

УДК 624.012.45

СУЧАСНІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННІ ПРОГОНОВІ БУДОВИ МОСТІВ МАЛИХ І СЕРЕДНІХ ПРОГОНІВ

Здобувач Р. Б. Каплін

MODERN STEEL-CONCRETE SPAN STRUCTURES OF SMALL AND MEDIUM-SPAN BRIDGES

Postgraduate student R. Kaplin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.193.2020.229530>

Анотація. У статті проведено огляд найбільш розповсюджених сталезалізобетонних прогонових будов сучасних мостів. Розглянуто сферу застосування, переваги та недоліки сталезалізобетонних конструкцій. Переглянуто особливості використання сталезалізобетонних конструкцій у країнах Європи. Також розглянуто варіанти полегшення сталезалізобетонних конструкцій без значної втрати несучої здатності. Подано нову конструкцію сталезалізобетонної прогонової будови з використанням перфорованих металевих елементів та полегшеної залізобетонної плити проїзної частини.

Ключові слова: сталезалізобетон, прогонова будова, перфорована балка, дискретно-континуальні зв'язки, незнімна опалубка.

Abstract. The paper reviews the most common reinforced concrete girder structures of modern bridges used in Ukraine and other countries. The scope, advantages and disadvantages of reinforced concrete structures are considered. The peculiarities of the use of reinforced concrete structures in European countries are reviewed. The most common typical structural solutions of reinforced concrete girder structures used worldwide are given. Options for facilitation of reinforced concrete structures without significant loss of load-bearing capacity are also highlighted. Options for facilitation of structures are presented in the article by lightening the metal load-bearing elements and reducing the weight of the reinforced concrete slab of the carriageway. Reducing the weight of metal elements can be obtained through the use of perforated elements, which can be performed by waste-free technology. To reduce the cost of materials and reduce the weight of the reinforced concrete slab, it is designed lightweight – hollow or ribbed. When removing concrete from the stretched zone, only the ribs of the width required to accommodate the welded frames and ensure the strength of the panels on an inclined cross section are retained. In this case, the plate in the span between the ribs work on the bend as beams of T-section. The top shelf of the plate also works on the local bend between the ribs. During the inspection, the article presents a new design of reinforced concrete girder structure, using perforated box metal elements, made by waste-free technology, and lightweight reinforced concrete slab of the carriageway with hollow formers. Metal blocks are connected to each other by bolts. Metal blocks are made of perforated sheet elements made of waste-free technology. Each block consists of two main beams, transverse diaphragms and a lower plate. The upper belt of the main beams is implemented with the device of horizontal shelves along the entire length of the beams, performing the function of a supporting element for the reinforced concrete slab. Combining all structural elements into a single finished unit is carried out in the factory by automatic welding, which, in turn, allows us to achieve the high factory readiness. The diaphragms of the block are made with a comb along the upper border, on which a profiled steel sheet is placed, which is a fixed formwork for a reinforced concrete slab. The plate is made of non-removable formwork. To

ensure the joint operation of the metal part and the reinforced concrete slab, a system of discrete-continuous connections in the form of rigid stops connected in the longitudinal and transverse directions by reinforcing rods is proposed.

Keywords: reinforced concrete, girder structure, perforated beam, discrete-continuous connections, fixed formwork.

Вступ. На сьогоднішній день сталезалізобетонні (СТЗБ) прогонові будови активно застосовуються при будівництві мостів в усьому світі. Сталезалізобетонні конструкції мають низку переваг, серед яких можна зазначити: зменшену витрату сталі порівняно з металевими системами і, як наслідок, зниження собівартості конструкції; зниження ваги порівняно із залізобетонними системами; підвищені вертикальна та горизонтальна жорсткості конструкції; висока несуча здатність; простота вузлових з'єднань, що значно полегшує процес монтажу.

