляхом стиску та розтягу моделі кубика (рис. 1), при цьому лвовісний стиск визначено обмеженням переміщення по нормалі двох паралельних бічних граней. За загальними правилами оцінку напружено-деформованого стану класичного бетону рекомендують виконувати за головними напруженнями, що враховано під час визначеня діаграм для бетонів С16/20 та С50/60, зображених на рис. 2. Оскільки під час побудови діаграми цим методом існує багато наближених змінних, точне її узгодження з вхідними показниками не є можливим та необхідним. Відповідно, діаграми цi

налаштовано з максимальним наближенням до референтних значень, порівняння з якими наведено в табл. 2, де найбільше відхилення склало 2,22 %.

Для головних несних елементів мостів найчастіше використовують низьколеговані сталі. Відповідно до ДБН В.2.3–14:2006 [2], для використання дозволені сталі марок 16Д і 10ХСНД. Ці сталі широко застосовують у будівництві, вони суттєво відрізняються за міцністю, що має важливе значення для цього експерименту.

Низьколегована сталь не має чітко вираженої полички плинності  $\sigma_T$ . Для порівняння діаграма на рис. 3, *а* ілюструє поведінку матеріалу зразків із маловуглецевої сталі, наприклад, Ст2 і Ст3, для яких характерна яскраво виражена ділянка плинності (точка С). Натомість діаграма на рис. 3, б відображає результати випробувань зразків із низьколегованої сталі, такої як 09Г2, 10ХСНД [10].

Значення граничних деформаційноміцнісних параметрів сталей отримано з ДСТУ 8817:2018 [5] та наведено в табл. 3. Саму ж форму діаграми описано лінійною функцією до межі пропорційності  $\sigma_{nil}$  як  $R_y/E$  та квадратичними функціями, що виходять із точок межі плинності  $R_y$  і тимчасового опору  $R_y$  (риз 4)





Рис. 2. Розрахункові діаграми напруження-деформації бетонів на одновісний стиск-розтяг та двовісний стиск

Fig. 2. Design stress-strain diagrams of concrete for uniaxial compression-tension and biaxial compression

#### Таблиця 2

## Порівняння отриманих граничних параметрів бетону з референтними

Table 2

Клас	Міцність [МПа]							Деформації [мм/м]		
	Одновісний стиск / розтяг			Двовісний стиск			Одновісний стиск			
оетону	$f_{ck,cube}$ / $f_{ctk,0.95}$	Фактич.	Δ [%]	$f_{ck,c}$	Фактич.	Δ [%]	ε <sub>cl,ck</sub>	Фактич.	$\Delta$ [%]	
C16/20	20,00 / 2,50	19,88 / 2,49	0,60/ 0,40	23,00	23,51	2,22	1,66	1,67	0,60	
C50/60	60,00 / 5,30	59,67 / 5,24	0,55/ 1,13	69,00	69,57	0,83	2,02	2,03	0,50	



Рис. 3. Діаграми розтягування зразків з маловуглецевої сталі (a) і низьколегованої сталі ( $\delta$ ) [13] Fig. 3. Tensile diagrams of low-carbon steel specimens (a) and low-alloy steel specimens (b) [13]



Рис. 4. Розрахункова діаграма деформування сталі 16Д

Fig. 4. Design diagram of deformation of 16D steel

## Таблиця 3

Параметри сталі

Table 3

Steel parameters	
------------------	--

Марка сталі	$R_{ m y}$ [МПа]	ε <sub>у</sub> [мм/м]	$R_u$ [MПа]	<i>Е</i> [ГПа]	υ	δ
16Д	215	2,08	340	206	0,3	0,26
10ХСНД	350	3,04	470	206	0,3	0,19

Побудовані діаграми було додано до властивостей матеріалу в програмі ANSYS за допомогою вбудованого інструменту багатолінійного ізотропного зміцнення.

Модуль пружності *Е* прокатної сталі взято рівним 206 ГПа відповідно до ДБН [2] та ДБН В.2.6–198:2014 [3]. Коефіцієнт Пуассона о для сталі взято рівним 0,3, а її густину – 7 850 кг/м<sup>3</sup> [3].

Властивості зварних швів, що з'єднують розкоси та пояс, взято такими ж, як і властивості конструкційної сталі, застосованої для труб.

Моделювання. У цьому дослідженні розглянуто К-подібні вузли з порожнистими та бетононаповненими поясами без додаткового посилення. Такі з'єднання є одним із найпоширеніших типів, які використовують у решітках аркових склепінь мостів та фермах. Основою для дослідження цих вузлів став лабораторний експеримент, проведений Веньцзінь Хуаном та ін. [16].

