

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

КАПЛІН РОМАН БОРИСОВИЧ



УДК 692.522.8

**БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНИХ
ПАРАМЕТРІВ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПРОЛІТНИХ БУДОВ
МОСТІВ ПРИ РЕКОНСТРУКЦІЇ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті міського господарства імені О.М. Бекетова Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук

Круль Юрій Миколайович

Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова,
Міністерства освіти і науки України,
старший викладач кафедри будівельних
конструкцій

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Кожушко Віталій Петрович,

Харківський національний автомобільно-
дорожній університет
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри мостів, конструкцій та
будівельної механіки

кандидат технічних наук, професор

Чеканович Мечислав Геннадійович

Херсонський державний аграрно-
економічний університет
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри будівництва

Захист відбудеться «12» травня 2021 р. о 14⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.820.02 Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7 та на сайті університету: <http://kart.edu.ua>.

Автореферат розісланий «12» квітня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
канд. техн. наук, доцент



О. В. Лобняк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розробка архітектурно-будівельних систем, а також методів їх проектування була і залишається досить актуальною проблемою будівельної галузі. При цьому, цілком очевидно, що сучасний стан речей вимагає створення і експлуатації нових підходів до принципів пошуку структури штучних споруд.

Як наслідок, при створенні пропонованих систем може бути використаний не традиційний підхід з перевіркою апріорі заданих рішень, а прямий, який ґрунтується на формулюванні критеріїв і обмежень, на безлічі яких проводиться конструювання.

У більшості розвинених країн світу сталезалізобетонні конструкції знаходять, поряд із залізобетонними та металевими прогоновими будовами, досить широке застосування. Вимога мінімізації власної ваги конструкцій призвела до застосування в світовому мостобудуванні, в тому числі, балок з перфорованою стінкою. Витрата металу в таких балках на 20-30% менше, ніж в звичайних прокатних балках, при одночасному зниженні вартості на 10-18%. Тим не менше, відомі рішення дозволяють отримувати перфоровані елементи з регулярним кроком та розмірами отворів. Однак, найбільший ефект може бути досягнутий при формуванні конструкцій що мають нерегулярні (довільні) розміри та крок отворів. Крім того, відсутність єдиного науково-обґрунтованого підходу обліку спільної роботи просторових наскрізних балок з залізобетонною плитою позначає досить широке коло проблем, що мають місце в цьому випадку. З вищесказаного випливає необхідність і доцільність розробки методики прямого проектування перфорованих коробчастих профілів і створення на їх базі раціональної конструкції сталезалізобетонних прогонових будов мостових переходів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота є частиною досліджень, які виконуються в рамках функціонування наукової школи «Конструкції і матеріали для житлових і громадських будівель» Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова, а також держбюджетної теми «Розробка та дослідження нової конструктивної системи багатокритеріальної відповідності» (ДР№0115U000154).

Мета дослідження – розробка наукових підходів удосконалення конструкцій прогонових будов мостів у вигляді сталезалізобетонних оболонкових систем.

Задачі дослідження:

- обґрунтування ефективності і адаптація біоенергетичного методу оптимізації для поліпшення конструкції прогонової будови з метою надання їй позитивних фізико-геометричних характеристик;
- формування та обґрунтування принципів конструювання, з урахуванням технологічної послідовності розкрою, перфорованих металевих елементів, що мають нерегулярні (довільні) розміри та крок отворів;
- побудова скінченно-елементної моделі раціоналізованої прогонової будови та на її основі дослідження напружено-деформованого стану (НДС) конструкції в цілому і окремих її елементів, з урахуванням специфіки роботи матеріалів та зв'язків, а також впливу структурних особливостей, що мають місце в конструктивах подібного типу;

- проведення натурних експериментальних досліджень НДС раціоналізованої конструкції при дії статичних та динамічних навантажень;
- оцінка економічної ефективності запропонованої конструкції та впровадження результатів дисертаційного дослідження в практику будівництва.

Об'єкт дослідження – трансформування напружено-деформованого стану при раціоналізації сталезалізобетонної прогонової будови автодорожніх мостів полегшеного типу, що складається з перфорованих металевих блоків коробчастого перетину та ефективної залізобетонної плити проїзної частини.

Предмет досліджень – вплив розмірів та кроку отворів перфорованих металевих елементів на компоненти НДС сталезалізобетонної прогонової будови.

Методи дослідження. У роботі використані аналітичні та чисельні методи механіки деформованого твердого тіла, в тому числі, метод скінченних елементів. Побудову конструктивних рішень реалізовано на основі біоенергетичного методу, експлуатація якого відображає процедуру вибору раціональних параметрів конструктиву. Натурне експериментальне дослідження прогонової будови проведено з використанням сучасного інформаційного та вимірювального обладнання, що має сертифікати відповідності.

Наукову новизну складають:

вперше:

- запропоновані теоретичні і конструктивно-технологічні підходи формування раціональної структури (форма і зміст) перфорованих металевих елементів, що мають нерегулярні (довільні) розміри та крок отворів;
- виконана оцінка впливу нерегулярної конфігурації перфорованих елементів на компоненти напружено-деформованого стану прогонових будов в умовах багатокритеріальності;
- отримано результати експериментального натурального дослідження напружено-деформованого стану сталезалізобетонної прогонової будови з регульованими параметрами при дії статичних та динамічних навантажень.

Набуло подальшого розвитку:

- процедура SE-моделювання НДС сталезалізобетонної прогонової будови з раціональними параметрами;
- процедура визначення раціональної геометрії перфорованих металевих елементів за критерієм мінімізації витрат матеріалу в умовах декількох навантажень.

Практичне значення полягає у впровадженні в практику будівництва конструкції прогонової будови, а також методики розрахунку і проектування сталезалізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів, що мають раціональні характеристики. Результати роботи впроваджено при ремонті сталезалізобетонного мосту через р. Липчик в п. Липці на а/д С-212570 та при реконструкції моста по вул. Леніна через р. Сухий Торець в м. Барвінкове. Харківської області.

Особистий внесок:

Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно, а саме:

- вдосконалено конструкцію сталезалізобетонної прогонової будови, яка первісно має позитивні експлуатаційні властивості і високу технологічність при виготовленні;

- розроблено і обґрунтовано методику формування перфорованих елементів з регульованими параметрами;
- побудовані скінченно-елементні моделі та на їх основі проведено аналіз напружено-деформованого стану сталезалізобетонної прогонової будови;
- проведено натурні експериментальні дослідження напружено-деформованого стану сталезалізобетонної прогонової будови;
- виконано впровадження результатів дисертаційної роботи, включаючи економічну оцінку запропонованого рішення.

Окремі положення досліджень виконані у співавторстві, відображені в переліку наукових публікацій.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися та одержали позитивні оцінки на всеукраїнських та міжнародних науково-практичних конференціях: VI-й міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті», Харків (19-21 квітня 2017р.); VII Міжнародній науковій конференції «Технології та інфраструктура транспорту», Харків (14-16 травня 2018р.); 10th international conference on applied mechanics, Bydgoszcz, Poland (28 November, 2018); Всеукраїнській науково-практичній інтернет конференції «Мости, тунелі і дороги: стан, проблеми утримання та перспективи підвищення довговічності», Харків (25 травня 2018р.); I-й міжнародній науково-технічній конференції «Транспортні споруди: стан, проблеми збереження, ремонт», Харків, (15 листопада 2019р.).

Публікації. Основні положення і результати дисертаційної роботи опубліковано в 10 наукових працях, з яких 3 статті у наукових фахових виданнях, рекомендованих МОН України, 2 статті у міжнародних періодичних виданнях, що включені до наукометричної бази Scopus, 4 публікації апробаційного характеру, з яких 1 у виданні, що включено до наукометричної бази Scopus, 1 патент на корисну модель.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел зі 134 найменувань та 7 додатків. Повний обсяг дисертації складає 198 сторінок, у тому числі 132 сторінки основного тексту.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дисертаційного дослідження, позначено наукову новизну, практичне значення та методи дослідження. Крім того, надана інформація про особистий вклад здобувача, апробацію роботи, її структуру, обсяг та публікації за темою.

У першому розділі розглянуто класифікацію, загальні характеристики і конструктивні особливості найбільш поширених сталезалізобетонних (СТЗБ) прогонових будов мостів. Позначені основні переваги і недоліки даних систем з урахуванням їх конструктивних особливостей. Розглянуті конструкції деталей поєднання металевої та залізобетонної частини конструкції. Також проаналізовано досвід застосування полегшених ефективних металевих і залізобетонних елементів у вигляді перфорованих балок та залізобетонної плити з пустотоутворювачами.

