

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.072.32-023.11/-27.236:517.96

В. М. БЕЗСАЛИЙ¹, Д. О. БАННІКОВ^{2*}

¹ Факультет «Промислове та цивільне будівництво», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 764 68 95, ел. пошта bezsalyslava@gmail.com, ORCID 0000-0003-4424-0105

^{2*} Кафедра «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

ЕФЕКТИВНІСТЬ СТАЛЕВИХ ТОНКОСТІННИХ ОЦИНКОВАНИХ ПРОФІЛІВ ДЛЯ АРКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Мета. Виконати інженерну оцінку ефективності застосування сталевих тонкостінних оцинкованих профілів на прикладі інженерної конструкції у вигляді арки. Сформулювати рекомендації щодо доцільності використання таких профілів порівняно з іншими більш традиційними видами сортаментних профілів. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проведено серію чисельних розрахунків аркової конструкції, виконаної із трьох типів сталевих сортаментних профілів – безшовних гарячедеформованих труб, електрозварних прямошовних труб і тонкостінних оцинкованих профілів. При цьому варіювались прольоти аркової конструкції в діапазоні від 12 до 24 м і крок її розташування в діапазоні від 3 до 6 м. Також окремо розглядалась дія снігових та вітрових навантажень відповідно до чинного стандарту України. Обчислення проводились методом скінчених елементів на базі проектного комплексу Lira for Windows. **Результати.** По результатах аналізу та співставлення отриманих даних чисельних розрахунків встановлено, що найменш кошторисним є застосування сталевих оцинкованих профілів, конструкції з яких по всіх розглянутих варіантах мають найнижчу вартість. Сталеві арки на основі електрозварних прямошовних труб виявляються приблизно на 50...80 % дорожчими, а арки на основі безшовних гарячедеформованих труб – в середньому втричі дорожчими. При цьому до уваги приймалась як усереднена ринкова вартість профілів, так і вартість виготовлення з них аркової конструкції. **Наукова новизна.** Визначено найбільш ефективний тип сталевих сортаментних профілів для використання в аркових спорудах, що є несучими елементами каркасів легких швидкокомонтованих будівель. Зокрема доведено високу ефективність сучасних тонкостінних оцинкованих профілів для даного типу конструкцій. **Практична значимість.** В ході досліджень отримано інженерні дані щодо конкретних типів тонкостінних оцинкованих профілів, які необхідно застосовувати для несучих аркових елементів швидкокомонтованих будівель. Дані представлені в зручній для користування в інженерній практиці табличній формі в залежності від природно-кліматичних навантажень, прольотів та кроків несучих елементів каркасу таких будівель.

Ключові слова: аркова конструкція; тонкостінний оцинкований профіль; труба; метод скінчених елементів; комплекс Lira for Windows

Вступ

Останнім часом в Україні все більшої популярності набуває створення інженерних споруд різноманітного призначення на основі сталевих тонкостінних оцинкованих профілів. Вони виготовляються на спеціальному обладнанні шляхом гнуття в холодному стані сталевих листів з подальшим покриттям захисним антикорозійним шаром. Оскільки подібне обладнання практично відсутнє в Україні, то сортамент таких профілів на вітчизняному ринку металопрокату представлений в основному іноземними виробниками, як наприклад, компанія «Пру-

шинські» (<http://www.pruszynski.com.ua>). Серед українських виробників слід відмітити компанію «Альбатрос» (<http://albatros.ua>), засновану в 1996 р., і компанію «STEELCO» (<http://steelco.com.ua>), засновану у 2004 р.

За своєю структурою сортамент сталевих тонкостінних оцинкованих профілів включає наступні різновиди – С-профіль, U-профіль, Z-профіль та Σ -профіль, які вже фактично стали стандартизованими. Позначення цих профілів доволі точно описує їх зовнішню конфігурацію, а товщина не перевищує 3 мм.

Найбільш розповсюдженим на тепер є С-профіль, який для підвищення несучої здатнос-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ті перерізу нерідко застосовується у вигляді подвійних елементів, з'єднаних між собою саморізами або болтами (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд вузла металоконструкції, виконаної з С-подібних сталевих тонкостінних оцинкованих профілів

Останнім часом у виробництво запущений також і вдосконалений різновид таких профілів із підвищеними теплоізоляційними властивос-

тями – термопрофіль, який має спеціальні насічки на поверхні.

Подібні тонкостінні профілі за даними виробників є високоефективними як для різноманітних об'єктів цивільного призначення, так і сільськогосподарського і навіть, промислового призначення. Проте специфіка тонкостінних профілів потребує пошук і використання новітніх, не зовсім традиційних конструктивних рішень для доволі традиційних інженерних споруд. Для сталевих інженерних конструкцій, особливо виконаних в сучасному дизайні, одним із таких рішень є застосування в якості несучого конструктивного елементу арки.