Однак не позбавлені ці конструкції і недоліків. До основного недоліку СТЗБ конструкцій можна віднести той факт, що, оскільки сталь і бетон різні за своїми фізико-механічними показниками речовини, необхідно влаштовувати об'єднувальні елементи між ними, які мають забезпечити відсутність зсуву однієї частини відносно іншої в місці контакту. Також можуть виникнути специфічні впливи, викликані перепадами температури, повзучістю та усадкою бетону. Крім того, розрахунок подібних конструкцій більш складний. У процесі розрахунку слід урахувувати стадійність роботи, зрушення різнорідних матеріалів у місці зіткнення і інші специфічні фактори. Однак, незважаючи на всі перелічені вище недоліки, міцність і надійність СТЗБ конструкцій, а також їх економічна вигідність, яка проявляється ще на етапі монтажу, а згодом – і в процесі експлуатації, безсумнівно, змушує зробити вибір саме на їхню користь.

За кордоном сталезалізобетонні конструкції відомі як «composite construction» – в англійських країнах або «verbundbau» в країнах з німецькою мовою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як сказано вище, сталезалізобетонні прогонові будови мають низку переваг порівняно з металевими і залізобетонними системами, що дало змогу їм зайняти міцну позицію в діапазоні прогонів 40–80 м. Як правило, вони не можуть конкурувати з повністю металевими і залізобетонними конструкціями при великих і менших прогонах. Але є й винятки, коли сталезалізобетонні конструкції дешевші за аналогічні металеві і залізобетонні аналоги при даних прогонах.

Далеко не всі різноманітні раціональні види і схеми сталезалізобетонних прогонових будов набули до теперішнього часу достатнього поширення. Перед проектувальниками відкрито широке поле діяльності для створення нових, найбільш ефективних конструкцій.

У роботі [1] автор пропонує розділяти сталезалізобетонні мости за способом підтримки залізобетонної плити. Таким чином прогонові будови можна розділити на ті, в яких з/б плита спирається тільки на головні балки, і ті, в яких з/б плита спирається як на головні, так і на поперечні балки.

У роботі [2] подано найбільш поширені сталезалізобетонні конструкції мостів, що використовуються в Німеччині.

У роботі [3] переглянуто типові конструкції сталезалізобетонних прогонових будов, що використовуються в країнах Євросоюзу.

Проблема зниження власної ваги є на сьогоднішній день одним з основних питань при проектуванні сучасних конструкцій [4]. Стосується ця проблематика і сталезалізобетонних конструкцій. Варіантом вирішення цього питання може бути застосування у сталезалізобетонних системах полегшених металевих і залізобетонних елементів.

Визначення мети та завдання дослідження. *Мета роботи* – аналіз найбільш поширених конструкцій сталезалізобетонних прогонових будов мостів та вибір раціонального конструктивного рішення сталезалізобетонної прогонової будови нового типу за критерієм мінімізації власної ваги.

Об'єкт дослідження – сталезалізобетонні прогонові будови мостів малих та середніх прогонів.

Завдання дослідження – розробка ефективного конструктивного рішення

полегшених сталезалізобетонних прогонових будов мостів малих та середніх прогонів з використанням перфорованих металевих балок та полегшеної залізобетонної плити.

Основна частина дослідження. Всю сукупність і різноманітність застосовуваних СТЗБ прогонових будов можна класифікувати за низкою характерних ознак (рис. 1): за зовнішньою статичною схемою; за конструкцією головних балок; за влаштуванням з/б плити.



Рис. 1. Різноманітність СТЗБ прогонових будов

Найбільш характерним за зовнішньою статичною схемою є застосування СТЗБ прогонових будов у балочно-розрізних системах мостів, оскільки в них залізобетонна плита проїжджої частини повністю розташовується в стиснутій зоні і найкращим чином розвантажує сталеву балку. У балочно-нерозрізних системах включення залізобетонної плити в роботу проводиться за допомогою спеціальних заходів, таких як попереднє напруження, штучне регулювання зусиль і т. д. Менше використовуються СТЗБ прогонові будови в консольних і розпірних системах у першу чергу у зв'язку з труднощами індустріалізації будівництва і подорожчання конструкції. Для перекриття великих прогонів мостів широко застосовуються сталезалізобетонні ферми, висячі і вантові

системи. Часто використовується система при обмеженні будівельної висоти прогонової будови – сталезалізобетонні арки.