Виконано аналіз наявних теоретичних та експериментальних досліджень, що присвячені питанням оцінки напружено-деформованого стану конструкцій, які розглядаються в роботі. Зокрема, вивченню сталезалізобетонних конструкцій і їх елементів присвячені праці таких дослідників, як А.Я. Барашиков, Г.Л. Ватуля, О.В. Нижник, О.В. Семко, В.Ф. Снітко, Л.І. Стороженко, В.М. Тимошенко, Е.Д. Чихладзе, О.Л. Шагін, В.С. Шмуклер, R.M. Miller Usdan, S. De Silva, D.P. Thambiratnam, P.H. Ziehl, R.D. Call, J.M. Bodemar, T.J. Fowler, M.A. Issa, P. Craig, T. Alkhradji та ін. В області мостобудування, вагомий внесок у розвиток сталезалізобетонних конструкцій внесли Є.І. Беленя, В.В. Бірюльов, М.М. Бичковський, С.Р. Володимирський, Е.Е. Гибшман, Е.М. Гитман, П.П. Єфімов, М.М. Жербін, С.А. Ільясевич, В.М. Картопольцев, В.П. Кожушко, А.І. Лантух-Лященко, Я.Д. Лівшиць, Б.П. Назаренко, Е.О. Патон, М.І. Поліванов, А.О. Потапкін, К.С. Роккі, В.О. Російський, М.М. Стрілецький, S.S. Badie, J.R. Casas, W.K. Cheng, N.F. Grace, A.E. Naaman, A.M. Okeil, T.R. Udland, F.V. Ulloa, R.D. Medlock, R. Anderson, T. Domagalski, S. Asfour та інші. Задачі регулювання та управління конструктивними параметрами конструкцій розглянуті в роботах Абовського Н.П., Белені Є.І., Белмана Р., Бірюльова В.В., Бондаренко В.М., Василькова Г.В., Віноградова О.І., Городецького О.С., Канторовича Л.В., Перельмутера А.В., Пічугіна С.Ф., Ржаніціна О.Р., Тимошенко С.П., Феодос'єва В.І., Шмуклера В.С. і багато інших.

Незважаючи на глибоке та детальне вивчення проблеми, актуальними залишаються питання зниження власної ваги конструкції, відмова від монтажного зварювання, зниження працевитрат при виготовленні та монтажі конструкції. Не менш важливим також є питання раціонального розподілу часток несучої здатності конструктиву, які йдуть на сприйняття власної ваги та корисного навантаження. Це спонукає до розробки нових, ефективних полегшених модульних конструкцій сталезалізобетонних прогонових будов мостів, що відрізняються високою технологічністю.

Оцінка теоретичних і експериментальних результатів, наведених в відомих дослідженнях, підтверджує той факт, що зазначені конструкції представляють значний інтерес для сучасної будівельної галузі. Ґрунтовний аналіз наявної інформації, дозволив визначити невирішені, але актуальні питання, і, як наслідок, сформулювати основні задачі дисертаційного дослідження.

У другому розділі розглянуті конструктивно-технологічні особливості просторової двокомпонентної системи автодорожніх мостів, що складається з перфорованих металевих блоків та монолітної ефективної залізобетонної плити проїзної частини (рис.1).

В якості основних несучих елементів прогонової будови застосовано металеві блоки коробчастого перерізу. До складу блоку входять дві головні балки, поперечні діафрагми і нижня пластина. Всі елементи блоку представлені у вигляді перфорованих пластин, виготовлених за безвідходною технологією. На відміну від існуючих рішень, всі елементи блоку представлені у вигляді перфорованих пластин з нерегулярними розмірами та кроком отворів.

Забезпечення спільної роботи металевої перфорованої частини прогонової будови з залізобетонною плитою виконано за рахунок системи дискретно-континуальних зв'язків зсуву (рис. 2).

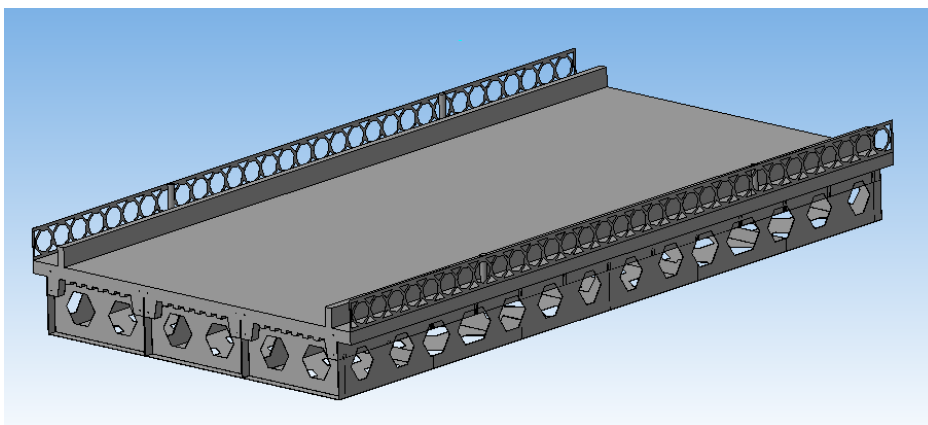


Рис.1. Фрагмент розглянутої сталезалізобетонної прогонової будови мосту.

До складу системи зв'язків зсуву входять, балки двотаврового перерізу, поєднані між собою в повздовжньому та поперечному напрямках арматурними стрижнями періодичного профілю. На стрижні, в подальшому, вкладаються арматурні сітки, які виконують функцію конструктивної арматури залізобетонної плити. Головною відмінністю запропонованої системи від існуючих рішень є те, що залізобетонна плита не передбачає наявності металевого опорного елемента.

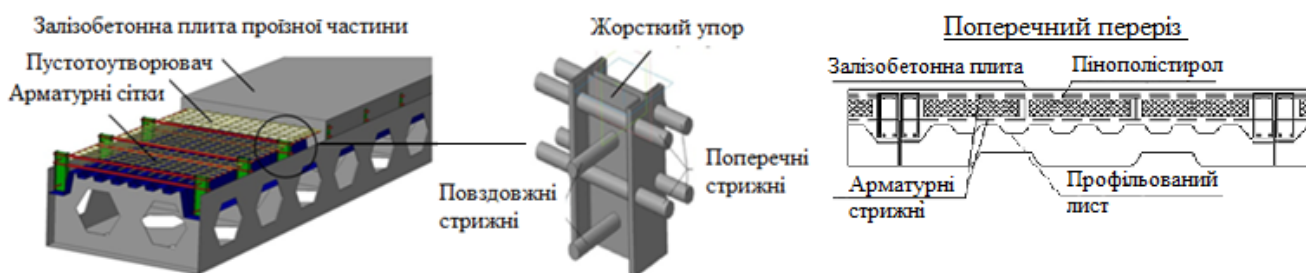


Рис.2. Загальний вигляд системи дискретно-континуальних зв'язків зсуву та ефективної залізобетонної плити.

На діафрагми, що виконані з гребінкою по верхньому краю, вкладається профільований сталевий лист, який в подальшому є незмінною опалубкою для залізобетонної плити. Проїзна частина представлена у вигляді полегшеної залізобетонної ефективної плити. Верхня, нижня обшивки плити та ребра виконані із залізобетону, а інша її частина, за висотою, заповнена пінополістирольними вкладишами. Збільшення конструктивної висоти збільшує циліндричну жорсткість плити, зменшуючи витрати арматури та бетону. Поперечний переріз плити показано на рисунку 2.

З огляду на складний характер напружено-деформованого стану перфорованих елементів, виправданим є перехід до прямого методу формування параметрів конструктиву, мета якого полягає в формулюванні критеріїв і обмежень, в основі яких проводиться конструювання і вибір оптимальної конструкції.

При цьому, за доцільне для побудови рішення є використання нового біоенергетичного методу, заснованого на енергетичних принципах, а саме:

– твердження про те, що для регульованих систем, з постійним об'ємом матеріалу, числом зовнішніх і внутрішніх зв'язків під дією статичної

навантаженням - власної ваги, потенційна енергія деформації (ПЕД) після перебудови досягає нижньої межі, на раціональному об'єднанні величин геометричних параметрів:

$$U = \inf_{\alpha} U(\alpha^k), k = 1, 2, \dots, \infty, \quad (1)$$

де U – потенційна енергія деформації; k – номер варіанта порівняння; $\alpha \in M$; M – безліч допустимих значень зовнішніх геометричних параметрів;

– вимоги ізоенергетичності стану системи, тобто такого стану, при якому:

$$e[\{\bar{x}\}] = \text{const}, \quad (2)$$

де e – щільність потенційної енергії деформації (ЩПЕД); $\{\bar{x}\}$ - вектор внутрішніх параметрів.

Побудова енергетично рівномірної конструкції можлива при такому розподілі матеріалу, коли нормоване значення ЩПЕД задано у вигляді:

$$e_n = \gamma \cdot e_u \quad (3)$$

де e_u – граничне значення ЩПЕД; $\gamma \in (0,1)$ – статистично обґрунтований параметр.

Для визначення граничної ЩПЕД використано критерій Василькова-Шмуклера, представлений у вигляді:

$$e_u = 0.5\chi_\varepsilon^2[(\chi_\varepsilon + 1)e_{cu} + (\chi_\varepsilon - 1)e_{tu}] + (1 - \chi_\varepsilon^2)e_{shu} \quad (4)$$

де $\chi_\varepsilon = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1$ – параметр Надаї-Лоде напруженого стану; e_{cu}, e_{tu}, e_{shu} – парціальні ЩПЕД для деформацій стиску, розтягу та зсуву.

В роботі розглянута процедура побудови енергетично рівномірної завантаженої балки прямокутного перерізу (рис. 3) та пошуку мінімальної висоти перерізу при постійній ширині.