Однією з таких інженерних конструкцій є склади, які стали доволі популярним об'єктом будівництва в останні роки саме на хвилі розповсюдження сталевих тонкостінних оцинкованих профілів (рис. 2). Їх нерідко використовують в якості тимчасових перевантажувальних комплексів на різноманітних автотранспортних і залізничних вузлах.

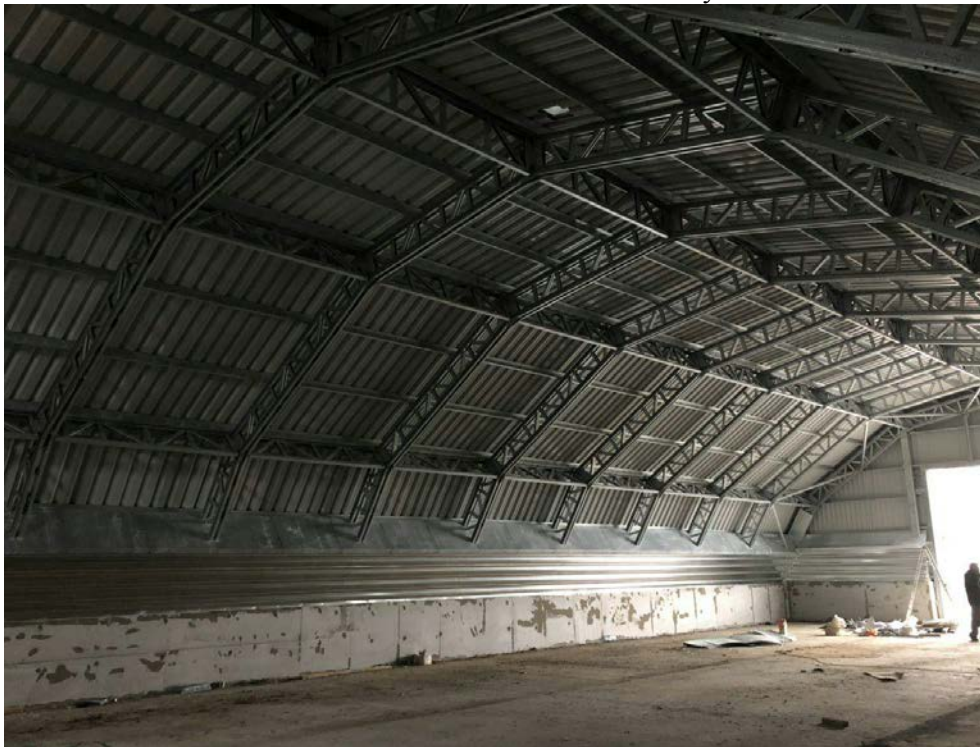


Рис. 2. Загальний вигляд складської споруди, виконаної на основі сталевих тонкостінних оцинкованих профілів

Робота сталевих тонкостінних профілів в цілому є доволі складною та відрізняється, в першу чергу, питаннями, пов'язаними з оцінкою втрати стійкості (Марченко, & Банников, 2009а,

2009б, 2011). В чинних нормативних документах з проектування сталевих конструкцій (ДБН В.2.6-198:2014) цьому аспекту приділяються відносно небагато уваги. При цьому в основу

покладено підхід, який допускає подальшу роботу тонкостінних профілів за межею границі текучості після втрати місцевої стійкості певними частинами профілів. Досить детально такий підхід був проаналізований та узагальнений в монографії (Перельмутер, & Сливкер, 2007), а також розглянутий в нещодавно виданій монографії (Баженов, Перельмутер, Ворона, & Отрашевська, 2018). Тому можна стверджувати, що в цілому у вітчизняній науково-дослідній практиці накопичений значний обсяг теоретичних розробок в цьому напрямку.

Щодо сучасного закордонного досвіду, то він не є настільки ґрунтовним і представлений в першу чергу дослідженнями роботи замкнених тонкостінних профілів (He, Chen, & Wan, 2018). Інша частина досліджень охоплює питання пошуку більш ефективних захисних поверхонь для тонкостінних профілів (Gronostajski, Kaczyński, Polak, & Bartczak, 2018). Також певна кількість досліджень підіймає питання монтажу та виготовлення конструкцій з тонкостінних профілів (Piekarczuk, Więch, & Cybulski, 2019).

Проте на тепер практична апробація накопиченого теоретичного матеріалу щодо роботи сталевих тонкостінних профілів при різних видах навантажень значно обмежена. При цьому критичний аналіз та особливо наукові дослідження для конкретних інженерних випадків майже відсутні. Тому дана публікація має на меті почати заповнювати цей пробіл.

Мета

Виконати інженерну оцінку ефективності застосування сталевих тонкостінних оцинкованих профілів на прикладі інженерної конструкції у вигляді арки. Сформулювати рекомендації щодо доцільності використання таких профілів порівняно з іншими більш традиційними видами сортаментних профілів.