Для чисельного експерименту було підготовлено дві геометричні моделі вузлів. Вони мають однакове співвідношення між проте зміною розмірами, зi діаметра непропорційно змінюється внутрішня площа перерізу труб, що може вплинути на результати. Загалом підготовлено 12 зразків для розрахунку, параметри яких наведено в табл. 4 та проілюстровано на рис. 5. Код зразка відображає ключові зміни в характеристиках моделі вузла та містить позначення у форматі зовнішній «діаметр пояса» – «марка сталі» – «клас бетону». Відсутність параметра «клас бетону» в коді зразка означає, що він є порожнистим, тобто не містить бетону в поясі вузла.

Зовнішні діаметри трубобетонних елементів визначено на основі параметрів реальних мостів. Найменший діаметр труби становить 550 мм (арковий міст Ши-Тан-Сі [14]), а найбільший – 1 220 мм (Ушанський арковий міст через річку Янцзи [9]). Для зручності ці значення було округлено: максимальний розмір зменшено до 1 200 мм, а мінімальний – до 400 мм, щоб підсилити можливий ефект і забезпечити кратність. Крім того, діаметр 1 200 мм є наближеним до максимального значення, наведеного в ДСТУ EN 10219–2:2009 [6].

Розрахункові довжини елементів наближені до значення 4×d, що виключає можливість загальної втрати стійкості та дозволяє уникнути локалізованих ефектів у зоні прикладення навантажень. Ексцентриситет з'єднання дорівнює нулю для кожного зразка, що забезпечує збіг центральних ліній розкосів і пояса та дозволяє знехтувати вторинними згинальними моментами.

Більшість розмірів призначено на основі пропорцій згідно з дослідженням Веньцзінь Хуана та ін. [16], значення яких описано далі. Діаметр розкосів визначено як  $0,44 \times D$  від діаметра пояса. Товщина труб трубобетонних елементів становить  $T=1/50 \times D$ , що відповідає умові  $\frac{D}{T} \ge 90 \times \frac{235}{R_y}$  згідно

з ДСТУ Н Б ЕN 1994–2:2012 [8]. Товщина труб розкосів дорівнює  $t = 1/29,33 \times d$ , що не є меншою за мінімальне значення  $t_{\text{spec.min}} = 4,8$ відповідно до ДСТУ–Н Б EN 1993–4–3:2012 [7], а також задовольняє умові  $\frac{d}{t} \ge R_y$ . Також згідно з [16], кут між розкосами взято рівним 60°, а катети зварних швів дорівнюють подвійній товщині розкосів.

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/324909

<sup>©</sup> Д. С. Співак, С. В. Ключник, 2025

ISSN 2307-3489 (Print), ISSN 2307-6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту, 2025, № 1 (109)

## Таблиця 4

#### Інформація про зразки моделей вузлів

Table 4

Код зразка	<i>D</i> [см]	Марка сталі	Клас бетону	Т [см]	<i>L</i> [см]	<i>d</i> [см]	<i>t</i> [см]	<i>l</i> [см]	<i>g</i> [см]
D40-16Д-С20			C16/20						
D40-16Д-С60		16Д	C50/60						
D40–16Д	40		_	0.0	160	17.6	0.6	67.2	20
D40-10ХСНД-С20	40		C16/20	0.8	100	17,0	0,0	07,5	2,0
D40-10ХСНД-С60		10ХСНД	C50/60						
D40-10ХСНД			—						
D120-16Д-С20			C16/20						
D120-16Д-С60		16Д	C50/60						
D120–16Д	120		—	24	190	52 0	1.0	201.0	02
D120-10ХСНД-С20	120		C16/20	2,4	400	52,8	1,0	201,9	0,5
D120-10ХСНД-С60		10ХСНД	C50/60						
D120-10ХСНД			-						

Позначення:

D – зовнішній діаметр пояса;

*T* – товщина труби пояса;

L – повна довжина пояса;

a - a





*l* – повна довжина розкосу;

g – зазор між розкосами.

 $\delta - b$ 





Рис. 5. Схема розрахункових моделей на першій (*a*) та другій (б) стадії завантаження. Додаткові відомості про модель (в)

Fig. 5. Schematic of the computational models at the first (a) and second (b) stages of loading. Additional information about the model (c)

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/324909

Граничні умови та завантаження. Як і в експерименті Веньцзінь Хуана та ін. [16], модель вузла завантажено у два етапи. На першому етапі (рис. 5, а) виконано лише завантаження пояса, що відображає реальну картину роботи вузла конструкції. Як було попередньо визначено, пояс завантажували силою N<sub>Ed</sub> до стану, що становив приблизно 1/4 від його несної здатності  $N_{Rd}$ . Відповідно до цього, було окремо розраховано елементи поясів, після чого чверть визначеної критичної сили було прикладено до пояса моделі вузла. Аналіз напружень у вузлі на першому етапі завантаження показав, що напруження в трубах були вдвічі нижчими за межу плинності сталі. На другому етапі (рис. 5, б) виконано завантаження розкосів, за якого верхній розкіс розтягується, а нижній стискається до їхньої повної відмови. На цьому етапі завантаження пояса залишалося статично незмінним.