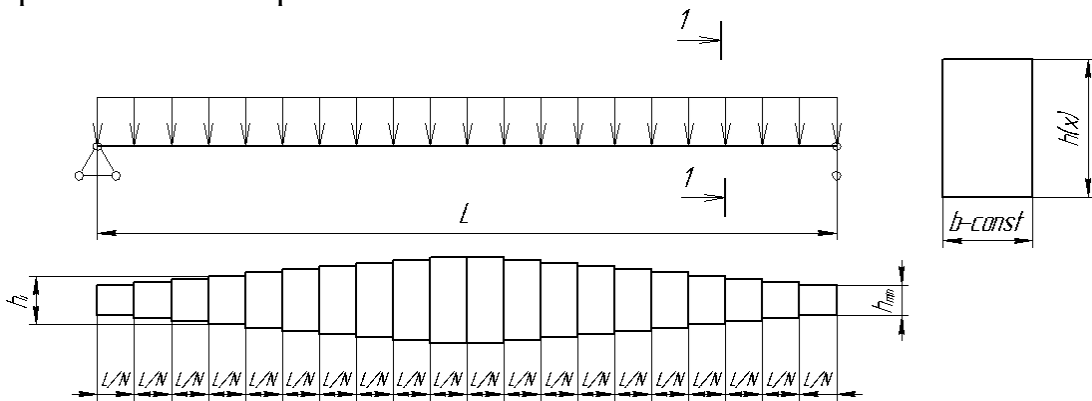


Рис. 3. Раціональна балка зі змінною висотою перерізу.

Як відомо, висота енергетично рівномірної завантаженої балки дорівнює:

$$h(x) = \sqrt[4]{\frac{18M^2(x)}{b^2 \cdot E_i \cdot \gamma \cdot e_u}} \quad (5)$$

де M – максимальний згинаючий момент в перерізі; b – ширина перерізу; E_i – січні модулі.

Як відомо на мостові споруди в процесі експлуатації діє цілий комплекс навантажень і впливів, що породжує багатокритеріальність проблеми, що розглядається. Багатокритеріальність, в свою чергу, є особливістю при практичному проектуванні. Ігнорування цієї обставини зводить до нуля ефект знайденого оптимального розв'язку відповідного єдиному введеному критерію. З іншого боку, задача з одним критерієм можлива лише в поодиноких випадках. Використана концепція, що базується на регулюванні щільності потенційної енергії деформації, істотно розширює можливості побудови оптимального рішення, але при цьому в значній мірі залежить від конкретного завантаження конструкції. Таким чином, пошук раціональних рішень в умовах різноманіття критеріїв необхідний, проте, пов'язаний з великими обчислювальними труднощами. Тому пропонується алгоритм наближеного розв'язку цієї задачі. У зв'язку з чим, розшукується рішення, яке передбачає використання алгоритму, запропонованого В.С. Шмуклером, у вигляді побудови критерію-компромісу.

Суть його полягає в наступному. Послідовно отримується розв'язок всіх окремих задач оптимізації чи регулювання. Тобто, при одних і тих же заданих обмеженнях розшукується екстремум кожного сформульованого критерію. При цьому, для екстремального значення розглянутого критерію визначаються відповідні величини інших. Окрім того, вважаючи критерії рівняннями, шляхом перебору керуючих параметрів, що належать до області допустимих рішень, визначаються їх не екстремальні (проміжні) значення. Такий підхід, в якому критерії розглядаються як координати, дає можливість побудови області G , в межах і на кордоні якої виконуються всі обмеження задач. Ця область має характерні точки, в яких відповідний критерій приймає екстремальне значення.

Дотримуючись запропонованого підходу, в якому розв'язком для випадку рівнозначних критеріїв приймається $R(\vec{X}_0)$ на поверхні G , рівновіддалена від характерних точок. У загальному випадку точка $R(\vec{X}_0)$ або вектор r розшукується з урахуванням «вагових» коефіцієнтів. Під рівновіддаленою розуміється точка $R(\vec{X}_0)$, сума відстаней від якої до всіх характерних точок має найменше значення.

Отже, для $R(\vec{X}_0)$ має сягати мінімуму функція

$$Z(x_0) = \sum_{k=1}^N \gamma_k [\sum_{L=1}^N (X_{kL} - X_{LR})^2]^{\frac{1}{2}} \rightarrow \inf \quad (6)$$

де N – кількість характерних точок; X_{kL} – L -та координата k -ої характерної точки; X_{LR} – L -та координата шуканої точки; γ_k – «ваговий» коефіцієнт.

А необхідні умови існування (6) задаються системою N нелінійних рівнянь:

$$Z'(x_0) = 0, \quad (7)$$

$$Z(x_0) = 2 \sum_{k=1}^N \gamma_k \frac{(X_{kL} - X_{LR})}{[\sum_{L=1}^N (X_{kL} - X_{LR})^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

У виразі (6) в запропонованому підході у ролі координат виступають розміри та крок отворів. Точний розв'язок (6) неможливий, але можна говорити про наближений.

Припустимо, що запропонована конструкція перфорованого елемента характеризується деякими зовнішніми і внутрішніми параметрами. Запишемо вектор керуючих параметрів для перфорованого фрагменту:

$$\{X\}^T = \{h, h_f, t, b, \alpha\} \quad (9)$$

де h - висота перерізу; h_f – висота отвору; t - товщина елемента; b – горизонтальна лінія різку прокатного профілю; α – кут нахилу похилої лінії різку.

Виходячи з того, що для мостових конструкцій виконання перфорованих елементів різної висоти та елементів постійної висоти, з різною висотою отворів, неможливо, варіюваними параметрами залишаються ширина та крок отворів.

Для чисельного аналізу впливу розмірів та кроку отворів розглянуто статично визначену симетрично завантажену балку з ексклюзивною геометрією та кроком отворів. В якості інструментарію був обраний функціонуючий на основі методу скінченних елементів програмний комплекс «Ліра» версії 10.6. В роботі прийняті наступні гіпотези:

- мінімальна довжина горизонтальної лінії різку складає 250мм;
- мінімальна довжина опорної перемички складає 400мм;
- варіювання параметрів різку виконується таким чином, щоб отримані балки мали однакову довжину.

У якості першої, розглянута задача про вплив конфігурації та кроку отвору на величину ПЕД та прогинів елемента. Для вирішення поставленого завдання було розглянуто 5 варіантів перфорованих балок, що мають однаковий об'єм матеріалу. Перший варіант перфорованої балки має регульований крок отворів, в інших чотирьох розглянуто різноманітне розташування отворів різної ширини стосовно один до одного (рис. 4). Для кожної балки задані ексклюзивна геометрія та крок отворів. В якості навантаження було прийнято рівномірно-розподілене навантаження $g = 10\text{кН}$. Результати розрахунків наведені в табл. 1.

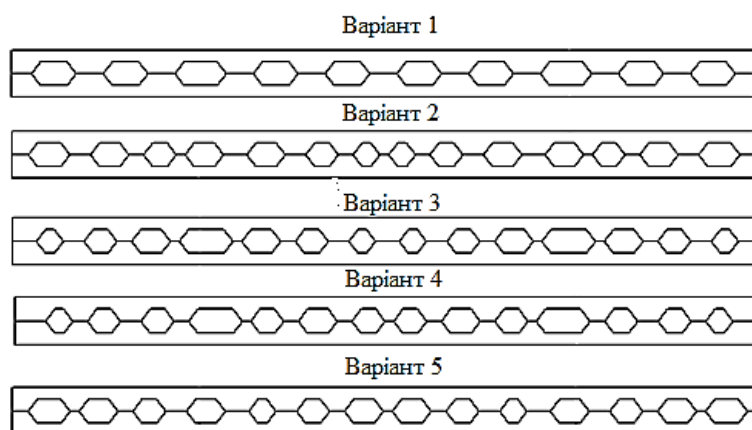
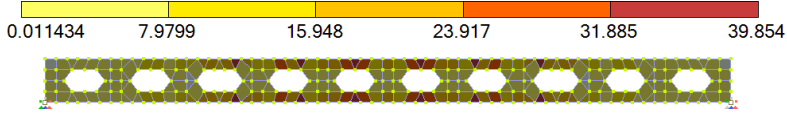
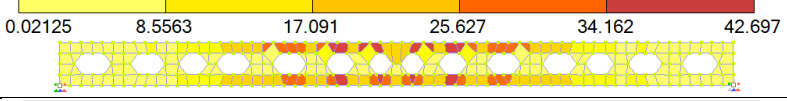
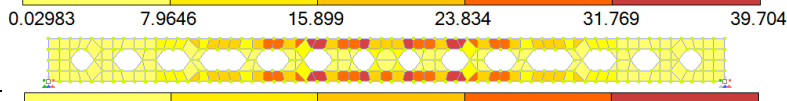
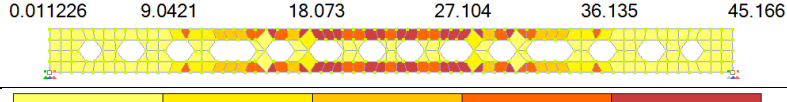
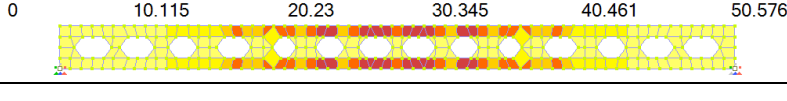


Рис. 4. Розглянуті варіанти конфігурації балок з ексклюзивною топологією та кроком отворів.

За результатами наведеними у таблиці 1, видно, що найменші значення ПЕД та прогинів відповідають третьому варіанту, в якому найбільші за шириною-отвори з меншим кроком між собою розташовані в чвертях прогону, а найменші отвори зі збільшеним кроком розташовуються в середині прогону та на припорних ділянках (рис. 5).