Методика

В якості інженерної конструкції, для якої проводились дослідження були обрані сталеві двохшарнірні арки циркульного абрису, які є несучими елементами транспортних складських споруд. При цьому аналізувались наступні конструктивні варіації основних параметрів

арок, які найчастіше використовуються для сучасних складів:

- проліт арок 12 м, 15 м, 18 м, 20 м і 24 м;
- крок арок 3 м, 4 м, 5 м і 6 м.

В якості розглядуваних сортаментних профілів в ході досліджень співставлялись наступні сталеві профілі:

- гарячекатані круглі труби відповідно до сортаменту (ГОСТ 8732-78*);
- зварні круглі труби відповідно до сортаменту (ГОСТ 10704-91);
- тонкостінні оцинковані С-подібні профілі відповідно до сортаменту (ТУ У В.2.6-24.3-37452010-002:2014).

Навантаження в ході досліджень визначались відповідно до чинного нормативного документу (ДБН В.1.2-2:2006). При цьому до уваги приймалась окрім власної ваги аркових споруд та власної ваги елементів покрівлі дія двох природно-кліматичних навантажень – вітрового та снігового. Розглядались окремо випадки розташування складської споруди в сніговому та вітровому районах із найвищими значеннями.

В якості методу досліджень застосовувався один із сучасних чисельних методів будівельної механіки – метод скінчених елементів, який в теперішній час продовжує вдосконалюватись і набуває все нових можливостей (Zhang, Ge, Zhang, & Zhao, 2018). Його практична реалізація відбувалась на базі вітчизняного проектного комплексу Lira for Windows (Стрелец-Стрелецкий, Журавлев, & Водопьянов, 2019). Такий вибір був зроблений виходячи із будівельної орієнтації цього комплексу, на відміну від інших розробок, таких як SolidWorks, CosmosWork, Nastran або WinMachine, які мають машинобудівну орієнтацію (Neduzha, & Shvets, 2016).

Побудовані скінченно-елементні моделі для досліджень являли собою плоскі стержневі системи – рис. 3. Для гарячекатаних профілів арковий елемент являв собою дугу кола. Для тонкостінних оцинкованих профілів арковий елемент виконувався у вигляді плоскої ферми з перерізами з подвійних С-подібних профілів. Абрис такої ферми приймався з окремих прямолінійних ділянок (сегментів), вписаних в дугу кола. Кількість ділянок залежала від прольоту споруди. Закріплення аркових елементів моделювались таким чином, щоб отримати двохшарнірну схему їх роботи.

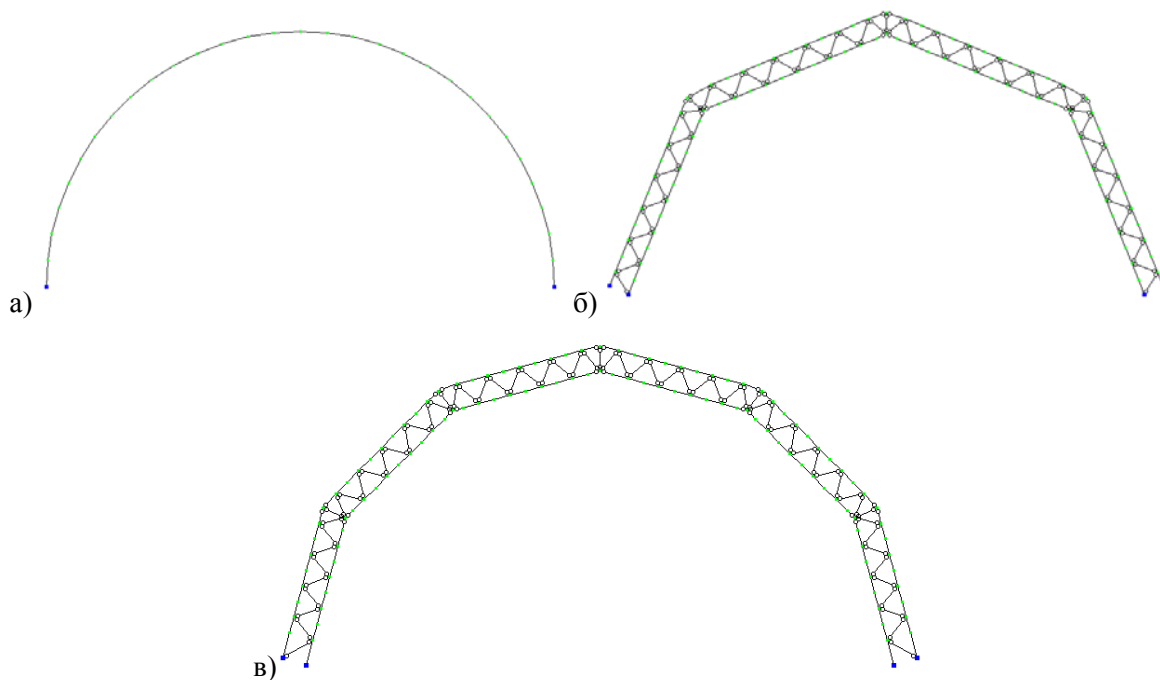


Рис. 3. Скінченно-елементні моделі несучої арки:
а – з гарячекатаних і зварних труб; б – з тонкостінних профілів (4-ох сегментна);
в – з тонкостінних профілів (6-ти сегментна)

Результати

Окремим питанням під час підбору перерізів тонкостінних профілів була необхідність врахування редукованої площі їх поперечного перерізу. Для цього виконувались додаткові розрахунки відповідно до вимог чинних вітчизняних норм (ДБН В.2.6-198:2014), а також затвердженого національного варіанту європейських норм (ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012).