На першому кроці розрахунку моделі вузла всі вільні кінці елементів жорстко закріплено, за винятком їхнього переміщення в напрямку дії завантаження пояса. На другому етапі вільне переміщення розкосів відповідно змінюється на паралельне напрямку прикладених до них завантажень. Такі обмеження моделі дозволяють уникнути утворення вторинних моментів.

Додатково в розрахункових моделях вузлів враховано низку важливих деталей. Зокрема, взаємодія сталі та бетону моделюється фрикційним контактом із коефіцієнтом тертя  $\mu = 0,2$ . Для забезпечення точності аналізу результатів попередньо підготовлено та рівномірно розподілено 13 точок уздовж кромок зварних швів (рис. 6). Крім того, розрахункова характеризується наявністю модель однієї вертикальної площини симетрії, що дозволило обчислення скороченням спростити часу розрахунків. Кінцеву розрахункову модель із розбиттям на скінченні елементи показано на рис. 7. Загальна кількість скінчених елементів у кожній моделі вузла налаштована з метою забезпечення однаковості точності та результатів і складає в межах 4 6476÷4 6517 шт.



Рис. 6. Положення точок на зварному шві для аналізу результатів

Fig. 6. Position points on the weld to analyze the results



Рис. 7. Модель бетононаповненого зразка та її розбиття на скінчені елементи

Fig. 7. Model of a concrete-filled specimen and its breakdown into finite elements

### Результати

Результати розрахунків для порожнистих зразків вузлів показують, що форма деформування узгоджується з результатами лабораторного експерименту [16] (рис. 8). Через жорсткіші умови закріплення моделей

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/324909

і використання інших матеріалів, відмінних від зазначених у [16], концентрація напружень змістилася в контур зварного шва, розташованого на поясі, а не на розкосі. Цей випадок можна розглядати як один із можливих варіантів руйнування вузла. Загальну форму деформування зразків вузла на першому та другому етапах показано на рис. 9.

діаграм залежності навантаження-Iз деформування стиснених розкосів (рис. 10) спостерігаємо суттєвий вплив бетонного заповнення на їхню роботу. Для розтягнутих зафіксовано розкосів також збільшення жорсткості елементів, але воно є менш суттєвим, що відповідає багатьом проведеним дослідженням. У табл. 5 наведено точні значення граничних навантажень на межі плинності, де ця межа першочергово настає якраз у зоні з'єднання розкосів із поясом.

У моменти досягнення межі плинності сталі головні напруження в бетоні не перевищують

межу його міцності на двовісний стиск та одновісний розтяг у жодному зразку вузла (табл. 5). Розподіл напружень у бетоні залишається однаковим для кожного зразка, що проілюстровано на одному із зразків (рис. 11).

Перш ніж обговорювати вплив сталі або розміру вузла на результати, необхідно оцінити найбільш впливову змінну в межах однієї групи зразків - силу впливу бетону, визначену на основі даних із табл. 5, результати яких наведено в табл. 6. Порівняння порожнистих зразків iз заповненими бетоном C16/20 демонструє суттєве зростання несної здатності для стиснутих і розтягнутих розкосів. Водночас порівнянно бетононаповнених зразків між собою показує, що вплив бетону С50/60 на та розтягнуті розкоси суттєво стиснуті відрізняється: якщо для розтягнутих розкосів ефект не перевищує 5,2 %, то для стиснутого розкосу в деяких зразках він сягає 20,8 %.

a - a







Рис. 8. Режим руйнування розкосів у порожнистих вузлах: *a* – за дослідженням Веньцзінь Хуана та ін. [16]; *б* – зразка D40–16Д у масштабі 1:1

Fig. 8. Failure mode of braces in hollow nodes: a – according to the study of Wenjin Huang et al. [16]; b – sample D40–16D in a scale of 1:1

#### ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО



Рис. 9. Сумарні деформації вузла D40–16Д–C20 у масштабі 1:1: *а* – на першому етапі навантаження; б – наприкінці другого етапу навантаження

Fig. 9. Total deformations of the D40–16D–C20 assembly on a 1:1 scale: a - at the first stage of loading; b - at the end of the second stage of loading



Рис. 10. Осьова деформація розкосів у деяких групах зразків

Fig. 10. Axial deformation of braces in some groups of samples

Порівняння бетононаповнених зразків D40– 16D–C60 і D40–16D–C20 показує зменшення несної здатності розкосів у першому, що свідчить про зниження ефективності використання бетону С50/60 порівнянно з класом С16/20.