Значення компонентів НДС

№ вар-ту	Конфігурація балки (ЩПЕД)	Значення ПЕД, кН·м	Прогини, мм
1		28.03×10^{-2}	12.35
2		29.04×10^{-2}	12.5
3		27.22×10^{-2}	12.09
4		29.60×10^{-2}	12.49
5		29.65×10^{-2}	12.60

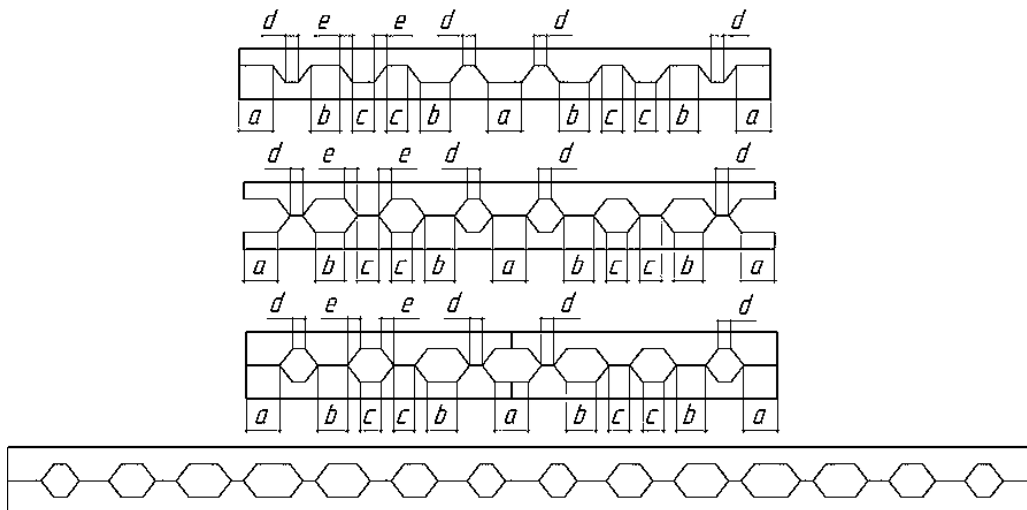


Рис. 5. Квазіенергетично рівномічна перфорована пластина.

На другому етапі розрахунків за основу був взятий третій варіант різі профілю, в якому почергово змінювались розміри горизонтальних ліній різі. Параметри змінювались таким чином, щоб в результаті отримані перфоровані елементи мали однакову довжину. Метою дослідження було встановлення впливу розміру та кроку отворів на величину ПЕД та прогинів елементу в умовах багатокритеріальності. Розглянуто 4 варіанти перфорованих балок, в яких мінімальний розмір горизонтальної лінії різі склав 250, 300, 350 та 400мм. В якості навантаження розглянуті наступні схеми: 1 – рівномірно-розподілене навантаження; 2 – зосереджена сила в середині прогону; 3 – зосереджена сила в чверті прогону. Результати розрахунків наведені в табл. 2.

Для кожного з варіантів різі та для кожного навантаження були отримані значення ПЕД, прогини та щільність ПЕД. На рисунку 6 показані графіки зміни ПЕД для кожного варіанту виконання перфорованих балок в залежності від характеру навантаження.

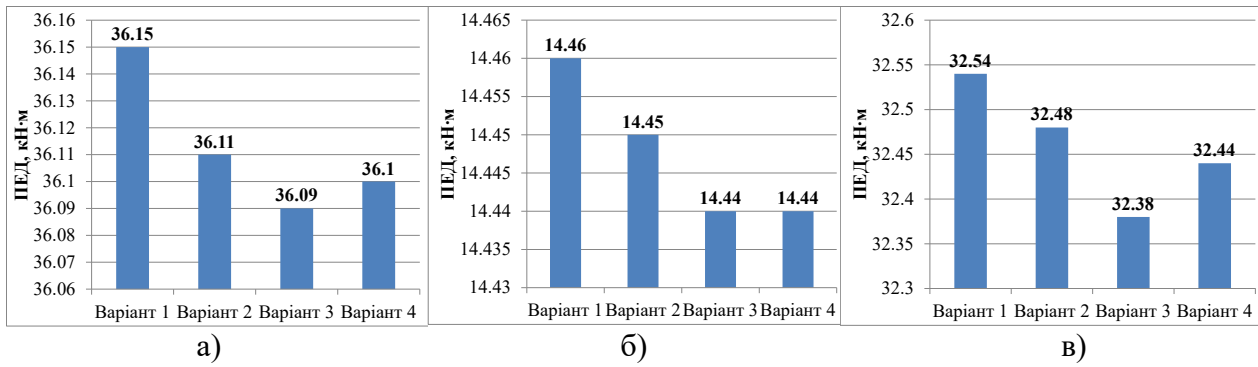


Рис. 6. Значення ПЕД для варіантів виконання перфорованих елементів:
а) навантаження №1; б) навантаження №2; в) навантаження №3

Таблиця 2

Значення компонентів НДС

№ вар-ту	Схема	Конфігурація балки (ЩПЕД)	Значення ПЕД кН·м	Прогини мм
1	1		$36.15 \cdot 10^{-3}$	19.2
	2		$14.46 \cdot 10^{-2}$	38.5
	3		$32.54 \cdot 10^{-4}$	5.8
2	1		$36.11 \cdot 10^{-3}$	19.2
	2		$14.45 \cdot 10^{-2}$	38.4
	3		$32.48 \cdot 10^{-4}$	5.86
3	1		$36.09 \cdot 10^{-3}$	19.4
	2		$14.44 \cdot 10^{-2}$	38.8
	3		$32.38 \cdot 10^{-4}$	5.9
4	1		$36.10 \cdot 10^{-3}$	19.38
	2		$14.44 \cdot 10^{-2}$	38.75
	3		$32.44 \cdot 10^{-4}$	5.9

Важливим також є запропонована безвідхідна технологія виготовлення енергетично рівномірних елементів, що досягається за рахунок зміни розмірів отворів та їх кроку по всій довжині балок. Суть його полягає в наступному, для виготовлення полегшеної балки використовують дві балки прокатного профілю. Вертикальні стінки прокатних балок розрізають ідентичним, симетричним, щодо середньої лінії балок, різом на чотири напівбалки. Однакові напівбалки стикують по виступах і зварюють. В результаті, отримують дві перфоровані балки, одна з яких має закриті торці, а друга – відкриті. Напівбалки з закритими кінцями розрізають навпіл та стикують розрізаними торцями з двох сторін з перфорованою балкою з відкритими торцями зварюючи між собою у готову балку.

Для визначення ефективності застосування залізобетонної плити запропоновано в рамках зазначеного конструктивного рішення запропонований алгоритм визначення оптимальної висоти перерізу прогону і впливу залізобетонної плити на висоту металевої частини конструкції. Для чого, з оболонки сталезалізобетонної прогонової виділяється фрагмент, який представляє собою металеву перфоровану двотаврову балку з ефективною залізобетонною плитою на верхній полиці балки (рис. 7).

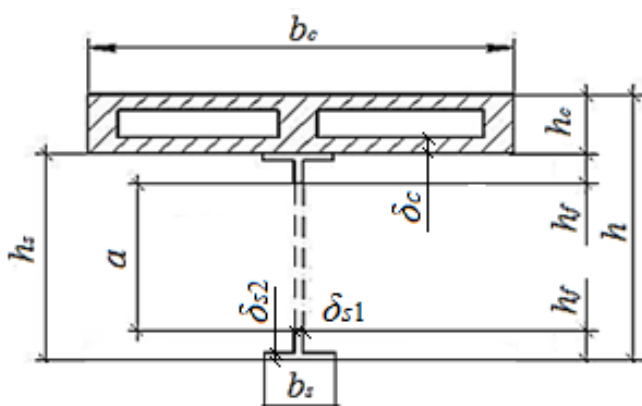


Рис. 7. Поперечний переріз фрагмента прогонової будови.

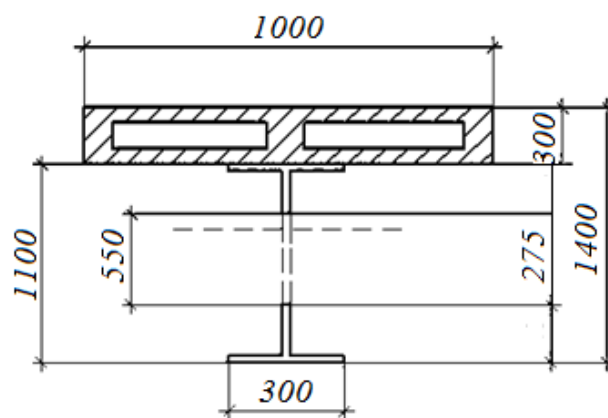


Рис. 8. Остаточний фрагмент сталезалізобетонної прогонової будови.

В ході розрахунків приймаємо деякі припущення:

- запропонована система упорів забезпечує спільну роботу металевої та залізобетонної частин перетину, що дозволяє розглядати запропонований фрагмент як єдине ціле;
- в граничному стані приймається, що залізобетонна частина перетину знаходиться в стислій зоні, а металева частина - в розтягнутій. Тим самим припускається, що нейтральна вісь проходить по межі з'єднання металевої балки із залізобетонною плитою.

Вирішення поставленої задачі проводиться за наступним алгоритмом:

- розглядаючи металеву двотаврову балку визначаємо мінімальну висоту балки з умов необхідної жорсткості та визначаємо її геометричні характеристики;
- далі розглядаємо сталезалізобетонний переріз фрагменту (для спрощення розрахунків ефективну залізобетонну плиту замінюємо залізобетонною плитою наведеної товщини);

- на наступному етапі обчислень виконується приведення конструктиву до єдиного матеріалу (експлуатується метод редуційних коефіцієнтів). З огляду на те, що металева балка і переріз з еквівалентною складовою, що відображає залізобетонну плиту, вважаємо еквівалентними, вони повинні мати однакову жорсткість, тобто повинна виконуватися умова:

$$J_1 = J_2^{red} \quad (10)$$

де J_1 – момент інерції металевого перерізу; J_2^{*red} – момент інерції перерізу з еквівалентною складовою, що відображає залізобетонну плиту.