Попередньо розглядався тонкостінний С-подібний профіль (рис. 4) із наступними геометричними характеристиками: $H = 200$ мм, $b = 65$ мм, $c = 25$ мм, $t = 2$ мм, $r = 3$ мм, площа $A = 7,28$ см².

Отримані значення редукованої площі дорівнюють:

- за ДБН В.2.6-198:2014 $A_{red} = 4,29$ см²;
- за ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012 $A_{red} = 4,59$ см².

При цьому ефективність застосування такого профілю становитиме:

- за ДБН В.2.6-198:2014 – 58,9 %;
- за ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012 – 63,0 %.

З наведених даних видно, що відповідно до вимог чинних вітчизняних норм (ДБН В.2.6-

198:2014) редукована площа виявляється нижчою. Розраховані значення таких площ разом із відсотком їх ефективності застосування представлені в табл. 1. Дані наведені для найбільш широковживаних профілів відповідно до сортаменту (ТУ У В.2.6-24.3-37452010-002:2014).

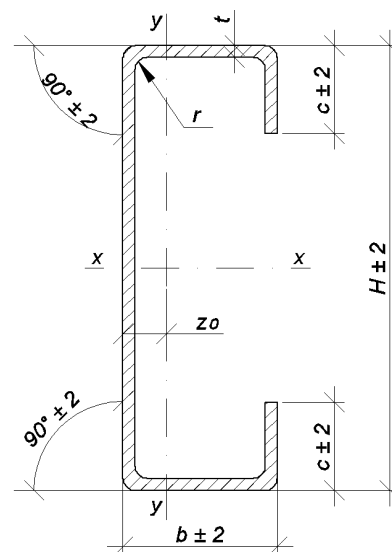


Рис. 4. Розглядуваний сталевий тонкостінний оцинкований профіль

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Таблиця 1

Ефективність С-подібних тонкостінних профілів

Профіль	Повна площа A, см ²	Редукована площа A _{red} , см ²	Ефективність перерізу, %
ПСс-02 80/1,2	2,293	1,784	77,8
ПСс-02 80/1,4	2,654	2,147	80,9
ПСс-02 80/2,0	3,702	3,354	90,6
ПСс-02 100/1,2	2,533	1,784	70,4
ПСс-02 100/1,4	2,934	2,147	73,2
ПСс-02 100/2,0	4,102	3,354	81,7
ПСс-03 150/1,2	3,373	2,024	60,0
ПСс-03 150/1,4	3,914	2,427	62,0
ПСс-03 150/2,0	5,502	3,754	68,2
ПСс-03 200/1,2	3,973	2,024	50,9
ПСс-03 200/1,4	4,614	2,427	52,6
ПСс-03 200/2,0	6,502	3,754	57,7
ПСс-03 250/1,2	4,573	2,024	44,2
ПСс-03 250/1,4	5,314	2,427	45,6
ПСс-03 250/2,0	7,502	3,754	50,0
ПСс-04 60/1,2	2,533	2,264	89,3
ПСс-04 60/1,4	2,934	2,707	92,2
ПСс-04 60/2,0	4,102	4,054	98,8
ПСс-04 80/1,2	2,773	2,264	81,6
ПСс-04 80/1,4	3,214	2,707	84,2
ПСс-04 80/2,0	4,502	4,154	92,2

Результати підбору поперечних перерізів аркових елементів для різних типів профілів, прольотів та кроків наведені в табл. 2 і 3.

В табл. 4-6 представлена остаточно вартість аркових елементів з різних типів профілів для обраних прольотів і кроків. Дані наведені в перерахунку на площу забудови, оскільки цей показник є визначальним при складанні проектно-кошторисної документації.

При розрахунку вартості до уваги приймалась не тільки ринкова ціна певного виду профілів відповідно до його маси, а й вартість технологічних операцій (зокрема, гнуття і виготовлення зварних швів), необхідні для отримання аркового елементу з трубних профілів. Також додатково враховувались подальші операції ґрунтування та фарбування профілів з труб та витрати на їх монтаж.

Для тонкостінних оцинкованих профілів в кошторисну вартість включались операції збірки перерізу з двох окремих профілів, а також витрати на подальший монтаж аркових елементів.

Зазначимо, що в кошторисну вартість в усіх випадках закладались ринкові показники станом на осінь 2019 р. в Україні. Ціни прийняті усередненими по території країни, оскільки вони дещо варіюються в залежності від регіону.