За конструкцією головних балок найбільшого поширення набули типові сталезалізобетонні прогонові будови із застосуванням балок двотаврового і коробчастого перерізу. Одноплитні прогонові будови можуть складатися як з двох двотаврових балок (рис. 2, а), так і мати балочну конструкцію з багатьма балками в поперечному перерізі (рис. 2, б). Двотаврові балки можуть бути об'єднані поперечними балками в середньому і верхньому рівнях по висоті стінки. В такому випадку залізобетонна плита спирається або тільки на головні балки, або на площину, утворену поясами головних і поперечних балок відповідно [1, 2, 5].

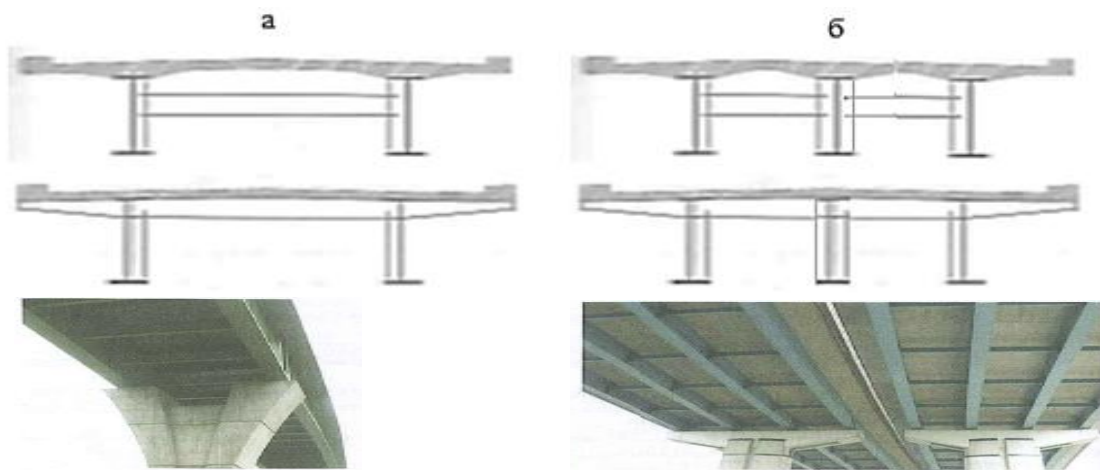


Рис. 2. Типові перерізи прогонових будов сталезалізобетонних мостів з двотавровими балками

Коробчасті прогонові будови можуть мати в поперечному перерізі одну (рис. 3, б) або дві і більше коробчастих балок (рис. 3, а) [1, 2].

Для зведення мостів на автомобільних дорогах високих категорій застосовуються сталезалізобетонні балки коробчастого перерізу зі збільшеними консолями залізобетонної плити (рис. 4). Плита оперта на пояси коробчастої балки і на поздовжні

балки, розташовані між стінками коробки і на консолях. Поздовжні балки підтримані підкосами [2, 3, 5].

Застосовується в сталезалізобетонних прогонових будовах коробчастого перерізу додаткове бетонування в прогоні і на опорах. Балка коробчастого перерізу з обетонуванням нижнього поясу називається подвійною сталезалізобетонною коробкою-балкою.

