

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ В АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ

APPLICATION OF METAL STRUCTURES ON HIGHWAYS

Процюк В.О., к.т.н., доц., Шимчук О.П., к.т.н., доц., Талах Л.О., к.т.н., доц., Богданович О.О., магістр (Луцький національний технічний університет)

Protsiuk V.O., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Shymchuk O.P., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Talakh L.O., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Bohdanovych O.O., master (Lutsk National Technical University)

У статті проведено аналіз застосування металевих гофрованих труб під автомобільними дорогами за кордоном та в Україні. Встановлено основні проблеми, які виникли під час експлуатації металевих гофрованих труб. В статті значну увагу приділено закордонним і вітчизняним методам розрахунку напружено-деформованого стану металевих гофрованих труб.

The article discusses the main problems associated with the use of metal structures in road construction. The advantages of artificial structures made of metal in comparison with other materials due to their better physical and mechanical properties are given. The prospect of using metal corrugated pipes instead of ordinary reinforced concrete culverts and small single-span bridges is foreseen.

The article discusses the use of metal corrugated pipes. The first experience of using culverts made of metal corrugated structures begins at the end of the 19th century. The main countries in which metal culverts began to be used are given. In Ukraine, the use of metal corrugated pipes began in the early 2000s. The most famous manufacturer, which is the leader in the market of Ukraine and Europe, is the VIACON company.

The article analyzes the early experience of the operation of metal corrugated pipes and characterizes the main deformations and defects that most often occur during the operation of these pipes. In addition, the main causes of these deformations have been established.

The article provides a concise analysis and comparison of existing mathematical models for calculating the stability and stress-strain state of corrugated metal pipes. Mathematical models of Feldt, Yasevich, Levy, Marston, Spangler, Klein are considered. In addition, the article provides mathematical models of the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) and CHBDC. Canada Highway and Bridge Design Code (CHBDC), as well as the calculation of metal corrugated pipes for strength and bearing capacity is performed in Ukraine. The analyzed models have their advantages and disadvantages. Each calculation method was improved by introducing coefficients and restrictions.

Summarizing the analysis of the existing models, the authors of the article propose to use the universal method of finite elements for the calculation of corrugated metal structures. This method of computer modeling allows taking into account a wide range of various parameters that are not always possible to use in calculations by conventional analytical methods.

In the final part of the article, the authors pay attention to the advantages of using metal corrugated pipes under highways in comparison with reinforced concrete ones, including economy, strength, seismic resistance, speed and manufacturability of installation.

It is expected that the further development of methods for calculating the stability of structures and the stress-strain state of corrugated metal pipes will allow to increase the percentage of the use of culverts made of corrugated metal under highways.

Ключові слова: *автомобільна дорога, металева гофрована труба, напружено-деформований стан, стійкість, водопропускна труба, міст*

Keywords: *highway, metal corrugated pipe, stressed-deformed state, stability, culvert, bridge*

Вступ. Розвиток сучасних безпечних, комфортних і швидкісних автомобільних доріг потребує застосування в будівництві сучасних і прогресивних матеріалів. Вони повинні бути міцнішими, дешевшими, довговічнішими та надійнішими. Крім того, конструкції повинні вписуватися в ландшафт середовища і мати естетичний вигляд. Цим матеріалом добре себе зарекомендувала сталь.

Фізико-механічні властивості сталей, що застосовуються для виготовлення металевих конструкцій, високі експлуатаційні характеристики зробили можливим широке використання їх у будівництві. Висока міцність, легкість та надійність сталі дозволили зводити високі та великопрогонові споруди [1]. Найбільшого розповсюдження у дорожній галузі металеві конструкції набули при будівництві мостів, водопропускних труб, дорожнього огороження, скотопронів та транспортних тунелів.

Відповідно до Програми Президента «Велике будівництво» (розпочато у березні 2020 року) передбачається капітальний ремонт не тільки елементів проїзної частини, узбіч і укосів, а ще із ремонт або реконструкцію штучних споруд таких як мости та водопропускні труби. В проєктах на капітальний ремонт все частіше проєктанти пропонують заміну старих залізобетонних труб на металеві гофровані, а малі мости, що знаходяться в аварійному стані, пропонують замінювати металевими гофрованими трубами.