Таблиця 2

Підібрані поперечні перерізи аркового елементу для максимального вітрового району

Крок, м	3			4		
	Гарячекатаний	Зварний	Тонкостінний	Гарячекатаний	Зварний	Тонкостінний
Профіль						
Проліт, м						
12	146×4,5	193,7×2,5	ПС-04 60/1,2	159×5	219×2,5	ПС-04 60/1,2
15	168×5	219×2,8	ПС-04 60/1,2	194×5	244,5×3	ПС-04 60/1,2
18	203×6	273×3,5	ПС-04 60/1,2	219×7	273×4,5	ПС-04 60/1,2
20	219×7	273×4,5	ПС-04 60/1,2	219×9,5	325×4	ПС-04 80/1,4
24	219×11	355,6×4	ПС-04 60/1,2	219×11	219×16	ПС-02 100/1,4

Закінчення таблиці 2

Крок, м	5			6		
	Гарячекатаний	Зварний	Тонкостінний	Гарячекатаний	Зварний	Тонкостінний
Профіль						
Проліт, м						
12	180×5	219×3,2	ПС-04 60/1,2	194×5	244,5×3	ПС-04 60/1,4
15	203×6	244,5×3,8	ПС-04 80/1,2	219×6	273×3,8	ПС-04 80/1,4
18	219×9	325×4	ПС-04 60/1,4	219×11	355,6×4	ПС-02 80/2,0
20	219×12	377×4	ПС-02 80/2,0	219×15	406,4×4	ПС-04 80/2,0
24	219×22	426×4,5	ПС-02 80/2,0	219×28	426×5,5	ПС-02 100/2,0

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Таблиця 3

Підібрані поперечні перерізи аркового елементу для максимального снігового району

Крок, м	3			4		
	Гарячекатаний	Зварний	Тонкостінний	Гарячекатаний	Зварний	Тонкостінний
12	159×5	219×2,5	ПС-04 60/1,2	180×5	244,5×3	ПС-02 80/2,0
15	194×5	244,5×3	ПС-04 60/1,4	203×6	273×3,5	ПС-04 80/1,4
18	203×6,5	273×3,5	ПС-04 60/1,2	219×7,5	325×4	ПС-04 80/1,4
20	219×7	273×4,5	ПС-02 80/1,4	219×9,5	325×4	ПС-04 80/1,4
24	219×11	355,6×4	ПС-02 80/2,0	219×15	406,4×4	ПС-03 150/2,0

Закінчення таблиці 3

Крок, м	5			6		
	Гарячекатаний	Зварний	Тонкостінний	Гарячекатаний	Зварний	Тонкостінний
12	194×5,5	244,5×3,5	ПС-02 80/2,0	203×6	273×3,5	ПС-03 150/2,0
15	219×6,5	273×4,5	ПС-02 80/2,0	219×8	325×4	ПС-04 80/2,0
18	219×10	355,6×4	ПС-04 60/2,0	219×12	377×4	ПС-04 80/2,0
20	219×13	377×4	ПС-04 60/2,0	219×16	406,4×4	ПС-04 80/2,0
24	219×20	426×4,5	ПС-04 80/1,4 + ПП-04 80/1,4	219×25	426×5,5	ПС-04 80/2,0 + ПП-04 80/2,0

Таблиця 4

Вартість аркового елементу, виконаного з гарячекатаних круглих труб (грн./м²)

Крок, м	Максимальний вітровий район				Максимальний сніговий район			
	3	4	5	6	3	4	5	6
12	980	788	664	572	1001	787	675	597
15	1075	858	761	660	1144	952	825	769
18	1269	1072	987	927	1320	1113	1050	979
20	1430	1275	1177	1133	1430	1275	1239	1184
24	1854	1772	1762	1737	1854	1697	1650	1605

Таблиця 5

Вартість аркового елементу, виконаного зі зварних круглих труб (грн./м²)

Крок, м	Максимальний вітровий район				Максимальний сніговий район			
	3	4	5	6	3	4	5	6
12	877	682	589	499	910	750	635	553
15	940	749	655	573	999	829	742	637
18	1106	927	764	667	1106	955	800	688
20	1237	956	826	717	1237	956	826	717
24	1333	1075	944	889	1333	1075	944	889

Таблиця 6

Вартість аркового елементу, виконаного з тонкостінних оцинкованих профілів (грн./м²)

Крок, м	Максимальний вітровий район				Максимальний сніговий район			
	3	4	5	6	3	4	5	6
12	307	241	204	189	341	338	280	341
15	309	242	208	193	391	327	311	306
18	337	264	233	239	377	329	312	290
20	347	308	273	274	403	342	338	324
24	448	367	341	304	568	587	595	548

В цілому, відповідно до отриманих кошторисних показників чітко простежується наступна тенденція – для всіх розглянутих конструктивних варіантів найнижчу вартість мають аркові елементи з тонкостінних оцинкованих профілів. Причому сталеві арки на основі безшовних електрозварних прямошовних труб виявляються приблизно на 50...80 % дорожчими, а арки на основі гарячедеформованих труб – в середньому втричі дорожчими, ніж при застосування тонкостінних оцинкованих профілів.