Так само має виконуватися умова по несучій здатності розглянутих перерізів:

$$\frac{M_U}{M_{US}} \geq 1 \quad (11)$$

де M_U – несуча здатність перерізу з еквівалентною складовою залізобетонної плити; M_{US} – несуча здатність металевої балки.

У разі невиконання однієї з умов (10) і (11), відбувається поступове збільшення товщини залізобетонної плити до тих пір, поки кожна з умов не виконуватиметься.

Як приклад наведемо розрахунок фрагменту сталезалізобетонної прогонової будови. Вважається, що даний фрагмент конструкції має свідомо обумовлені параметри, а саме:

- довжину прольоту 24м;
- допустимий прогин конструкції 1/400;
- залізобетонну частину перерізу, виконану з бетону класу С30/35;
- металеву частину перерізу, виконану зі сталі марки 15ХСНД;
- ребра жорсткості товщиною 100мм розставлені з кроком 1м;
- верхню і нижню обшивки з товщиною рівною 50мм;
- полиці двотаврової балки шириною 300мм і товщиною 14 мм;
- стінку двотаврової балки товщиною 12мм;

Отриманий поперечний переріз прогону показано на рис. 8.

Побудовано алгоритм формування ефективної сталезалізобетонної конструкції дозволяє зменшити висоту металевою балки в 1.8 рази, в порівнянні з суцільнометалевою балкою. При цьому, вага сталезалізобетонної конструкції (погонний метр) на 35% менше, ніж звичайної металевої перфорованої двотаврової балки. Економічний ефект викликаний різницею вартості залізобетону (близько 1300 грн/м³) і металу (близько 2500 грн/т). З огляду на те, що ціна на залізобетон значно менше, різниця у вартості конструкцій становить близько 40%. За рахунок включення в роботу ефективної залізобетонної плити з'являється можливість знизити напруження, що виникають в металевій частині перерізу і, як наслідок, певною мірою розвантажити металеву балку.

З метою перевірки запропонованого рішення задачі були побудовані розрахункові моделі в ПК «Ліра 10.6», фундованого методом скінченних елементів (МСЕ). Результати розрахунків представлені в табл. 3.

Результати розрахунків

Параметр	Модель 1	Модель 2
Максимальне значення потенційної енергії деформації U , кН·м	$25.05 \cdot 10^{-2}$	$24.02 \cdot 10^{-2}$
Максимальний прогин Δ , мм	5.736	5.730
Максимальне напруження N_x , МПа	17.16	15.79
Максимальне напруження N_y , МПа	46.29	45.40
Максимальне напруження τ_{xy} , МПа	27.56	26.56
Перша частота власних коливань, Гц	10	12

Третій розділ присвячений аналізу напружено-деформованого стану розглянутої в роботі конструкції. Чисельне дослідження проводилося за двома розрахунковими схемами прогонових будов, що складаються з трьох блоків, поєднаних за допомогою високоміцних бовтів і єдиної залізобетонної плити. У якості першої розглянута модель прогонової будови з металевими перфорованими блоками, що мають регулярний крок та однакову ширину отворів (модель 1). Друга представлена прогоною будовою, з металевими перфорованими блоками, що мають нерегулярний крок та різну ширину отворів (модель 2). Моделі сформовані стандартними засобами генерації розрахункової схеми з оболонки нульової Гаусової кривизни. Довжину прогону прийнято 24 м. У ході дослідження проаналізовано характер роботи конструкції при дії одиничного статичного рівномірно-розподіленого навантаження еквівалентом 10 кН/м^2 . Зокрема вивчалася трансформація поля НДС за рахунок нерегулярності отворів в перфорованих елементах. Результати розрахунків представлені в таблиці 4. Значення зусиль, які виникають в залізобетонній плиті приведені у таблиці 5, в нижній пластині у таблиці 6 та в стінках блоку у таблиці 7.

Таблиця 4

Значення вертикальних переміщень

Навантаження	Вертикальні переміщення, мм	
	Модель 1	Модель 2
Власна вага	11.345	11.335
Корисне навантаження	26.338	25.776
Власна вага та корисне навантаження	37.458	36.852

Таблиця 5

Значення зусиль, що виникають в залізобетонній плиті

Параметр	Модель 1		Модель 2	
	M_x , кН/м	-4.71	5.34	-4.8
M_y , кН/м	-2.98	8.03	-1.71	5.36
M_{xy} , кН/м	-3.51	3.51	-2.7	2.7
Q_x , кН/м	-29.3	29.5	-27.0	27.3
Q_y , кН/м	-39.1	39.1	-27.1	27.1

Таблиця 6

Значення напружень, які виникають в нижній пластині

Параметр	Модель 1		Модель 2	
	N_x , МПа	-22.4	14.4	-21.06
N_y , МПа	-22.9	41.5	-26.1	41.9
τ_{xy} , МПа	-47.9	47.9	-45.3	45.3

Значення напружень, які виникають в стінках блоку

Параметр	Модель 1		Модель 2	
N_x , МПа	-102.1	103.9	-98.1	141.0
N_y , МПа	-86.9	89.0	-85.9	83.1
τ_{xy} , МПа	-86.7	84.7	76.6	76.9

В цілому, проведений аналіз дозволяє судити про позитивний вплив від використання перфорованих елементів з нерегулярним кроком та шириною отворів, так як дозволяє знизити прогини конструкції, а також мінімізувати значення зусиль і напружень, що виникають в поясах і елементах, до 40%.

Крім компонентів НДС при статичному навантаженні, проаналізовано форми і частоти власних коливань при модальному аналізі двох моделей (табл. 8). При цьому, відзначено збіг частот власних коливань для згаданих моделей, відповідних першій формі. Похибка розбіжності не перевищує 2%. При дослідженні наступних форм встановлено більш стрімке зростання частот обертонів для моделі 2. При цьому, розбіжність величин частот власних коливань, відповідних 10 формі, збільшилася приблизно на 10%.

Таблиця 8

Частоти та періоди коливань

Форма коливань	Модель 1		Модель 2	
	Частота коливань, Гц	Періоди коливань, с	Частота коливань, Гц	Періоди коливань, с
1	5.4993	0.18184	5.4111	0.18481
2	7.9635	0.12557	9.889	0.10112
3	7.9712	0.12545	9.9291	0.10071
4	8.1945	0.12203	9.9923	0.10008
5	8.1972	0.12199	9.9992	0.10001
6	8.5374	0.11713	10.031	0.099695
7	8.5436	0.11705	10.1	0.099005
8	9.6812	0.10329	11.008	0.090842
9	9.8248	0.10178	11.012	0.09081
10	10.035	0.09965	11.205	0.089244

Крім цього, було проведено розрахунок зазначеної прогонової будови на дію нормативних навантажень А-15 і НК-100 і отримані значення переміщень конструкції і зусиль, що виникають у головних балках, діафрагмах, нижній полці і в залізобетонній плиті. У зв'язку з чим, встановлена частка ресурсу, що йде на сприйняття власної ваги і корисного навантаження в пропорції 40% на 60% відповідно.

Четвертий розділ присвячений експериментальній верифікації запропонованого підходу, на основі якого створена нова конструкція сталезалізобетонної прогонової будови. Як об'єкт дослідження використовувався СТЗБ блок прогонової будови автодорожнього мосту (рис. 9).

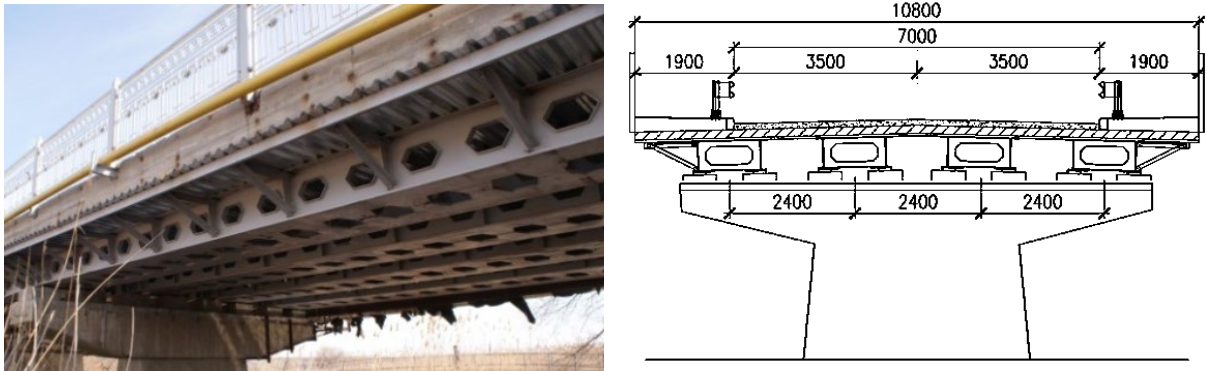


Рис. 9. Загальний вид та поперечний переріз об'єкта дослідження.

Статична схема – 4-х прогонна балкова, розрізна сталезалізобетонна споруда з прольотами 14.10м між осями опор. Повна довжина мосту – 56.4м. Ширина мосту – 7м. Тротуари – 1.5м.