Вплив марки сталі або розміру вузла на ефективність використання певного класу

бетону відображає ефективність відповідної складової, яку наведено в табл.7. Ключові відмінності такі:

– У разі збільшення розміру вузла зі сталі 16Д ефективність використання бетону класу С16/20 для розтягнутого розкосу зменшується на 6,6 %. Натомість для сталі 10ХСНД суттєвих змін не зафіксовано – приріст становить лише 0,1 %. Для стиснутих розкосів збільшення розміру вузла забезпечує приріст ефективності на 12 % незалежно від марки сталі.

– Ефективність використання бетону класу C50/60 порівняно з C16/20 в разі збільшення розміру вузла зі сталі марки 16Д зростає до 7 % для обох різнонавантажених розкосів. У той же час для вузлів зі сталі марки 10ХСНД суттєвого приросту ефективності в розтягнутому розкосі не спостерігається (0,8 %), а в стиснутих вона зменшується на 3,7 %.

– Ефективність використання бетону С16/20 у разі збільшення класу міцності сталі у вузлах розмірів D40 та D120 забезпечує приріст ефективності в межах 8,0–8,6 %. Винятком є розтягнутий розкіс у вузлі розміром D40, де ефективність використання становить лише 1,3 %.

– У випадку збільшення класу сталі вузла розміром D40 ефективність використання бетону класу C50/60 порівняно з C16/20 для розтягнутого розкосу становить 6,7 %, тоді як для вузла розміром D120 будь-які зміни майже відсутні (приріст 0,6 %). Для стиснутих розкосів ефективність сталі 10ХСНД із розміром вузла D40 зросла на 22,8 %, однак у вузлі розміром D120 ефект знизився до 10,8 %.

Оцінку напружено-деформованого стану сталевої складової вузла виконано відповідно до рекомендацій ДБН В.1.2-14:2018 [1], у яких для ізотропних матеріалів у разі плоского або просторового напруженоно стану запропоновано використовувати напруження за Мізеса. Подальший критерієм аналіз еквівалентних напружень виконано з урахуванням знаків.

Таблиця 5

Значення осьового навантаження на розкоси в разі досягнення межі плинності сталі у вузлі

Table 5

		8 2	8	v
Код зразка	Осьове навантаження на розтягнутий розкіс на межі <i>R</i> <sub>y</sub> [кН]	Осьове навантаження на стиснутий розкіс на межі <i>R</i> <sub>y</sub> [кН]	Мінімальні головні напруження в бетоні за <i>R</i> <sub>у</sub> в розтянутих розкосах [МПа]	Максимальні головні напруження в бетоні за <i>R<sub>y</sub></i> у стиснутих розкосах [МПа]
D40-16D-C20	444,3	366,7	$13,7 < f_{ck,c} = 23$	$1,21 < f_{ctk,0.95} = 2,50$
D40-16D-C60	434,7	360,9	$26,3 < f_{ck,c} = 69$	$1,91 f_{ctk,0.95} = 5,30$
D40–16D	352,3	335,2	-	-
D40-10HSND-C20	748,8	643,4	22,1< <i>f</i> <sub>ck,c</sub> =23	$1,21 < f_{ctk,0.95} = 2,50$
D40-10HSND-C60	781,7	777,4	$34,2 < f_{ck,c} = 69$	$1,94 < f_{ctk,0.95} = 5,30$
D40–10HSND	585,9	543,3	-	-
D120-16D-C20	3 510,6	3 561,2	13,4< <i>f</i> <sub>ck,c</sub> =23	$1,03 < f_{ctk,0.95} = 2,50$
D120-16D-C60	3 673,1	3 743,2	$27,2 f_{ck,c} = 69$	$3,45 < f_{ctk,0.95} = 5,30$
D120–16D	2 980,6	2 898,7	-	-
D120-10HSND-C20	6 015,0	6 143,9	19,7< <i>f</i> <sub>ck,c</sub> =23	$0,95 < f_{ctk,0.95} = 2,50$
D120-10HSND-C60	6 328,3	7 152,4	33,3< <i>f</i> <sub>ck,c</sub> =69	$3,18 < f_{ctk,0.95} = 5,30$
D120-10HSND	4 700,8	4 631,5	-	-