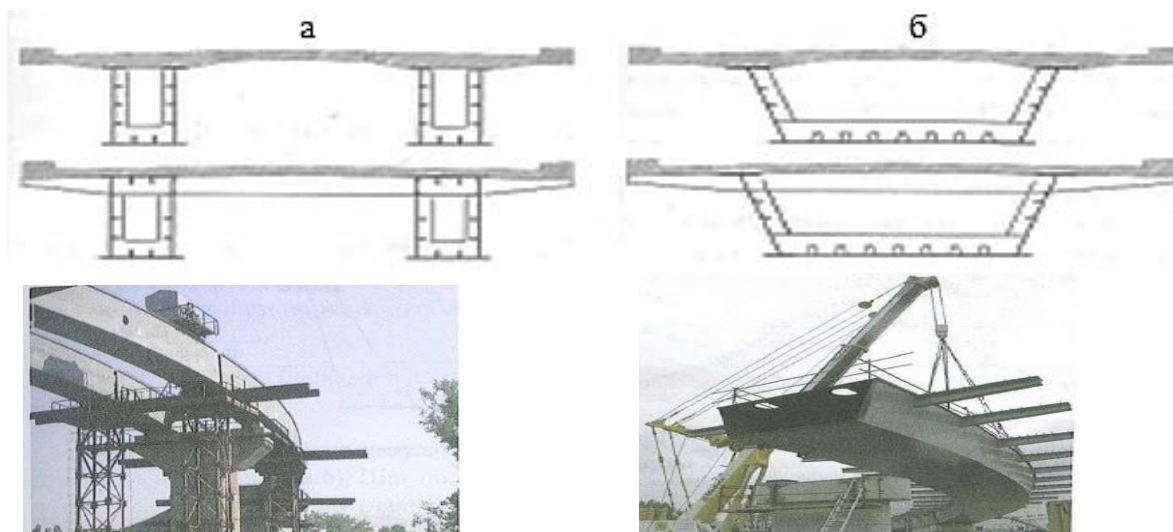


Рис. 3. Типові перерізи прогонових будов сталезалізобетонних мостів з коробчастими балками

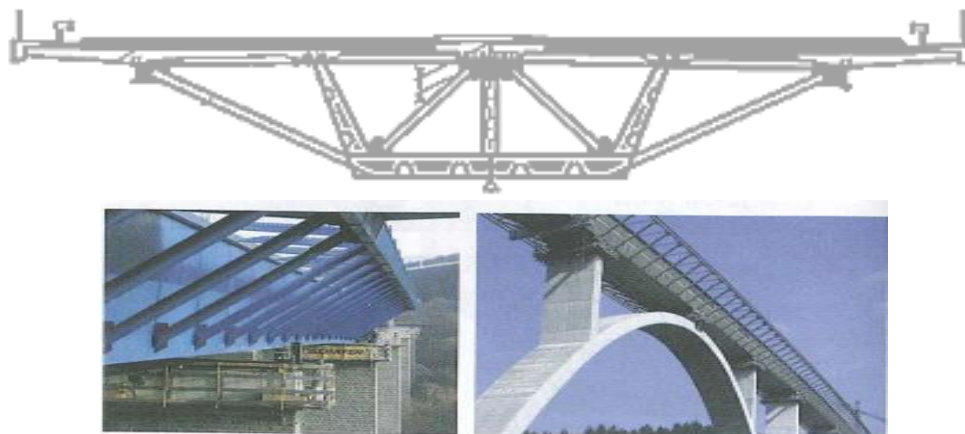


Рис. 4. Сталезалізобетонна балка коробчастого перерізу зі збільшеними консолями залізобетонної плити

Preflex-балки (рис. 5) – це прокатні балки із залізобетонною нижньою полицею. Особливість їх виготовлення полягає в попередньому вигині прокатної балки з наступним бетонуванням нижньої полиці.

Бетонна частина стиснута, таким чином, отримує попереднє напруження, що приводить до підвищення опору вигину і мінімального прогину балок при експлуатації моста [2].



Рис. 5. Сталезалізобетонні прогонові будови із застосуванням preflex-балок

За влаштуванням залізобетонної плити розрізняють прогонові будови із застосуванням монолітних і збірних залізобетонних плит. Кожен із запропонованих варіантів має як позитивні, так і негативні особливості. Зокрема, для бетонування монолітної плити необхідно влаштувати опалубку, виконувати на місці арматурні роботи та укладання бетону. Це робить процес зведення конструкцій більш трудомістким і потребує великих витрат часу порівняно зі збірними плитами, але забезпечує міцний зв'язок бетону з

упорами і повну монолітність плити. Значного поширення останніми роками набуває бетонування по незнімній опалубці, виконаній з профільованого листа. При застосуванні збірної плити значно прискорюються темпи будівництва. Основним недоліком є необхідність досягнення однакової міцності бетону плити і бетону ділянок омоноличування.