Головні балки прогонових будов - металеві перфоровані блоки коробчастого перерізу з діафрагмами (рис. 10). Стінки блоку виконано з металевого листа товщиною 10мм. Нижня полиця з металевого листа товщиною 30мм. Діафрагми і верхні полиці – 12мм. Крок діафрагм 1м. Об'єднання блоків виконано по залізобетонній плиті проїзної частини. Товщина залізобетонної плити – 200мм. Для забезпечення спільної роботи металевого блоку і залізобетонної плити проїзної частини по верхньому поясу блоку приварені упори, виконані з відрізків прямокутної труби і похилих арматурних стрижнів (рис. 11). Об'єднання всіх елементів в готовий блок виконувалося в заводських умовах. Перед бетонуванням на верхні полиці блоку укладався профільований сталевий лист, який виконував роль незнімної опалубки.

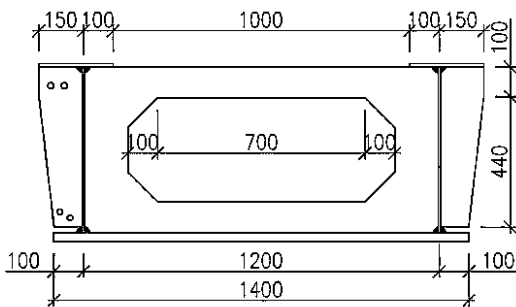


Рис. 10. Поперечний переріз металевого блоку.

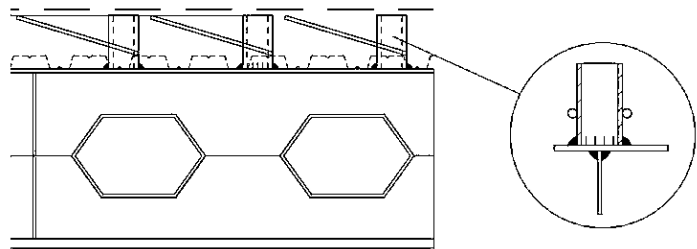


Рис. 11. Вузол поєднання металевого блоку і залізобетонної плити.

В якості навантаження були прийняті 2 автосамоскиди КАМАЗ-6520, з нормативної масою одного автомобіля $Q = 19.2$ т. Було передбачено 4 схеми розташування автомобілів (рис. 12):

схема 1 - установка одного автомобіля задньою віссю в середині прольоту біля правого бар'єрного огородження;

схема 2 - установка двох автомобілів задніми бортами один до одного, біля правого бар'єрного огородження;

схема 3 - установка двох автомобілів задніми бортами один до одного, по осі мосту;

схема 4 - розташування двох автомобілів, встановлених задніми бортами один до одного біля лівого бар'єрного огородження.



Рис. 12. Установка автомобілів за схемами 1-4.

При динамічному дослідженні для визначення частот і форм власних коливань, на проїзну частину, з висоти 1м, скидався залізобетонний фундаментний блок розміром 85x48x55см масою 600кг. Для визначення характеристик вимушених коливань на мосту проводились наступні заходи:

- рух колони з двох автомобілів з інтервалом 2с зі швидкістю 30 км/год;
- рух одиночного автомобіля по покриттю з перешкодою (дерев'яний брус шириною 20 см, товщиною 4 см і довжиною 3.5 м), яка встановлена в середині прольоту;
- рух одиночного автомобіля зі швидкістю 30 км/год і різке гальмування в середині прольоту.

Фіксація вертикальних переміщень (прогинів) конструкції здійснювалася за допомогою 8 механічних прогиномірів Аістова (6-ПАО-0,01). Прилади кріпилися до конструкції за допомогою з'єднувальних ланцюгів, зібраних з вантажів і ниток. Для виключення впливу на значення прогинів зовнішніх показників, таких як вітер, з'єднувальні ланцюги підтримувалися в постійному натягу і перевірялися перед кожним зняттям відліків. Прогиноміри встановлювалися по два в чвертях і середині прольоту і по одному в опорних частинах, за допомогою штативів та струбцин, на заздалегідь підготовлених майданчиках. Схема розташування та загальний вигляд прогиномірів представлені на рис. 13.

Для фіксації деформацій і виявлення напружень навколо отворів блоку було встановлено 8 механічних тензометрів. Прилади були встановлені в опорній частині і в середині прольоту. Схема розташування та загальний вид тензометрів показані на рис. 14.

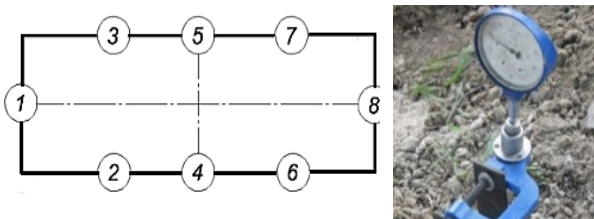


Рис. 13. Схема розташування та загальний вигляд прогиномірів.

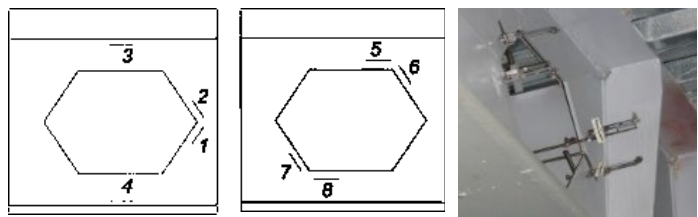


Рис. 14. Схема розташування та загальний вид тензометрів в опорній частині та в прольоті прогонової будови.

Для визначення частот і форм власних та вимушених коливань елементів прогонової будови в вертикальному напрямку в середині прольоту встановлювався вібровимірювальний прилад «Агат-М».

Графіки залежності вертикальних переміщень конструкції від рівня навантаження наведені на рис. 15. Слід зауважити, що встановлений характер

деформування системи підтверджує коректність складеної розрахункової моделі, а отримані експериментальні дані збігаються з розрахунковими даними, з похибкою, що не перевищує 5%. За даними обробки значень вимірів деформацій, отриманих з механічних тензометрів та лабораторних випробувань по визначенню механічних характеристик металу були обчислені значення фактичних напружень, що виникають по периметру отворів в стінках металевих балок. Максимальні значення лінійних деформацій склали $15 \cdot 10^{-4}$ мм що, в свою чергу, відповідає значенням напруження - 25 МПа. Діаграма напружень в характерних точках в порівнянні з розрахунковими даними показані на рис. 16.