Аналіз досліджень. Перший досвід експлуатації водопропускних труб із металевих гофрованих конструкцій починається з кінця XIX століття (1875 р.) [2-6]. Спершу було запропоновано замінити дерев'яні

водо-пропускні труби на металеві в Російській імперії, пізніше (1896 р.) металеві труби почали застосовувати у США. В країнах Європи та в Японії застосування металевих труб відбулося значно пізніше – у другій половині ХХ століття [6]. Найбільш відомими виробниками, що є лідерами на ринку України і Європи, є норвезько-шведсько-фінська компанія VIACON та італійська FRACASSO. Вони забезпечують потребу в металоконструкціях з гофри для країн Європи, Америки, Африки та Австралії.

З тих пір пройшло більше століття, а тому накопичився значний досвід експлуатації даних конструкцій, що працюють під насьпирами автомобільних доріг і сприймають навантаження від транспортних навантажень. Значна кількість наукових праць [2, 7-9] приділена дослідженню металевих гофрованих конструкцій у процесі інтенсивної експлуатації, в яких описуються види та причини руйнувань даних конструкцій.

Як свідчить ранній досвід експлуатації металевих гофрованих труб, значна частина труб отримала пошкодження у вигляді деформування частини труби всередину через низьку експлуатаційну надійність конструкції [10]. Головними причинами утворення недопустимих деформацій, а саме зменшення вертикального та збільшення горизонтального діаметрів отвору труби, а також повного руйнування є недосконалість аналітичних методів розрахунку товщини стінок труби, нерівномірне ущільнення ґрунту під час засипки труби, що призводить до розмивів, неприйнятний вибір геометричної форми отвору труби.

Для недопущення деформації необхідно у подальшому розвинути методи розрахунку стійкості металевих гофрованих труб, які повинні працювати спільно з ґрунтом насипу.

Постановка мети і задач досліджень. Метою наукової статті є аналіз і порівняння існуючих математичних моделей розрахунку стійкості металевих гофрованих труб. Подальший розвиток методів розрахунку стійкості конструкцій металевих гофрованих труб дозволить збільшити відсоток застосування водопропускних труб із гофрованого металу під автомобільними дорогами.

Виклад основного матеріалу. Значний внесок у розвиток будівельної галузі поклато застосування у будівельних конструкціях сталі. Завдяки своїй легкості, пружності, міцності на розтяг, довговічності та перевазі у монтажі, сталь завоювала лідерство в будівельній галузі. Зниження ваги конструкцій через застосування сталі дозволило зменшити витрати на влаштування фундаментів та опор, дозволило збільшити довжини прольотів великих мостів.

У дорожньому будівництві сталь найчастіше застосовують у мостових конструкціях, у вигляді металевих арок склепіння, пілонів, тросів підвісного полотна, прогонів полотна. Трохи рідше сталь

застосовують під час влаштування габіонів у якості сітки, що формує каркас конструкції.

Металеві труби почали поступово застосовуватись для перепуску дощових, талих вод і транспортних тунелів під автомобільною дорогою, для влаштування скотопрогону, а також при реконструкції малих мостів.

У процесі проектування металевих гофрованих труб проектувальнику потрібно задатися параметрами конструкції та вибрати оптимальний метод розрахунку її напружено-деформованого стану. В науковій статті проведемо аналіз методів оцінки стійкості та несучої здатності труб із металевих гофрованих труб.

Перші методи оцінювання несучої здатності з'явилися паралельно з будівництвом металевих гофрованих труб. На межі XIX і XX століть для розрахунку застосовували метод Фельдта [3]. Даний метод передбачає перевірку допустимих напружень, що виникають у стінках металеві гофрованої труби від дії згинального моменту і стискаючої сили. Проте дана модель застосовується лише для труб діаметром менше 1,5 м та не враховує фізико-механічні характеристики ґрунтової засипки:

$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{M}{W} \leq \sigma_{cp} \quad (1)$$

У цей період Ясевич запропонував гіпотезу про рівномірний розподіл тисків на трубу з усіх сторін [3, 17], розрахунок дії критичного руйнівного тиску для металеві труби виконується за формулою:

$$p = c \sqrt{\frac{W}{dl}}, \quad (2)$$

де: c – емпіричний коефіцієнт; рівний 6; d – діаметр труби; l – довжина труби.