Також слід відмітити, що снігове навантаження є більш критичним за вітрове навантаження, хоча й не набагато.

Наукова новизна та практична значимість

Таким чином, в даній публікації визначено найбільш ефективний тип сталевих сортаментних профілів для використання в аркових спорудах, що є несучими елементами каркасів легких швидкокомтованих будівель. Зокрема доведено високу ефективність сучасних тонкостінних оцинкованих профілів для даного типу конструкцій.

З практичної точки зору в ході досліджень отримано інженерні дані щодо конкретних типів тонкостінних оцинкованих профілів, які необхідно застосовувати для несучих аркових елементів швидкокомтованих будівель. Дані представлені в зручній для користування в інженерній практиці табличній формі в залежності від природно-кліматичних навантажень, прольотів та кроків несучих елементів каркасу таких будівель.

Окремо наведені відомості щодо кошторисної вартості застосування різних типів сталевих профілів в перерахунку на площу забудову. Цей показник є особливо важливим і корисним при проведенні практичної оцінки вартості будівництва й складання кошторисної документації.

Висновки

На основі проведених досліджень стосовно матеріаломісткості та кошторисної вартості різних типів сталевих профілів для несучих аркових елементів слід констатувати наступне:

1. Найбільш економічно ефективним типом профілів є тонкостінні оцинковані профілі. Вони дозволяють виконати сталевий каркас інже-

нерних споруд в середньому в 2...3 рази дешевше трубних профілів, які традиційно застосовуються в якості несучих елементів транспортних інженерних об'єктів.

2. Середня вартість забудови із використанням тонкостінних оцинкованих профілів становить 300...350 грн./м² в ринкових цінах 2019 р. в Україні. Для трубних профілів цей показник коливається в межах 800...1300 грн./м².

3. При проведенні розрахунків несучої здатності тонкостінних оцинкованих профілів обчислена редукована площа виявляється нижчою відповідно до вимог чинних вітчизняних норм (ДБН В.2.6-198:2014) порівняно із Європейськими стандартами (ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012). При цьому ефективність використання площ перерізів за вітчизняними сортаментами (ТУ У В.2.6-24.3-37452010-002:2014) знаходиться в межах від 45 до 100 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Gronostajski, Z., Kaczyński, P., Polak, S., & Bartczak, B. (2018). Energy absorption of thin-walled profiles made of AZ31 magnesium alloy. *Thin-Walled Structures*, 122, 491-500.
- He, K., Chen, Yu., & Wan, J. (2018). Web crippling behavior of grouted galvanized rectangular steel tube. *Thin-Walled Structures*, 122, 300-313.
- Neduzha, L. O., & Shvets, A. O. (2016). Application of APM WinMachine software for design and calculations in mechanical engineering. *Science and Transport Progress*, 2(62), 129-147.
- Piekarczyk, A., Więch, Pr., & Cybulski, R. (2019). Experimental method to evaluate the load-carrying capacity of double corrugated sheet profiles. *Thin-Walled Structures*, 144, Article No. 106283.
- Zhang, Ya., Ge, W., Zhang, Yo., & Zhao, Zh. (2018). Topology optimization method with direct coupled finite element–element-free Galerkin method. *Advances in Engineering Software*, 115, 217-229.
- Баженов, В. А., Перельмутер, А. В., Ворона, Ю. В., & Отрашевська В. В. (2018). *Варіаційні принципи будівельної механіки. Нариси з історії*. Київ: Каравела.
- ГОСТ 10704-91. (2007). *Трубы стальные электро-сварные прямошовные. Сортамент*. Москва: Стандартинформ.
- ГОСТ 8732-78*. (1989). *Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент*. Москва: Изд-во стандартов.
- ДБН В.1.2-2:2006 (зі змінами) (2007). *Система надійності та безпеки в будівництві. Навантаження і впливи. Норми проектування*. Київ: Держбуд.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- ДБН В.2.6-198:2014 (2014). *Сталеві конструкції. Норми проектування*. Київ: Мінрегіонбуд України.
- ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012 (2012). *Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-3. Загальні правила. Додаткові правила для холодноформованих елементів і профільованих листів*. Київ: Мінрегіонбуд та ЖКГ України.
- Марченко, Т. В., & Банников, Д. О. (2011). Технология ЛСТК: проблемы и перспективы. *Строительство, материаловедение, машиностроение, серия: Создание высокотехнологических социально-экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития*, 60, 120-124.
- Марченко, Т. В., & Банников, Д. О. (2009а). Експериментальні дослідження форм втрати стійкості тонкостінних елементів. *Строительство, материаловедение, машиностроение, серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*, 50, 368-372.
- Марченко, Т. В., & Банников, Д. О. (2009б). Порівняльний аналіз форм втрати стійкості тонкостінних стержневих елементів. *Металеві конструкції*, 15, 3, 177-188.
- Перельмутер, А. В., & Сливкер, В. И. (2007). *Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы. Т. 1: Общие теоремы. Устойчивость отдельных элементов механических систем*. Москва: СКАД СОФТ.
- Стрелец-Стрелецкий, Е. Б., Журавлев, А. В., & Водопьянов, Р. Ю. (2019). *ЛИРА-САПР. Книга 1. Основы*. Киев: LIRALAND.
- ТУ У В.2.6-24.3-37452010-002:2014. Профили и детали стальные гнутые для строительства. Режим доступу: <https://domstroy.com.ua/company/466-kompaniya-stilko>