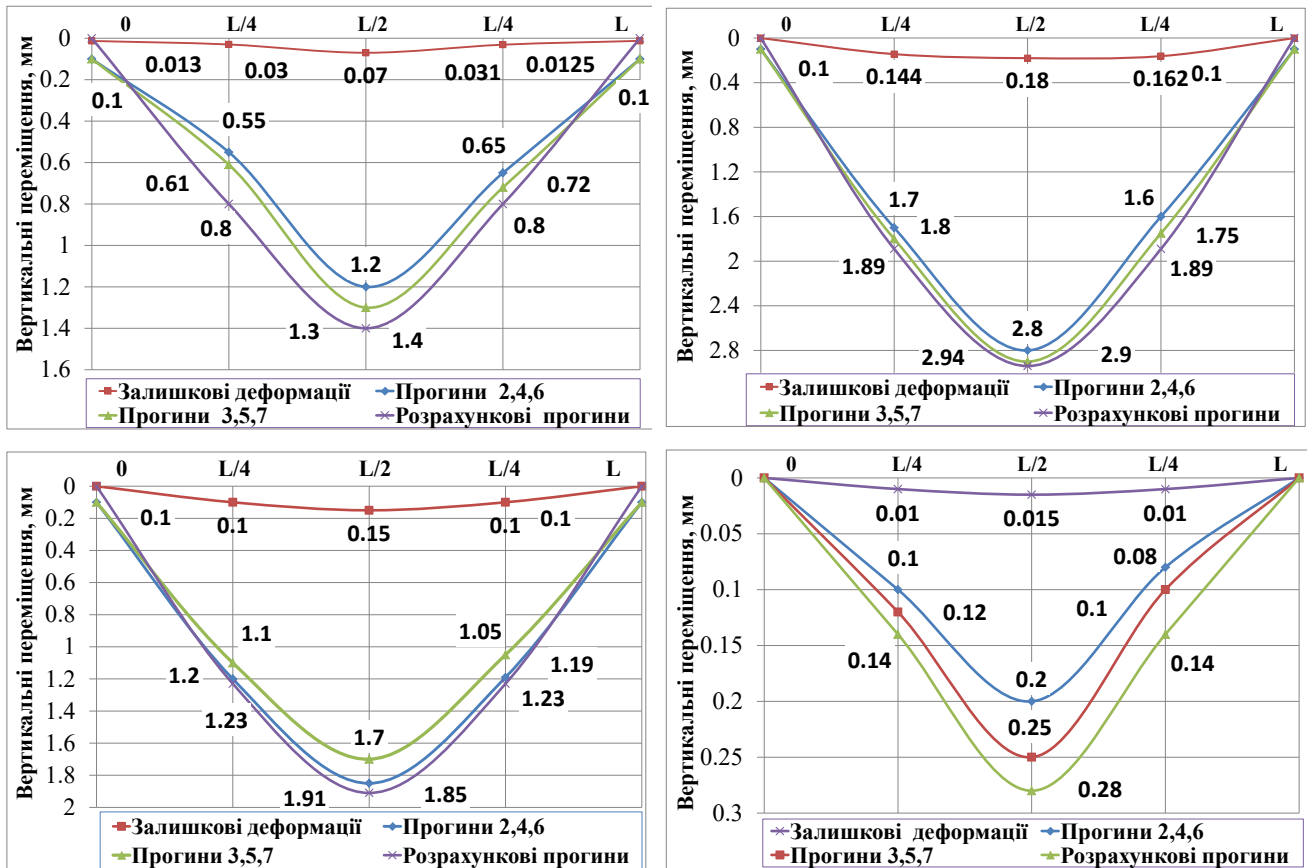


Рис.15. Графіки прогинів блоку за чотирма схемами навантаження

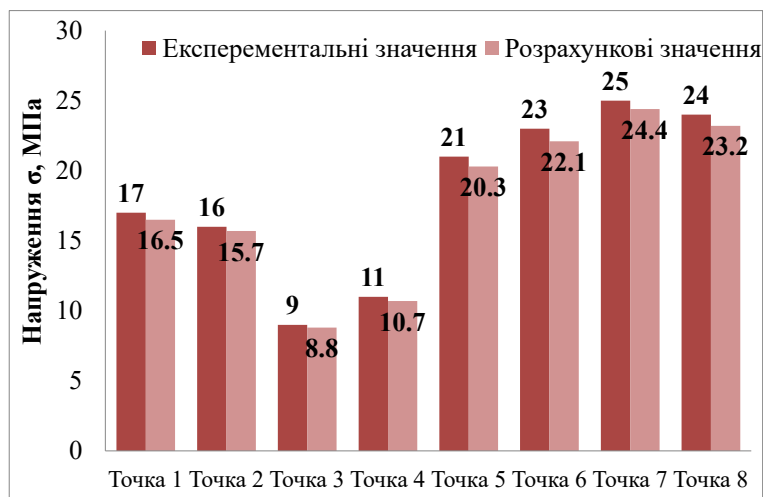


Рис.16. Діаграма напружень в характерних точках (рис. 14)

В ході експерименту був підтверджений факт надійної спільної роботи залізобетонної плити з металевою частиною моделі, що, в свою чергу, вказує на позитивність запропонованої конструкції зв'язків зсуву. Максимальні вертикальні переміщення (прогини) конструкції, отримані від дії короткочасного навантаження, дозволяють судити про високу жорсткість системи. Залишкові деформації після розвантаження на кожному етапі навантаження не перевищили 10%, що, в свою чергу, свідчить про пружну роботу конструкції на всьому діапазоні навантаження.

За даними обробки показань приладу при динамічних випробуваннях отримані частоти, періоди та амплітуда власних (рис. 17) і вимушених (рис. 18) коливань.

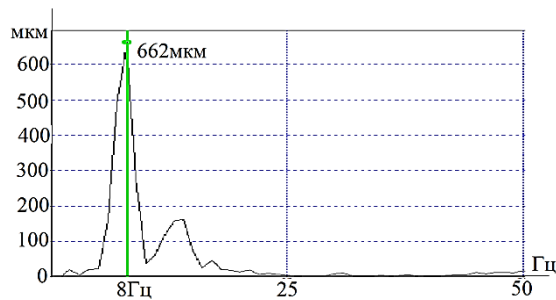


Рис. 17. Спектр власних коливань

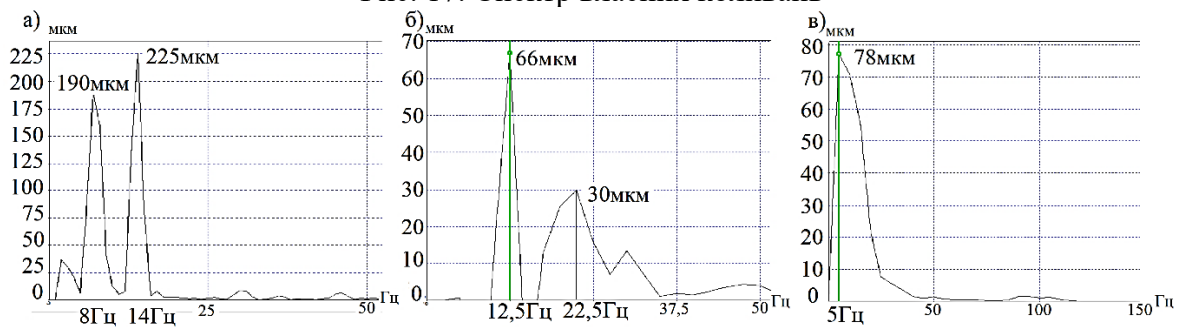


Рис. 18. Спектр вимушених коливань: а) при 1-ій схемі динамічного навантаження; б) при 2-ій схемі динамічного навантаження; в) при 3-ій схемі динамічного навантаження

П'ятий розділ присвячений практичному впровадженню отриманих результатів. Запропонована конструкція сталезалізобетонної прогонової будови впроваджена, як варіант проектування, при ремонті сталезалізобетонного мосту через р. Липчик в п. Липці на а/д С-212570 та при реконструкції моста по вул. Леніна через р. Сухий Торець в м. Барвінкове.

Проведене техніко-економічне порівняння запропонованої конструкції сталезалізобетонної прогонової будови із залізобетонними і металевими аналогами підтверджує позитивність запропонованого рішення. Результати наведені у відносних одиницях в табл. 9.

Таблиця 9

Техніко-економічні показники пропонованої конструкції прогонової будови

Показники (*у відсотках, %)	Запропонована прогонова будова	Металева прогонова будова	Залізобетонна прогонова будова
Витрати металу	90	100	80
Витрати залізобетону	80	90	100
Працевитрати	80	80	80
Загальна вартість	80	100	90

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено ефективність та проведена адаптація біоенергетичного методу оптимізації на базі поліпшення конструкції прогонової будови, що має позитивні фізико-геометричні характеристики. В якості керуючих параметрів оптимізації прийняті розміри та крок отворів. Встановлено, що нерегулярна конфігурація перфорованих елементів є найбільш раціональною з точки зору мінімізації їх ПЕД та прогинів. Використання перфорованих елементів з нерегулярними розмірами та кроком отворів дозволяє знизити витрати матеріалу при виготовленні на 10% та знизити прогини конструкції до 5% в порівнянні з перфорованими елементами з регулярними розмірами та кроком отворів.

2. Сформовано науковий принцип конструювання перфорованих елементів з нерегулярними розмірами та кроком отворів, в залежності від розподілу ЩПЕД. Запропоновано спосіб виготовлення, з технологічною послідовністю розкрою, перфорованих металевих елементів, що мають нерегулярні (довільні) розміри та крок отворів.

3. Побудовано дві розрахункові скінченно-елементні моделі прогонових будов з регулярними та нерегулярними розмірами та кроком отворів і на їх основі проведено порівняння компонентів напружено-деформованого стану систем в цілому і окремих їх елементів. Підтверджено ефективність використання перфорованих елементів з нерегулярною топологією, так як дозволяє знизити прогини конструкції, а також мінімізувати значення зусиль і напружень, що виникають в поясах і елементах, до 40%. Проаналізовано форми і частоти власних коливань. Відзначено розбіжність частот власних коливань для згаданих моделей на 5-10%. Показано, що частка корисного ресурсу, яка йде на сприйняття власної ваги і корисного навантаження, розподіляється в співвідношенні 40% на 60%.

4. Проведено натурне експериментальне дослідження НДС раціоналізованої конструкції при дії статичних та динамічних навантажень. Максимальний прогин склав 2.9мм. Залишкові деформації після розвантаження на кожному етапі навантаження не перевищили 10%. Максимальні значення напружень, що виникають по периметру отворів в стінках металевих блоків склали 25 МПа. Отримані експериментальні дані збігаються з розрахунковими даними, з похибкою, що не перевищує 15%. Тестуванням системи зв'язків зсуву підтверджена спільна робота конструкції, що знайшло відображення в тому що, після набору міцності бетону, значення прогинів конструкції зменшилися в п'ять разів.

5. Застосування сталезалізобетонних прогонових будов з металевими перфорованими блоками та ефективною залізобетонною плитою проїзної частини, в порівнянні з повністю металевими та повністю залізобетонними прогоновими будовами, дозволяє знизити витрати металу та залізобетону на 10-15%, знизити працевитрати, за рахунок високої заводської готовності блоків, до 20% та зменшити загальну вартість на 15-20%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у міжнародних виданнях, фахових виданнях України та збірниках наукових праць, що включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Шмуклер В.С., Каплін Р.Б., Круль Ю.М. Випробування сталезалізобетонних прогонових будов мосту через р. сухий торець в м. Барвінкове. *Міжвідомчий науково-технічний збірник "Основи та фундаменти"*. Вип. 40. 2020. С 30-40.

Особистий внесок здобувача: Виконано обробку отриманих результатів під час проведення статичних та динамічних випробувань натурального експериментального дослідження.

2. Каплін Р.Б. Розрахунок надійності сталезалізобетонних прольотних будов. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. Вип. 193. Харків, 2019. С. 24-32. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

3. Каплін Р.Б. Сучасні сталезалізобетонні прогонові будови мостів малих і середніх прольотів. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. Вип. 193. Харків, 2019. С. 24-32. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

4. V. Babaeв, M. Bekker, V. Shmukler, S. Bugaevskiy, Y. Krul, R. Kaplin. Efficient construction of the motorway and highway bridge superstructure (experimental studies). *MATEC Web of Conferences. Material science, Engineering and Chemistry*, v. 116, 02003 (2017). Transbud-2017. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особистий внесок здобувача: шляхом виконання натурального експериментального дослідження виконано оцінку роботи системи зв'язків зсуву.