І в попередній моделі, запропонованій Фельдтом, модель Ясевича також застосовується для труб діаметром до 1,5 м. Ще одним недоліком даної моделі є емпіричний коефіцієнт c .

Ще одна методика була розроблена Леві у 1905 р. У своїх роботах ним було враховане навантаження на трубу від однієї осі рухомого навантаження. Розподіл тиску в ґрунті приймається під кутом 45°. Напруження за методикою Леві визначається за формулою:

$$\sigma = \frac{qr}{\omega} \leq \sigma_{zp} \quad (3)$$

де: r – радіус труби; q – інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження; ω – площа перерізу кільця труби.

Використання згаданих моделей у практичному розрахунку металевих гофрованих труб показало значне розходження результатів у порівнянні із експериментальними даними [11]. Тому було прийнято рішення про необхідність подальшого розвитку методів розрахунку металевих гофрованих труб із урахуванням взаємодії із ґрунтом земляного полотна.

У 1941 у США Spangler M.G. і Anson Marston запропонували модель Marstona–Spanglera для розрахунку металевих гофрованих труб круглого перерізу і малого діаметру. Дана модель базується на основі натурних експериментів труб. В методиці прийнято припущення про рівномірний вертикальний тиск ґрунтової засипки на верхню та нижню поверхні труби, а бокові стінки труби зазнають дії горизонтального тиску ґрунтової засипки, який змінюється за параболічним законом.

Автори методики зазначають, що руйнування труб відбувалося в процесі зменшення вертикального діаметра до 20%. При цьому діаметр і товщина стінок труби та опір ґрунту не впливають на руйнування труби.

М. Шпенглер у своїй роботі [12] наводить формулу для визначення деформації горизонтального діаметру труби:

$$\Delta D_z = F_g \cdot F_k \cdot \frac{Qr^3}{EI + 0,061 \cdot E'_{zp} \cdot \kappa^4}, \quad (4)$$

де: F_g – емпіричний коефіцієнт ($F_g=1,25-1,5$), який враховує переміщення ґрунту насипу; F_k – коефіцієнт умов обпирання труби на основу; $Q=2qr$ – вертикальне навантаження на одиницю довжини труби; E_{zp} – модуль горизонтальної деформації ґрунту насипу.

У подальшому модель Marstona–Spanglera була розвинена у працях Г.К. Клейна [13]. У 1951 ним була запропонована модель розрахунку водопропускних труб. Клейн припускає зменшення напружень у матеріалі конструкції опір ґрунту, що діє на металеву гофровану трубу. Для цього у модель Фельдта ним введено коефіцієнт, що зменшує дію згинального моменту ξ . Розрахунок напружень, що виникають у стінках металевих гофрованих труб, розраховують за наступною формулою:

$$\sigma = \frac{\xi M}{W} \pm \frac{N}{A} \leq \sigma_d, \quad (5)$$

де: M – згинальний момент; W – момент опору; N – поздовжня осьова сила; A – площа перерізу стінки конструкції на довжині один метр; σ_d – допустиме напруження у металі конструкції.

У США на основі норм проектування мостів була розроблена аналітична методика AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) [8]. Методика AASHTO в розрахунках враховує лише осьові сили у конструкції труби, але при цьому нехтують впливом згинальних моментів. Застосування даної методики дозволяє оцінити міцність швів, а також втрату стійкості стінок конструкції та монтажну жорсткість.

При цьому методика застосовується під час розрахунку конструкцій радіусом більше 4 м та має еліптичний поперечний переріз. За даною моделлю сила тиску у стінці конструкції визначається за формулою:

$$T = 0,5(\alpha_D \cdot P_D + \alpha_L \cdot P_L \cdot \phi) \cdot D_h \quad (6)$$

де D_h – вертикальний діаметр споруди, P_D , P_L – постійне та змінне рівномірно-розподілене навантаження на рівні склепіння конструкції, ϕ – динамічний коефіцієнт, α_D – коефіцієнт постійного навантаження, α_L – коефіцієнт змінного навантаження.