Одним з найважливіших питань розвитку сталезалізобетонних прогонових будов, у тому числі при малих та середніх прогонах, є зниження власної ваги,

зменшення витрат матеріалів та працевитрат під час монтажу конструкції. Різновидами полегшених металевих балок є

балки з використанням гофрованої (рис. 6) [6, 7] і перфорованої стінки (рис. 7) [8].



Рис. 6. Сталезалізобетонні прогонові будови коробчастого перерізу з гофрованими стінками

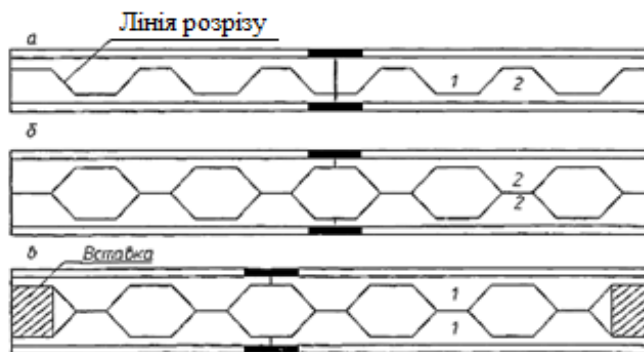


Рис. 7. Балки з перфорованою стінкою

Наскрізна балка, за рахунок збільшення своєї висоти, дає змогу перерозподілити матеріал перерізу, концентруючи його ближче до периферійних волокон, що істотно підвищує такі геометричні характеристики перерізу, як момент інерції і момент опору, а частина матеріалу стінки, близько 30–40 %, у центральній зоні безпечно для конструкції вилучається [9]. Двотаврові балки з перфорованою стінкою порівняно з прокатними забезпечують 20–30 % економії металу і дешевше останніх на 10–18 %. За трудомісткістю виготовлення вони на 25–30 % ефективніші, ніж зварні двотаврові балки за рахунок скорочення операцій

обробки і обсягу зварювання. При використанні таких конструкцій замість ферм економічний ефект досягається за рахунок зниження витрат металу і трудомісткості монтажу, поліпшення умов транспортування, зниження експлуатаційних витрат, високого рівня механізації процесу виготовлення.

Для зменшення витрат матеріалів і зниження власної ваги залізобетонної плити, її проектують полегшеною – пустотною або ребристою. При видаленні бетону з розтягнутої зони зберігають лише ребра, шириною, необхідною для розміщення зварних каркасів і забезпечення міцності панелей по похилому перерізу. При

цьому плита в прогоні між ребрами працює на вигин як балка таврового перерізу. Верхня полиця плити також працює на місцевий вигин між ребрами.

Одним з основних питань при проектуванні обговорюваних споруд є забезпечення раціонального розподілу ресурсу конструкції, що йде на сприйняття власної ваги і корисного навантаження. Не менш важливими є проблеми мінімізації часу і трудомісткості зведення споруди. Задовільнити перелічені вимоги та обмеження можна шляхом створення ефективної модульної конструкції сталезалізобетонної прогонової будови.

У зв'язку з вищесказаним, пропонується конструкція полегшеної сталезалізобетонної прогонової будови оболонкового типу [10, 11]. Конструкція складається з перфорованої металевої замкнутої оболонки і ефективної полегшеної залізобетонної плити проїжджої частини (рис. 8).

Металева частина прогонової будови виконана з поздовжніх металевих блоків коробчастого перерізу, об'єднаних в єдину просторову конструкцію за допомогою високоміцних болтів, розставлених з розрахунковим кроком по довжині прогону (рис. 9) і за рахунок залізобетонної плити проїжджої частини.