В. М. БЕЗСАЛИЙ¹, Д. О. БАННИКОВ^{2*}

¹ Факультет «Промышленное и гражданское строительство», Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (063) 764 68 95, эл. почта bezsalyslava@gmail.com, ORCID 0000-0003-4424-0105

^{2*} Кафедра строительного производства и геодезии, Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, эл. почта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТОНКОСТЕННЫХ ОЦИНКОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ АРОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Цель. Выполнить инженерную оценку эффективности использования стальных тонкостенных оцинкованных профилей на примере инженерной конструкции в виде арки. Сформулировать рекомендации относительно целесообразности применения таких профилей по сравнению с другими более традиционными видами сортаментных профилей. **Методика.** Для достижения поставленной цели проведена серия численных расчетов арочной конструкции, выполненной из трех типов стальных сортаментных профилей – бесшовных горячедеформированных труб, электросварных прямошовных труб и тонкостенных оцинкованных профилей. При этом варьировались пролеты арочной конструкции в диапазоне от 12 до 24 м и шаг ее расположения в диапазоне от 3 до 6 м. Также отдельно рассматривалось действие снеговой и ветровой нагрузок в соответствии с действующим стандартом Украины. Вычисления проводились методом конечных элементов на базе проектного комплекса Lira for Windows. **Результаты.** По результатам анализа и сопоставления полученных данных численных расчетов установлено, что наименее затратным является применение стальных оцинкованных профилей, конструкции из которых для всех рассмотренных вариантов имеют наименьшую стоимость. Стальные арки на основе электросварных прямошовных труб оказываются приблизительно на 50...80 % более дорогими, а арки на основе бесшовных горячедеформированных труб – в среднем в три раза дороже. При этом во внимание принималась как усредненная рыночная стоимость профилей, так и стоимость изготовления из них арочной конструкции. **Научная новизна.** Определен наиболее эффективный тип стальных сортаментных профилей для использования в арочных сооружениях, которые являются несущими элементами каркасов легких быстромонтируемых зданий. В частности доказана высокая эффективность современных тонкостенных оцинкованных профилей для данного типа конструкций. **Практическая значимость.** В ходе исследований получены инженерные данные относительно конкретных типов тонкостенных оцинкованных профилей, которые необходимо применять для несущих арочных элементов быстромонтируемых зданий. Данные представлены в удобной для использования в инженерной практике табличной форме

в зависимости от природно-климатических нагрузок, пролетов и шагов несущих элементов каркаса таких зданий.

Ключевые слова: арочная конструкция; тонкостенный оцинкованный профиль; труба; метод конечных элементов; комплекс Lira for Windows

V. M. BEZSALYI¹, D. O. BANNIKOV^{2*}

¹ Faculty «Industrial and Civil Engineering», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail bezsalslava@gmail.com, ORCID 0000-0003-4424-0105

^{2*} Department «Construction Production and Geodesy», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

EFFICIENCY OF THIN-WALLED GALVANIZED PROFILES FOR ARCH ELEMENTS

Purpose. To carry out an engineering estimation of the effectiveness of using steel thin-walled galvanized profiles on the example of an engineering structure in the form of an arch. To formulate recommendations regarding the appropriateness of using such profiles in comparison with other more traditional types of assortment profiles. **Methodology.** To achieve this goal, a series of numerical calculations of an arch structure made of three types of steel assortment profiles – seamless hot-deformed pipes, electric-welded straight-seam pipes and thin-walled galvanized profiles – was carried out. At the same time, the spans of the arch structure were varied in the range from 12 to 24 m and the step of its arrangement in the range from 3 to 6 m. The effect of snow and wind loads was also separately considered in accordance with the current standard of Ukraine. The calculations were done using the finite element method based on the Lira for Windows project complex. **Findings.** According to the results of analysis and comparison of the obtained data of numerical calculations, it was found that the least costly is the use of galvanized steel profiles, the structures of which have the lowest cost for all the variants considered. Steel arches based on electric-welded straight-seam pipes turn out to be approximately on 50...80 % more expensive, and arches based on seamless hot-deformed pipes are on average in three times more expensive. At the same time, both the average market value of the profiles and the cost of manufacturing an arch structure from them were taken into account. **Originality.** The most effective type of steel assortment profiles for use in arched structures, which are the supporting elements of the frames of lightweight fast-mounted buildings, is determined. In particular, the high efficiency of modern thin-walled galvanized profiles for this type of structure has been proven. **Practical value.** In the course of the research, engineering data were obtained, regarding specific types of thin-walled galvanized profiles, which must be used for load-bearing arched elements of fast-mounted buildings. The data are presented in a tabular form convenient for use in engineering practice, depending on the climatic loads, spans and steps of the supporting elements of the frame of such buildings.