Для оцінки стійкості та несучої здатності металевих гофрованих труб розглянемо також канадську методику CHBDC. В цій моделі так само, як і в попередній аналітичній моделі AASHTO, у розрахунках необхідно враховувати дію осьових сил, що виникають у металевій гофрованій трубі, при цьому нехтуючи згинальними моментами [9, 11]. Наведену методику часто використовують у процесі виконання проектних робіт із розрахунку арочного поперечного перерізу.

Стискаюче зусилля у стінці конструкції визначається за методом CHBDC [14]:

$$T = \alpha_D \cdot T_D + \alpha_L \cdot T_L \quad (7)$$

де α_D – коефіцієнт, що враховує постійні навантаження, T_D – сила в стінці конструкції, викликана дією постійного навантаження, α_L – коефіцієнт, що враховує змінні навантаження, T_L – сила в стінці конструкції, спричинена дією змінного навантаження.

Пізніше в Канаді з'явилася методика CHBDC, що є аналогом до попередньої. В цій методиці враховується зв'язок між значеннями

грунтової засипки та жорсткості конструкції. Міцність стінки труби при стиску та жорсткість конструкції перевіряють у зібраному стані з урахуванням взаємодії із ґрунтом насипу.

Загальна вертикальна сила, що діє у стінці конструкції, визначається за формулою:

$$T = \alpha_D \cdot T_D + \alpha_L \cdot T_L \cdot \varphi_d \quad (8)$$

Як бачимо, у цю формулу введено динамічний коефіцієнт φ_d . Значення цього коефіцієнта залежить від висоти насипу над трубою.

В Україні розрахунок металевих гофрованих труб на міцність та несучу здатність виконується відповідно до ДБН В.1.2-15:2009 [15] та ВБН В.2.3-218-198:2007 [16] за формулою:

$$\frac{N}{A} \leq R_y m \quad (9)$$

де: N – нормальне (тангенціальне) зусилля у гофрованій конструкції від розрахункових навантажень, що припадає на довжину λ однієї гофри труби; A – площа перерізу однієї хвилі гофри; R_y – розрахунковий опір сталі на межі текучості; $m=0,9$ – коефіцієнт умов роботи споруди.

Із розвитком аналітичних методів та програмних комплексів на сьогоднішній день для розрахунку металевих гофрованих конструкцій найбільш універсальним методом є метод скінчених елементів (МСЕ). Даний метод комп'ютерного моделювання дозволяє враховувати широкий спектр різноманітних параметрів, які не завжди можна використовувати в розрахунках звичайними аналітичними методами. Тому, використання методу скінчених елементів дозволяє отримати точніші результати напружень і деформацій, що підтверджується науковими роботами [17].

Незважаючи на таку велику кількість математичних моделей та їх неточності, металеві гофровані труби все частіше починають застосовувати в Україні. Це пов'язано, насамперед, із значними перевагами в порівнянні із традиційними залізобетонними трубами.

До основних переваг застосування металевих будівельних конструкцій слід віднести швидкість монтажу. Будівництво залізобетонних споруд потребує дотримання технологічних перерв, а також температурного режиму, що пов'язані із періодом тужавіння бетону. Монтаж елементів гофрованих металевих конструкцій не залежить від температурного режиму та не потребує технологічних перерв.

Менша вага металевих конструкцій у порівнянні із залізобетонними дозволяє зменшити витрати на доставку металевих елементів на об'єкт та

не потребує використання спеціальної будівельної техніки під час монтажу конструкцій.

Маючи високу міцність та хорошу гнучкість, металеві гофровані труби можна застосовувати в районах із високою сейсмічною активністю.

Окрім низьких витрат на підтримання працездатності конструкції, слід зазначити, що вартість монтажу металевих гофрованих труб на 15%-20% нижча за вартість залізобетонних.