Рис. 8. Фрагмент запропонованої сталезалізобетонної прогонової будови

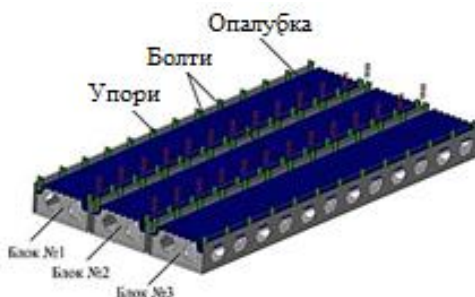


Рис. 9. Об'єднання блоків на високоміцних болтах

Металеві блоки (рис. 10) виготовляються з листових перфорованих елементів, виконаних за безвідходною технологією. До складу кожного блока входять дві головні балки, поперечні діафрагми і нижня пластина. Верхній пояс головних балок реалізований з улаштуванням горизонтальних полиць по всій довжині балок, що виконують функцію підтримувального елемента для залізобетонної плити. Об'єднання всіх конструктивних елементів в єдиний готовий

блок проводиться в заводських умовах за допомогою автоматичного зварювання, що у свою чергу дозволяє говорити про високу заводську готовність конструкції. Діафрагми блока виконані з гребінкою по верхній межі, на яку в подальшому укладається профільований сталевий лист, який є незнімною опалубкою для залізобетонної плити. Нерухомість листа в площині верхнього поясу конструкції забезпечується за допомогою болтів-саморізів і зв'язків зсуву.

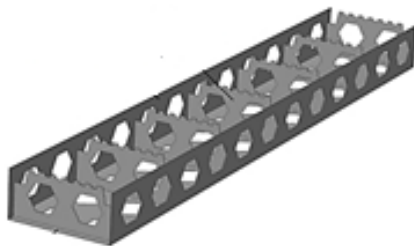


Рис. 10. Металевий блок СТЖБ прогонової будови

Для забезпечення спільної роботи металеві частини прогонової будови із залізобетонною плитою проїжджої частини було запропоновано нову систему дискретно-континуальних зв'язків зсуву (рис. 11). Система представлена у вигляді жорстких упорів, виконаних з відрізків двотаврової балки. Для сприйняття

розтягувальних напружень і перешкоджання відриву плити від металевих балок упори у двох рівнях, у поперечному і поздовжньому напрямках, об'єднані між собою арматурними стрижнями періодичного профілю, на які в подальшому укладаються арматурні сітки залізобетонної плити.

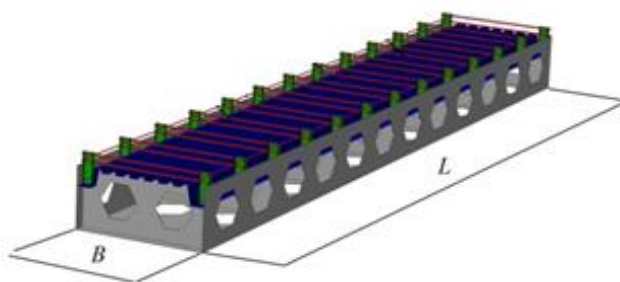


Рис. 11. Дискретно-континуальні зв'язки зсуву

Як залізобетонна плита проїжджої частини можуть бути використані ефективні полегшені плити. Основним принципом створення таких конструкцій є захоронення під час бетонування вкладишів певної форми і розмірів, виконаних з легких, недорогих матеріалів (наприклад пінополістирол). У результаті цього формується монолітна конструкція, яка складається з верхньої та нижньої обшивки, внутрішніх ребер жорсткості і вкладишів-пустотоутворювачів. Збільшення конструктивної висоти плити збільшує циліндричну жорсткість, зменшуючи при цьому витрати арматури та бетону.