## Таблиця 6

## Ефективність впливу класу бетону на роботу розкосів

Table 6

# Effectiveness of the concrete class influence on the operation of struts

Код зразка	Розтягнутий розкіс [%]	Стиснутий розкіс [%]			
Порівняння порожнистих зразків із бетононаповненими в межах окремої групи					
D40-16D-C20 / D40-16D	26,1	9,40			
D40-10HSND-C20 / D40-10HSND	27,8	18,4			
D120-16D-C20 / D120-16D	17,8	22,9			
D120-10HSND-C20 / D120-10HSND	28,0	32,7			
Порівняння бетононаповнених	зразків у межах окремої груг	ІИ			
D40-16D-C60 / D40-16D-C20	-2,2	-1,6			
D40-10HSND-C60 / D40-10HSND-C20	4,4	20,8			
D120-16D-C60 / D120-16D-C20	4,6	5,1			
D120-10HSND-C60 / D120-10HSND-C20	5,2	16,4			

Таблиця 7

## Вплив розміру вузла та марки сталі на роботу розкосів

Table 7

Стиснутий

# Effect of assembly size and steel grade on brace performance Назва Розтягнутий розкіс [%] ь розміру вузла D120 відносно D40 16Д -6,6

114304		розкіс [%]	розкіс [%]
Ефективність розміру вузла D120 відносно D40	16Д	-6,6	12,3
на основі порівняння порожнистого зразка із заповненим бетоном C16/20 зі сталі:	10ХСНД	0,1	12,0
Ефективність розміру вузла D120 відносно D40 на основі	ві 16Д	6,9	6,8
орівняння зразків, заповнених бетоном С16/20 та С50/60, зі сталі:	10ХСНД	0,8	-3,7
Ефективність марки сталі 10ХСНД відносно 16Д	D40	1,3	8,2
на основі порівняння порожнистого зразка із заповненим бетоном С16/20, діаметром:	D120	8,6	8,0
Ефективність марки сталі 10ХСНД відносно 16Д	D40	6,7	22,8
на основі порівняння зразків, заповнених бетоном С16/20 та С50/60, діаметром:	D120	0,6	10,8



Рис. 11. Розподіл напружень у бетоні в бетононаповнених зразках

Fig. 11. Stress distribution in concrete in concretefilled specimens

На графіках рис. 12, побудованих за відміченими точками на рис. 6, показано міру наближення отриманих напружень до межі плинності, що дає більш чітку картину для аналізу. Розглядаючи всі порожнисті зразки (рис. 12, *a*), бачимо, що наближення до граничних значень у розтягнутих і стиснутих розкосах відбувається в межах 8-10 точок кромки зварного шва на поясі. Якщо у верхніх зварного шва наближення кромках ЛО максимальної точки напруження зростають лінійно, то для кромок на поясі тренд графіка має більш випуклу форму.

Графіки бетононаповнених вузлів (рис. 12, б, в), показують, що наявність бетону сприяє більш рівномірному розподілу напружень, що виникають як по верхніх, так і по нижніх контурах зварного шва, але тільки розтягнутих розкосів. Для стиснутих ДЛЯ розкосів тенденція не змінилася, але, як вище, несна здатність зазначено була Хоча тенденція збільшена. кривих між бетонами С16/20 та С50/60 збігається, форма кривих має деякі відмінності. Вплив на форму розподілу напружень спостерігається лише від зміни розміру вузла, тоді як вплив бетону або сталі є мінімальним. Також на графіках бетононаповнених вузлів пік напружень у наближених зонах особливо не змінився, хоча в кромках на стиснутих та розтягнутих розкосах мінімальні напруження розподілилися більш рівномірно.

# Наукова новизна та практична значимість

У роботі проведено комплексний аналіз впливу матеріалів та геометричних параметрів вузлів із бетонними поясами на роботу порожнистих розкосів. Особливу увагу приділено малодослідженому фактору розміру вузла, пропорційна зміна якого впливає на нелінійну зміну площі перерізу бетонного ядра в поясі.

Ha проведеного скінченнооснові елементного нелінійного аналізу. iз застосуванням нормативної бази України та імплементованих європейських станлартів. установлено закономірності, які дозволяють оптимально підбирати класи бетону та сталі Це забезпечує вузлів. ефективне для функціонування конструкцій залежно від типу навантаження та умов експлуатації, а також сприяє зниженню витрат на матеріали. Результати дослідження є важливими для створення сучасних будівельних конструкцій, підвищення їх надійності, ефективності та економічності.

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/324909

#### ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО





a) у пустотілих зразках; б) у зразках заповнених бетоном C20; в) у зразках заповнених бетоном C60

Fig. 12. Stress distribution in the weld edges:

a) in hollow specimens; b) in specimens filled with C20 concrete; c) in specimens filled with C60 concrete

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/324909

© Д. С. Співак, С. В. Ключник, 2025

### Висновки

комплексну Проведено оцінку впливу матеріалів, які застосовують у мостобудуванні, на роботу круглих трубчастих вузлів із бетононаповненим поясом решітки, а також проаналізовано вплив розмірів цих вузлів. Розглянуто два класи міцності бетону (С16/20 та С50/60) і дві марки сталі (16Д та 10ХСНД), що дозволило оцінити поведінку матеріалів у крайніх умовах експлуатації. Для бетону було застосовано модель пластичності Друкера-Прагера, яка враховує пошкодження матеріалу та його нелінійну поведінку, тоді як нелінійну поведінку сталі змодельовано за допомогою інструменту багатолінійного ізотропного зміцнення.