5. R. Kaplin, Y. Krul. The search for sustainable parameters for steelreinforced concrete section of a bridge superstructure. *MATEC Web of Conferences. Material science, Engineering and Chemistry*, v. 230, 02015 (20118). Transbud-2017. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особистий внесок здобувача: Запропоновано алгоритм визначення оптимальної висоти сталезалізобетонного перетину прогону і впливу залізобетонної плити на висоту металевої частини конструкції.

Публікації апробаційного характеру:

6. R. Kaplin, Y. Krul, M. Delyavskyy. Rationalization of the parameters of composite reinforced concrete superstructures under conditions of multicrycrying. *AIP Conference Proceedings 2077*, 020031, 2019. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особистий внесок здобувача: вирішене завдання раціоналізації параметрів металевих перфорованих елементів в умовах багатокритеріальності за рахунок нерегулярних топології та кроку отворів.

7. Круль Ю.М., Каплін Р.Б. Надійність сталезалізобетонних прольотних будов. *Тези доповідей 1-ї міжнародної науково-технічної конференції «Транспортні споруди: стан, проблеми збереження, ремонт»*. Харків, 2019. С. 56-59.

Особистий внесок здобувача: виконано розрахунок надійності сталезалізобетонної прогонової будови на прикладі мосту через р. Сухий Торець в м. Барвінкове

8. Каплин Р.Б., Круль Ю.Н. Выбор оптимальной конструкции сталежелезобетонного пролетного строения. *Матеріали всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Мости, тунелі і дороги: стан, проблеми утримання та перспективи підвищення довговічності»*. Харків, 2018. С. 38-42.

Особистий внесок здобувача: виконано огляд класифікації, загальних характеристик і конструктивних особливостей найбільш поширених сталезалізобетонних (СТЗБ) прогонових будов мостів.

9. В.Н. Бабаев, М.Л. Беккер, В.С. Шмуклер, С.А. Бугаевский, Р.Б., Каплин, Ю.Н. Круль. Эффективная конструкция пролетного строения автомобильно-дорожного моста (экспериментальные исследования). *Тези доповідей 6-ї міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті»*. Харків, УкрДУЗТ. 2017. С.97-98.

Особистий внесок здобувача: виконано обробку отриманих результатів при проведенні натурних статичних та динамічних випробувань мосту та надано оцінку роботи системи зв'язків зсуву.

Додаткові публікації та патенти:

10. Бабаев В.М., Шмуклер В.С., Круль Ю.М., Каплин Р.Б., Бугаєвський С.О. *Спосіб виготовлення полегшених балок. Патент України на корисну модель № 141171. Чинний з 25.03.2020 р. Бюл. №6. С. 11.*

Особистий внесок здобувача: запропоновано удосконалення способу виготовлення перфорованих металевих елементів з нерегулярною топологією та кроком отворів.

АНОТАЦІЯ

Каплин Р.Б. Багатокритеріальна раціоналізація конструктивних параметрів сталезалізобетонних прольотних будов мостів при реконструкції.
– На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди (19 – Архітектура та будівництво) – Український державний університет залізничного транспорту, Харків, 2021 р.

Дисертація присвячена раціоналізації конструктивних параметрів сталезалізобетонних прольотних будов мостів, що включають в себе перфоровані металеві блоки коробчастого перетину та ефективну залізобетонну плиту проїзної частини.

В дисертації розглянуті питання вдосконалення конструкції сталезалізобетонної прогонової будови автомобільно-дорожнього мосту та її чисельного та експериментального дослідження, а також методів раціоналізації та управління її характеристиками. Для запропонованих систем обґрунтовано критерії раціоналізації і визначено внутрішні та зовнішні керуючі параметри. На базі отриманих теоретичних даних сформовано нове конструктивне рішення прогонової будови, в якому стисла частина представлена у вигляді полегшеної залізобетонної плити, а розтягнута – у вигляді металевої просторової частини, що складається з перфорованих пластин з нерегулярною топологією отворів.

Проведено оцінку впливу ефективної залізобетонної плити на напружено-деформований стан перфорованої металеві балки та перерізу в цілому.

Проведено натурні експериментальні дослідження сталезалізобетонного блоку прогонової будови. У ході експерименту було підтверджено факт надійної спільної роботи залізобетонної плити з металеві частиною. Аналіз отриманих результатів дозволяє судити про високу жорсткість системи і свідчить про пружну роботу матеріалів. Слід вказати, що характер деформування системи підтверджує коректність складеної теоретичної моделі, а отримані експериментальні дані збігаються з теоретичними з похибкою, що не перевищує 15%.

Ключові слова: сталезалізобетон, прогонова будова, енергетичний підхід, оптимальна конструкція.

АННОТАЦИЯ

Каплин Р.Б. Многокритериальной рационализация конструктивных параметров сталежелезобетонных пролетных строений мостов при реконструкции. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 - строительные конструкции, здания и сооружения (19 - Архитектура и строительство) – Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, Харьков, 2021.

Диссертация посвящена рационализации конструктивных параметров сталежелезобетонных пролетных строений мостов, включающих в себя перфорированные металлические блоки коробчатого сечения и эффективную железобетонную плиту проезжей части.

В диссертации рассмотрены совершенствования конструкции сталежелезобетонных пролетного строения автомобильно-дорожного моста и ее численного и экспериментального исследования, а также методов рационализации и управления ее характеристиками. Для предложенных систем обоснованы критерии рационализации и определены внутренние и внешние управляющие параметрами. На базе полученных теоретических данных сформировано новое конструктивное решение пролетного строения, в котором сжатая часть представлена в виде облегченной железобетонной плиты, а растянутая – в виде металлической пространственной части, состоящей из перфорированных пластин с нерегулярной топологией отверстий. Проведена оценка влияния эффективной железобетонной плиты на напряженно-деформированное состояние перфорированной металлической балки и сечения в целом.

Проведены натурные экспериментальные исследования сталежелезобетонного блока пролетного строения. В ходе эксперимента было подтверждено факт надежной совместной работы железобетонной плиты и металлической части. Анализ полученных результатов позволяет судить о высокой жесткости системы и свидетельствует об упругой работе материалов. Следует указать, что характер деформирования системы подтверждает корректность составленной теоретической модели, а полученные экспериментальные данные совпадают с теоретическим с погрешностью, не превышающей 15%.

Ключевые слова: сталежелезобетон, пролетное строение, энергетический подход, оптимальная конструкция.

ABSTRACT

Kaplin R.B. Multi-criteria rationalization of structural parameters of steel-reinforced concrete bridge spans during reconstruction. – On the right of the manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.23.01 - building structures, buildings and structures (19 - Architecture and construction) - Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, 2021.

The thesis is devoted to the rationalization of the design parameters of steel-reinforced concrete bridge spans, including perforated metal box-section blocks and an effective reinforced concrete slab of the roadway.

The dissertation deals with the issues of improving the design of steel-reinforced concrete spans of an auto-road bridge and its numerical and experimental research, as well as methods for rationalizing and controlling its characteristics. For the proposed systems, rationalization criteria are justified and internal and external control parameters are determined.

The classification, general characteristics and design features of the most common reinforced concrete girder structures of bridges are considered. The main advantages and disadvantages of these systems, as well as design features of the details of the combination of metal and reinforced concrete part of the structure are considered. The experience of application of lightweight effective metal and reinforced concrete elements in the form of perforated beams and reinforced concrete slab with hollow formers is also analyzed. On the basis of the obtained theoretical data, a new structural solution of the span was formed, in which the compressed part is presented in the form of a lightweight reinforced concrete slab, and the stretched part is presented in the form of a metal spatial part, which consists of perforated plates with an irregular topology of holes. The configuration of the perforated metal element under the conditions of multicriteria is obtained. A method of manufacturing of perforated elements with irregular topology and steps of holes is proposed.

To determine the efficiency of the reinforced concrete slab, an algorithm for determining the optimal height of the cross section of the girder and the impact of the reinforced concrete slab on the height of the metal part of the structure is proposed within the framework of the specified design solution.

A theoretical calculation model of the proposed reinforced concrete span structure is constructed, on the basis of which an analysis of the stress-strain state is performed. The theoretical study was carried out according to two calculation schemes of span structures, consisting of three blocks connected by high-strength bolts and a single reinforced concrete slab. The first considered model is a span structure with metal perforated blocks having a regular pitch and width of holes. The second is represented by a span structure, with metal perforated blocks, have an irregular pitch and width of holes. In general, the analysis allows us to judge the positive impact of the use of perforated elements with irregular pitch and hole width, as it reduces the deflections of the structure, as well as minimize the values arising in the belts and elements, forces and stresses up to 40%.

Full-scale experimental studies of the steel-reinforced concrete block of the superstructure have been carried out. During the experiment, the fact of reliable joint operation of the reinforced concrete slab with the metal part of the model was confirmed. The analysis of the obtained results allows one to judge the high rigidity of the system and testifies to the elastic work of materials. It should be noted that the nature of the deformation of the system confirms the correctness of the compiled theoretical model, and the obtained experimental data coincide with the theoretical ones, while the discrepancy does not exceed 15%.

The proposed construction of a reinforced concrete girder structure was implemented as a design option during the repair of a reinforced concrete bridge across the Lipchik River in the village of Lipci on the S-212570 highway and during the reconstruction of the bridge on the Lenina str. across the river Sukhiy Torets in Barvinkove.

The technical and economic comparison of the proposed structure of reinforced concrete girder structure with reinforced concrete and metal analogues confirms the positivity of the proposed solution.

Key words: steel-reinforced concrete, spans, energy approach, optimal design.