Висновки. Використання гофрованих металевих труб у дорожньому будівництві дозволяє зменшити вартість будівництва штучних споруд, насамперед, малих однопролітних мостів. Високі міцнісні характеристики сталі дозволяють застосовувати металеві водопропускі труби під автомобільними дорогами та сприймати високі навантаження від транспортних засобів. Проте, під час конструювання і визначення напружено-деформованого стану труби, необхідно ретельно ставитися до вибору геометричних характеристик стінки гофрованої труби та обирати відповідні математичні моделі розрахунку, що в повній мірі відповідають вихідним умовам проектування.

References

1. Talakh L.O. Metalevi konstruktsiyi v suchasnomu budivnytstvi / L.O. Talakh, O.P. Shymchuk, V.O. Protsyuk, A.S. Semerey, YA.I. Panasyuk // *Suchasni tekhnolohiyi ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi : zb. nauk. prats' / Luts'kyu nats. tekhn. un-t ; - Luts'k : Luts'kyu NTU, 2020 – Vyp. 13. – S. 104–111.*
2. Kolokolov N.M. Metallicheskiye hofryrovannye truby pod nasypyamy / N.M. Kolokolov, O.A. Yankovskyy, K.B. Shcherbyna, S.É. Chernyakhovskaya; pod obshch. red. N.M. Kolokolova. – M.: Transport, 1973 – 120 s.
3. Hertsoh A.A. Hofryrovannye truby na avtomobyl'nykh dorohakh. – M.: Hushosdor, 1939. – 112 s.,
4. Luchko Y.Y. Mosty i truby z hofrovanykh metalevykh konstruktsiy ta monitorynh hruntovykh osnov dorih i sporud: Monohrafiya / Y.Y. Luchko, V.V. Koval'chuk, I.B. Kravets'. – L'viv: Svit, 2019. – 260 s.
5. Luchko Y.Y. Tekhnichnyy stan transportnykh sporudi z metalevykh hofrovanykh konstruktsiy / Luchko Y.Y., Koval'chuk V.V. // *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktyka. 2021. Vyp. 19. S. 38–50.*
6. Koval' P.M. Normuvannya pry proektuvanni i budivnytstvi sporud z metalevykh hofrovanykh konstruktsiy / P.M. Koval', I.P. Bab'yak, T.M. Sitdykova // *Visnyk Dnipropetr. nats. un-tu zal. transp. im. ak. V. Lazaryana. – Dnipropetrovs'k: Vydavnytstvo DNUZT, 2010. – № 39. – S. 114–117.*
7. Yankovskyy O.A. Sooruzhenye metallicheskykh hofryrovannykh vodoprusknykh trub: Zarubezh. opyt / O.A. Yankovskyy, K.A. Cherkasov. – M., 1978. –34 s.

8. AASHTO: Standart Specifications for Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 N. Capitol St., N. W., Ste. 249. Washington, D. C., 2001.
9. CHBDC. Canada Highway and Bridge Design Code, Section 7 – Code, Buried Structures (Final), February 1998. CSPI 2002.
10. Koval'chuk V.V. Nesucha zdatnist' transportnykh sporud iz metalevykh hofrovanykh konstruktsiy v umovakh ekspluatatsiyi : dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.23.01 / Dniprovs'kyy natsional'nyy universytet zaliznychnoho transportu im. akadem. V.Lazaryana. Dnipro, 2019. 445 s.
11. Luchko Y.Y. Metody otsinky napruzhenno-deformovanoho stanu metalevykh hofrovanykh konstruktsiy / Y.Y. Luchko, YU.YE. Koval'chuk, I.B. Kravets' // Zbirnyk nauk. prats' Dnipropetrovs'koho nats. un-tu zalizn. transportu im. akadem. V.Lazaryana «Mosty i tuneli: Teoriya, doslidzhennya, praktyka». – Dnipropetrovs'k, 2017. – № 11 – S. 30–41.
12. Spangler M. G. Factors of safety in the design of buried pipelines // Highway Res.Rec. – 1969. – № 269.
13. Kleyn H.K. Raschët podzemnykh truboprovodov. M., Stroyizdat, 1969. -240 s.
14. Kunecki B. Zachowanie się ortotropowych powłok walcowych w ośrodku gruntowym pod statycznym i dynamicznym obciążeniem zewnętrznym. Rozprawa doktorska / Instytut Budownictwa Politechnika Wroclawska, Raport serii PRE nr 14/2006. – Wrocław, 2006.
15. DBN V.1.2-15:2009. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Navantazhennya i vplyvy. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2009. – 104 s.
16. VBN V.2.3-218-198:2007. Proektuvannya ta budivnytstvo sporud iz metalevykh hofrovanykh konstruktsiy na avtomobil'nykh dorohakh zahal'noho korystuvannya. K.: Ukravtodor, 2007. – 75 s.
17. Janusz L. Obiekty inzynierskie z blach falistych. Projektowanie i wykonawstwo / L. Janusz, A. Madaj. – Wrocław, 2007., Machelski C. Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powłokowych. – Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2008.