Основний акцент зроблено на чисельному моделюванні К-подібних вузлів, характерних для аркових і фермових мостів. Розроблено 12 варіантів моделей вузлів i3 різними параметрами діаметра, класу бетону та марки сталі. Завантаження вузлів здійснено у два етапи: спочатку проведено початкове навантаження пояса, а потім – подальше навантаження розкосів до їхньої повної вілмови.

Дослідження підтвердило значний вплив бетонного заповнення на несну здатність К-подібних вузлів. Зокрема, з'ясовано, що заповнення поясу бетоном класу C16/20 суттєво підвищило жорсткість стиснутих розкосів (до 32,7 %), тоді як для розтягнутих розкосів цей ефект є менш вираженим (до 28 %). Водночас використання високоміцного бетону класу C50/60 не завжди є доцільним, оскільки в деяких випадках його ефективність виявляється нижчою порівняно з бетоном класу C16/20. Детальний аналіз напружено– деформованого стану зварних швів показав, що бетон сприяє більш рівномірному розподілу напружень у з'єднанні, однак розташування та розгладжування пікових значень у розтягнутих розкосах не відбувається.

ефективності Залежність використання бетону від розміру вузла та марки сталі була також чітко виражена. Зі збільшенням розміру вузла ефективність бетону для розтягнутих розкосів у разі використання сталі марки 16Д коливається в межах від -6,6 до 6,9 %, тоді як для сталі марки 10ХСНД зміни та коливання практично не спостерігаються. Загалом марка має подібний вплив на розподіл сталі напружень, як і зміни розміру, але в цьому випадку для міцнішої марки 10ХСНД не спостерігається зниження ефективності порівняно з маркою 16Д.

Отримані в цьому дослідженні результати дозволяють оптимізувати проєктування сталевих вузлів, підвищують їхню надійність, довговічність та економічну ефективність. Зокрема, важливим фактором є не лише вибір марки сталі, але й розмір вузла, оскільки зі розмірів зміною його непропорційно поперечного змінюється площа перерізу бетону.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1. 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, 2022. 34 с.
- 2. *ДБН В.2.3–14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування* [Чинний від 2007–02–01]. Київ, 2007. 218 с.
- 3. ДБН В.2.6–198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі Зміною № 1 [Чинний від 2022–09– 01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2022. 298 с.
- 4. ДБН В.2.6–98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Зі Зміною № 1 [Чинний від 2020–06–01]. Київ, 2020. 73 с.
- 5. ДСТУ 8817:2018. Прокат конструкційний з нелегованої та легованої сталі для мостобудування. Технічні умови [Чинний від 2019–01–01]. Київ, 2019. 9 с.
- 6. ДСТУ EN 10219–2:2009. Профілі порожнисті зварні холодного формування з нелегованих і дрібнозернистих сталей для конструкцій. Частина 2. Розміри, граничні відхили та характеристики [Чинний від 2011–07–01]. Київ, 2011. 34 с.