Висновки:

1. Розглянуто найбільш розповсюджені конструкції сталезалізобетонних

прогонових будов мостів та варіанти їх полегшення за рахунок зменшення ваги несучих металевих елементів та залізобетонної плити проїжджої частини. Перспективним вбачається використання перфорованих несучих балок, що виготовляються за безвідходною технологією, та полегшених залізобетонних плит, що працюють сумісно завдяки використанню спеціальних зв'язків зсуву.

2. Надано конструкцію полегшеної сталезалізобетонної прогонової будови мостів малих та середніх прогонів, що передбачає використання перфорованих металевих балочних елементів та ефективної плити проїжджої частини із вкладишами-пустотоутворювачами. Таке рішення відрізняється певними позитивними

характеристиками: економія металу складає 20–30 % порівняно з балками суцільного перерізу, що дає змогу економити до 18 % коштів на їх виготовлення, а також знизити трудомісткість виготовлення на 25–30 %.

Водночас застосування пустотоутворювачів дозволяє на 30 % знизити власну вагу плити проїжджої частини та отримати економічний ефект у межах 15 % від сумарної вартості зведення плитної частини.

Список використаних джерел

1. Корнеев М. М. Сталежелезобетонные мосты: теоретическое и практическое пособие по проектированию. СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. 400 с.
2. Design and Evaluation of Steel Bridges with Double Composite Action / Sen Rajan, Stroh Steven, Pai Niranjana, Patel Purvik, Golabek Dennis. *Civil and Environmental Engineering Faculty Publications*. 2010. Paper 1. 498 p.
3. Patel Purvik. LRFD design of double composite box girder bridges. Graduate Theses and Dissertations. 2009. 122 p. URL: <http://scholarcommons.usf.edu/etd/2131> (last accessed: 25.09.2020).
4. Shmukler V., Babaev V. New constructive solutions for building of transport construction facilities. MATEC Web of conferences, 2017. Vol. 116. 02004. 19 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/318319368_New_constructive_solutions_for_building_of_transport_construction_facilities (last accessed: 25.09.2020).
5. Hallmark R., Collin P., Nilsson M. Prefabricated composite Bridges. *World Bridge Construction*. Moscow, Russia, 2010. № 2. P. 71-80.
6. Shear capacity of a novel joint between corrugated steel web and concrete lower slab / S. Wang, J. He, Y. Liu, C. Li, H. Xin. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 163. P. 360–375.
7. Лукин А. О., Суворов А. А. Пролётные строения мостов с гофрированными металлическими стенками. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2016. № 2. С. 46–60.
8. Сквозные балки пролетных строений автодорожных мостов / В. М. Картопольцев, А. В. Картопольцев, Е. В. Балашов, А. Г. Боровиков. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. 136 с.
9. Круль Ю. Н. Сталежелезобетонное пролетное строение нового типа: дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / Круль Юрий Николаевич. Харьков, 2015. 260 с.
10. Efficient construction of the motorway and highway bridge superstructure (experimental studies) / V. Babayev, M. Bekker, V. Shmukler etc. MATEC Web of conferences, 2017. Vol. 116. 02003. URL: https://www.researchgate.net/publication/318319179_Efficient_construction_of_the_motorway_and_highway_bridge_superstructure_experimental_studies (last accessed: 25.09.2020).
11. Rational Design of Structural Building Systems / V. Babaev, I. Ievzerov, S. Evel etc. DOM publishers, Berlin/Germany. 2019. 384 p. URL: <https://dom-publishers.com/collections/handbuch-und-planungshilfe/products/rational-design-for-structural-building-systems>.

Каплін Роман Борисович, завідувач сектора лабораторії будівельно-технічних досліджень Національного наукового центру «Інститут судових експертиз ім. Засл. проф. М. С. Бокаріуса», здобувач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. E-mail: cc33cc22@ukr.net.

Roman Kaplin, head of the sector of the of construction and technical research laboratory of the National Research Center «Hon. Prof. M.S. Bokarius Kharkiv Research Institute of Forensic Examinations», postgraduate student, Building Structures department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: cc33cc22@ukr.net.

Статтю прийнято 12.10.2020 р.