Keywords: arched structure; thin-walled galvanized profile; pipe; finite element method; complex Lira for Windows

REFERENCES

- Gronostajski, Z., Kaczyński, P., Polak, S., & Bartczak, B. (2018). Energy absorption of thin-walled profiles made of AZ31 magnesium alloy. *Thin-Walled Structures*, 122, 491-500. (in English)
- He, K., Chen, Yu., & Wan, J. (2018). Web crippling behavior of grouted galvanized rectangular steel tube. *Thin-Walled Structures*, 122, 300-313. (in English)
- Neduzha, L. O., & Shvets, A. O. (2016). Application of APM WinMachine software for design and calculations in mechanical engineering. *Science and Transport Progress*, 2(62), 129-147. (in English)
- Piekarczyk, A., Więch, Pr., & Cybulski, R. (2019). Experimental method to evaluate the load-carrying capacity of double corrugated sheet profiles. *Thin-Walled Structures*, 144, Article No. 106283. (in English)
- Zhang, Ya., Ge, W., Zhang, Yo., & Zhao, Zh. (2018). Topology optimization method with direct coupled finite element–element-free Galerkin method. *Advances in Engineering Software*, 115, 217-229. (in English)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Bazhenov, V. A., Perel'muter, A. V., Vorona, Yu. V., & Otrashcheva V. V. (2018). *Variatsiini pryntsyipy budive-lnoi mekhaniky. Narysy z istorii*. Kyiv: Karavela. (in Ukrainian)
- GOST 10704-91. (2007). *Truby stal'nye jelektrosvarnye prjamoshovnye. Sortament*. Moskva: Standartinform. (in Russian)
- GOST 8732-78*. (1989). *Truby stal'nye besshovnye gorjachedeformirovannye. Sortament*. Moskva: Izd-vo standartov. (in Russian)
- DBN V.1.2-2:2006 (zi zminamy) (2007). *Systema nadiinosti ta bezpeky v budivnytstvi. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia*. Kyiv: Derzhbud. (in Ukrainian)
- DBN V.2.6-198:2014 (2014). *Stalevi konstruksii. Normy proektuvannia*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DSTU-N B EN 1993-1-3:2012 (2012). *Yevrokod 3. Proektuvannia stalevykh konstruksii. Chastyna 1-3. Zahalni pravyla. Dodatkovy pravyla dlia kholodnoformovanykh elementiv i profilovanykh lystiv*. Kyiv: Minrehionbud ta ZhKH Ukrainy. (in Ukrainian)
- Marchenko, T. V., & Bannikov, D. O. (2011). *Tehnologija LSTK: problemy i perspektivy. Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie, serija: Sozdanie vysokotekhnologicheskikh sociojekokompleksov v Ukraine na osnove koncepcii sbalansirovannogo (ustojchivogo) razvitija*, 60, 120-124. (in Russian)
- Marchenko, T. V., & Bannikov, D. O. (2009a). *Eksperymentalni doslidzhennia form vtraty stiikosti tonkos-tinnykh elementiv. Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie, serija: Innovacionnye tehnologii zhiznennogo cikla obektiv zhilishhno-grazhdanskogo, promyshlennogo i transportnogo naznachenija*, 50, 368-372. (in Ukrainian)
- Marchenko, T. V., & Bannikov, D. O. (2009b). *Porivnialnyi analiz form vtraty stiikosti tonkostinnykh sterzhnevnykh elementiv. Metalevi konstruksii*, 15, 3, 177-188. (in Ukrainian)
- Perel'muter, A. V., & Slivker, V. I. (2007). *Ustojchivost' ravnovesija konstrukcij i rodstvennye pro-blemy. T. 1: Obshhie teoremy. Ustojchivost' ot del'nykh jelementov mehanicheskikh sistem*. Moskva: SKAD SOFT. (in Russian)
- Strelec-Streleckij, E. B., Zhuravlev, A. V., & Vodop'janov, R. Ju. (2019). *LIRA-SAPR. Kniga I. Osnovy*. Kiev: LIRALAND. (in Russian)
- TU U V.2.6-24.3-37452010-002:2014. *Profili i detali stal'nye gnutye dlja stroitel'stva*. (in Russian). Rezhym dostupu: <https://domstroy.com.ua/company/466-kompaniya-stilko>

Надійшла до редколегії 20.11.2019.

Прийнята до друку 26.11.2019.