- 7. ДСТУ–Н Б EN 1993–4–3:2012. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 4–3. Трубопроводи (EN 1993–4–3:2007, IDT) [Чинний від 2013–07–01]. Київ, 2007. 77 с.
- ДСТУ-Н Б ЕN 1994–2:2012. Єврокод 4. Проектування сталезалізобетонних конструкцій. Частина 2. Загальні правила і правила для мостів (EN 1994–2:2005, IDT). Проект [Чинний від 2013–07–01]. Київ, 2005. 131 с.
- 9. Коломійчук Г. П., Майстренко О. Ф., Коломійчук В. Г., Коломійчук В. Г. Конструктивні рішення сучасних великопролітних трубобетонних аркових мостів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2020. № 13. С. 42–48. DOI: https://doi.org/10.36910/6775–2410–6208–2020–3(13)–05
- 10. Коростильов Л. І., Лугінін О. Є., Спіхтаренко В. В., Терлич С. В. *Опір матеріалів*: навчальний посібник. Миколаїв : Видавництво НУК, 2017. 300 с.
- 11. Співак Д. С., Ключник С. В. Критичний аналіз розвитку конструкції решітчастих трубобетонних мостів з їздою зверху. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 1 (105). С. 105–112. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2024/301524
- Aswathi Dev. K. K., Preetha Prabhakaran, Neethu S. Analytical Study on Fatigue Behaviour of Steel Truss Girder Joints. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. 2015. Vol. 2. Iss. 10. P. 574–578.
- Chen B.-C., Wang T.-L. Overview of Concrete Filled Steel Tube Arch Bridges in China. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2009. Vol. 14. Iss. 2. P. 70–80. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084–0680(2009)14:2(70)
- 14. Ferrotto M. F., Fenu L., Xue J.–Q., Briseghella B., Chen B.–C., Cavaleri L. Simplified equivalent finite element modelling of concrete–filled steel tubular K–joints with and without studs. *Engineering Structures*. 2022. Vol. 266. P. 114634. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114634
- Huang W., Fenu L., Chen B., Briseghella B. Experimental study on joint resistance and failure modes of concrete filled steel tubular (CFST) truss girders. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018. Vol. 141. P. 241–250. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.10.020
- Huang W., Fenu L., Chen B., Briseghella B. Experimental study on K-joints of concrete-filled steel tubular truss structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. Vol. 107. P. 182–193. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.01.023
- Joseph J. R., Henderson J. H. Concrete–filled steel tube truss girders—a state–of–the–art review. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2023. Vol. 70, No. 49. P. 1–15. DOI: https://doi.org/10.1186/s44147–023–00220–w
- Structures with Prof. H. Concrete Microplane Model FEA using ANSYS Lesson 10. YouTube. 2021. URL: https://www.youtube.com/watch?v=JXbZnhGZliY
- Tian Z., Liu Y., Jiang L., Zhu W., MaY. A review on application of composite truss bridges composed of hollow structural section members. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2019. Vol. 6. Iss. 1. P. 94–108. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.001
- Wu Y., Wang X., Fan Y., Shi J., Luo C., Wang, X. A Study on the Ultimate Span of a Concrete–Filled Steel Tube Arch Bridge. *Buildings*. 2024. Vol. 14. Iss. 4. P. 1–21. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings14040896

## D. S. SPIVAK<sup>1\*</sup>, S. V. KLIUCHNYK<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 200 07 64, e-mail d.s.spivak@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8155-7497
 <sup>2</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 667 40 49, e-mail s.v.kliuchnyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-7771-8377

# **Influence of Materials and Scale Factor on Failure of K-shaped Nodes of Pipe Concrete Bridges: Effectiveness of Design Parameters**

**Purpose**. The paper aims to analyze the stress-strain state of K-shaped nodes of pipe-concrete structures using finite element modeling with consideration of nonlinear characteristics of materials, which, in turn, requires an assessment of the influence of materials and node sizes on the operation of hollow braces in lattice bridge structures. **Methodology.** Numerical modeling of the stress-strain state of K-shaped nodes of pipe concrete belts in the ANSYS program was performed. Two classes of concrete (C16/20 and C50/60) and two steel grades (16D and 10HSND)

ISSN 2307-3489 (Print), ISSN 2307-6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту, 2025, № 1 (109)

#### ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

were used for the analysis, which were modeled using the Drucker-Prager plasticity criterion for concrete and the multilinear isotropic strengthening tool for steel. We prepared 12 variants of the node models with different material characteristics and two dimensional scales. To approximate the real state, the assemblies were loaded in two stages: first, the belt was loaded, and then the braces were loaded until they failed. Findings. The calculations showed that the deformation of hollow specimens of nodes corresponds to the laboratory experiments of other authors. The effect of concrete filling on compressed and tensile braces was significant, especially for compressed braces, where the effect reached 20.8%. C50/60 concrete does not always improve performance, sometimes being inferior to C16/20 concrete. Increasing the node size has a positive effect on concrete efficiency, particularly for compressed struts, where the increase was up to 12.3%. Increasing the strength of steel from 16D to 10KhSND for tensile braces showed an efficiency of 0 to 8.6%, and for compressed braces - up to 22.8%. Stress plots along the weld showed that concrete helps to distribute stresses evenly in both compressed and tensile braces. Originality. The paper analyzes the influence of materials and geometry of steel assemblies partially filled with concrete on the performance of hollow braces, with special attention paid to the little-studied factor of the assembly size. Practical value. Thanks to the finite element nonlinear analysis and the application of Ukrainian regulations and European standards, the principles of optimal selection of concrete and steel classes for pipe concrete K-shaped assemblies have been established. This makes it possible to ensure the reliability of modern bridge lattice structures, increase their efficiency and cost-effectiveness.