Список використаної літератури

1. Талах Л.О. Металеві конструкції в сучасному будівництві / Л.О. Талах, О.П. Шимчук, В.О. Процюк, А.С. Семерей, Я.І. Панасюк // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві: зб. наук. праць / Луцький нац. техн. ун-т ; - Луцьк : Луцький НТУ, 2020 – Вип. 13. – С. 104–111.
2. Колоколов Н.М. Металлические гофрированные трубы под насыпями / Н.М. Колоколов, О.А. Янковский, К.Б. Щербина, С.Э. Черняховская; под общ. ред. Н.М. Колоколова. – М.: Транспорт, 1973 – 120 с.
3. Герцог А.А. Гофрированные трубы на автомобильных дорогах. – М.: Гумосдор, 1939. – 112 с.
4. Лучко Й.Й. Мости і труби з гофрованих металевих конструкцій та моніторинг ґрунтових основ доріг і споруд: Монографія / Й.Й. Лучко, В.В. Ковальчук, І.Б. Кравець. – Львів: Світ, 2019. – 260 с.
5. Лучко Й.Й. Технічний стан транспортних споруд з металевих гофрованих конструкцій / Лучко Й.Й., Ковальчук В.В. // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. 2021. Вип. 19. С. 38–50.

6. Коваль П.М. Нормування при проектуванні і будівництві споруд з металевих гофрованих конструкцій / П.М. Коваль, І.П. Баб'як, Т.М. Сітдикова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту зал. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ: Видавництво ДНУЗТ, 2010. – № 39. – С. 114–117
7. Янковский О.А. Сооружение металлических гофрированных водопропускных труб: Зарубеж. опыт / О.А. Янковский, К.А. Черкасов. – М., 1978. –34 с.
8. AASHTO: Standart Specifications for Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 N. Capitol St., N. W., Ste. 249. Washington, D. C., 2001.
9. CHBDC. Canada Highway and Bridge Design Code, Section 7 – Code, Buried Structures (Final), February 1998. CSPI 2002.
10. Ковальчук В.В. Несуча здатність транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій в умовах експлуатації : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. академ. В.Лазаряна. Дніпро, 2019. 445 с.
11. Лучко Й.Й. Методи оцінки напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій / Й.Й. Лучко, Ю.Є. Ковальчук, І.Б. Кравець // Збірник наук. праць Дніпропетровського нац. ун-ту залізн. транспорту ім. академ. В.Лазаряна «Мости і тунелі: Теорія, дослідження, практика». – Дніпропетровськ, 2017. – № 11 – С. 30–41.
12. Spangler M. G. Factors of safety in the design of buried pipelines // Highway Res.Rec. – 1969. – № 269.
13. Клейн Г.К. Расчёт подземных трубопроводов. М., Стройиздат, 1969. -240 с.
14. Kunecki B. Zachowanie się ortotropowych powłok walcowych w ośrodku gruntowym pod statycznym i dynamicznym obciążeniem zewnętrznym. Rozprawa doktorska / Instytut Budownictwa Politechnika Wroclawska, Raport serii PRE nr 14/2006. – Wrocław, 2006.
15. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи. К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 104 с.
16. ВБН В.2.3-218-198:2007. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. К.: Укравтодор, 2007. – 75 с.
17. Janusz L. Obiekty inżynierskie z blach falistych. Projektowanie i wykonawstwo / L. Janusz, A. Madaj. – Wrocław, 2007., Machelski C. Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powłokowych. – Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2008.