*Keywords:* tubular concrete; lattice structures; bridge trusses; K-shaped assemblies; finite element method; nonlinear modeling; failure mode

### REFERENCES

- Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh obiektiv. Zahalni pryn–tsypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud. Zi Zminoiu No 1, 34 DBN V.1.2–14:2018. (2022). (in Ukrainian)
- 2. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravyla proektuvannia, 218 DBN V.2.3-14:2006. (2007). (in Ukrainian)
- 3. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia. Zi Zminoiu No 1, 298 DBN V.2.6–198:2014. (2022). (in Ukrainian)
- 4. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia. Zi Zminoiu No 1, 73 DBN V.2.6–98:2009. (2020). (in Ukrainian)
- 5. Prokat konstruktsiinyi z nelehovanoi ta lehovanoi stali dlia mostobuduvannia. Tekhnichni umovy, 9 DSTU 8817:2018. (2019). (in Ukrainian)
- 6. Profili porozhnysti zvarni kholodnoho formuvannia z nelehovanykh i dribnozernystykh stalei dlia konstruktsii. Chastyna 2. Rozmiry, hranychni vidkhyly ta kharakterystyky, 34 DSTU EN 10219–2:2009. (2009). (in Ukrainian)
- 7. Yevrokod 3. Proektuvannia stalevykh konstruktsii. Chastyna 4–3. Truboprovody (EN 1993–4–3:2007, IDT), 77 DSTU–N B EN 1993–4–3:2012. (2012). (in Ukrainian)
- 8. Yevrokod 4. Proektuvannia stalezalizobetonnykh konstruktsii. Chastyna 2. Zahalni pravyla i pravyla dlia mostiv (EN 1994–2:2005, IDT). Proekt, 131 DSTU–N B EN 1994–2:2012. (2012). (in Ukrainian)
- Kolomiychuk, G. P., Maistrenko, O. F., Kolomiychuk, V. G., & Kolomiychuk, V. G. (2020). Construction solutions of modern large–span tube–concrete arch bridges. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, *13*, 42-48. DOI: https://doi.org/10.36910/6775–2410–6208–2020–3(13)–05 (in Ukrainian)
- 10. Korostylov, L. I., Luhinin, O. Ye., Spikhtarenko, V. V., & Terlych, S. V. (2017). *Opir materialiv*: navchalnyi posibnyk. Mykolaiv : Vydavnytstvo NUK. (in Ukrainian)
- 11. Spivak, D. S., & Kliuchnyk, S. V. (2024). Critical Analysis of the Development of the Design of Lattice Tube Concrete Bridges with a Ride on Top. *Science and Transport Progress*, 1(105), 105-112. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2024/301524 (in Ukrainian)
- Aswathi Dev. K. K., Preetha Prabhakaran, & Neethu. S. (2015). Analytical Study on Fatigue Behaviour of Steel Truss Girder Joints. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2(10), 574-578. (in English)
- Chen, B.-C., & Wang, T.-L. (2009). Overview of Concrete Filled Steel Tube Arch Bridges in China. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 14(2), 70-80. DOI: https://doi.org/10.1061/(asce)1084–0680(2009)14:2(70) (in English)

- 14. Ferrotto, M. F., Fenu, L., Xue, J.–Q., Briseghella, B., Chen, B.–C., & Cavaleri, L. (2022). Simplified equivalent finite element modelling of concrete–filled steel tubular K–joints with and without studs. *Engineering Structures*, 266, 114634. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114634 (in English)
- 15. Huang, W., Fenu, L., Chen, B., & Briseghella, B. (2018). Experimental study on joint resistance and failure modes of concrete filled steel tubular (CFST) truss girders. *Journal of Constructional Steel Research*, 141, 241-250. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.10.020 (in English)
- 16. Huang, W., Fenu, L., Chen, B., & Briseghella, B. (2015). Experimental study on K-joints of concrete-filled steel tubular truss structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 107, 182-193. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.01.023 (in English)
- 17. Joseph, J. R., & Henderson, J. H. (2023). Concrete-filled steel tube truss girders—a state-of-the-art review. *Journal of Engineering and Applied Science*, 70(49), 1-15.
- DOI: https://doi.org/10.1186/s44147-023-00220-w (in English)
- 18. Structures with Prof. H. (2021). Concrete Microplane Model FEA using ANSYS Lesson 10. *YouTube*. Retrieved from https://www.youtube.com/watch?v=JXbZnhGZliY (in English)
- Tian, Z., Liu, Y., Jiang, L., Zhu, W., & Ma, Y. (2019). A review on application of composite truss bridges composed of hollow structural section members. *Journal of Traffic and Transportation Engineering* (*English Edition*), 6(1), 94-108. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.001 (in English)
- 20. Wu, Y., Wang, X., Fan, Y., Shi, J., Luo, C., & Wang, X. (2024). A Study on the Ultimate Span of a Concrete– Filled Steel Tube Arch Bridge. *Buildings*, 14(4), 1-21. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings14040896 (in English)

Надійшла до редколегії: 11.11.2024 Прийнята до друку: 19.03.2025