

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ДЕРИЗЕМЛЯ СВІТЛАНА ВОЛОДИМИРІВНА



УДК 624.044+624.048

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ
ПРОГОНОВИХ БУДОВ З РАЦІОНАЛІЗАЦІЄЮ ЇХ ГЕОМЕТРИЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українському державному університеті залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: – доктор технічних наук, професор
Ватуля Гліб Леонідович,
Український державний університет
залізничного транспорту, проректор
з наукової роботи.

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор
Семко Олександр Володимирович,
Національний університет «Полтавська
політехніка імені Юрія Кондратюка»,
завідувач кафедри архітектури
та міського будівництва;

– кандидат технічних наук,
Петрова Олена Олександрівна,
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова,
старший викладач
кафедри будівельних конструкцій.

Захист відбудеться «30» вересня 2021 року о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

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

Автореферат розісланий «27» серпня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент



О.В. Лобяк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Розвиток будівництва обумовлює використання сучасних технологій та конструктивних рішень як при спорудженні нових, так і реконструкції існуючих будівель і споруд. Пошук раціональних сполучень конструкцій тісно пов'язаний з питаннями ефективного використання будівельних матеріалів з точки зору раціонального використання їх міцнісних властивостей, а також оптимізації геометричних параметрів конструкцій при забезпеченні їх несучої здатності.

Застосування в практиці сучасного будівництва комбінованих конструкцій, елементи яких виконані із сталебетону та сталезалізобетону, призводить до суттєвої економії будівельних матеріалів, зниження енергозатрат та скорочує терміни будівництва.

З пошуком нових конструкцій, що відповідали б вимогам будівництва та експлуатації тих чи інших споруд, на сьогоднішній день значну увагу приділяють сталезалізобетонним елементам. Упродовж розвитку та вдосконалення сталезалізобетонні конструкції набули значних змін з точки зору забезпечення сумісної роботи бетону та сталі. Такі конструкції потребують постійного дослідження та удосконалення з метою зниження власної ваги, фінансових затрат на виготовлення тощо. Рішення такої задачі може бути представлено у формі задачі оптимізації конструкцій, в якому оптимальний проект відповідає заданому критерію при виконанні умов, що забезпечують надійну роботу конструкції.

Поряд з удосконаленням інженерних методів розрахунку, у тому числі з уведенням їх у національні норми проектування, актуальним завданням є розробка та експериментально-теоретичне обґрунтування комп'ютерних моделей для розрахунку сталезалізобетонних конструкцій з використанням сучасних програмних комплексів, які реалізують метод скінченних елементів.

Таким чином, дисертаційна робота спрямована на раціоналізацію конструктивного рішення сталезалізобетонного перерізу прогонових будов мостів, а також на розробку їх скінченно-елементних моделей з метою перевірки і уточнення отриманих результатів, а також опису їх напружено-деформованого стану (НДС) з урахуванням роботи конструкції на стадіях її зведення, є актуальною та має теоретичне і практичне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках тематики кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту за 2015 - 2020 рр.: «Теоретичні та експериментальні основи визначення, прогнозування та забезпечення несучої здатності та довговічності транспортних споруд в умовах агресивних впливів» (№ ДР 0119U100295), а також у рамках науково-дослідних робіт щодо відновлення технічного стану мостів Харківської, Херсонської і Чернігівської областей (№ ДР 0121U112720).

Мета дослідження – раціоналізація перерізів та методів розрахунку сталезалізобетонних прогонових будов мостів шляхом варіювання їх геометричних параметрів.

Об'єкт дослідження – сталезалізобетонна прогонова будова мосту із залізобетонним верхнім поясом, що працює на згин.

Предмет дослідження – несуча здатність та НДС сталезалізобетонної прогонової будови мосту з урахуванням раціоналізації їх геометричних параметрів.

Задачі дослідження:

- розробити методику пошуку раціонального перерізу сталезалізобетонної прогонової будови мосту за критерієм рівномірності;
- розробити алгоритм оптимального проектування конструктивної системи сталезалізобетонного мосту;
- виконати скінченно-елементне моделювання конструкції прогонової будови сталезалізобетонного мосту з урахуванням отриманого раціонального перерізу для опису його НДС;
- дослідити НДС конструкції прогонової будови мосту під дією постійного і тимчасового навантаження з урахуванням нелінійних властивостей матеріалів, повзучості та генетичної нелінійності конструкції.

Методи дослідження – методи будівельної механіки, теорії пружності та пластичності, механіки твердого деформованого тіла при теоретичних дослідженнях НДС сталезалізобетонних балок; метод скінченних елементів для чисельної реалізації розрахунку конструкції прогонової будови; методи математичної статистики для аналізу та порівняння результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- запропоновано раціональний переріз сталезалізобетонної двотаврової балки з властивостями рівномірності;
- запропоновано алгоритм оптимального проектування конструкції на прикладі трипрогонової будови мосту;
- удосконалено скінченно-елементну модель прогонової будови сталезалізобетонного мосту з урахуванням запропонованого раціонального поперечного перерізу;
- удосконалено методику оцінки НДС конструкцій прогонової будови сталезалізобетонного мосту з урахуванням процедури оптимізації та з урахуванням нелінійних властивостей матеріалів, повзучості та генетичної нелінійності конструкції.

Достовірність положень і висновків дисертації забезпечена співставленням отриманих даних при теоретичному розрахунку та скінченно-елементному моделюванні, а також їх порівнянням з результатами інших дослідників, у тому числі експериментальними, що відображені у відкритих публікаціях. Чисельний розрахунок виконувався за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР 2018 Pro (Ліцензія №1/6638). При розробці алгоритму пошуку раціонального перерізу та алгоритму оптимального проектування застосовувалися загальноприйняті теорії і припущення опору матеріалів та будівельної механіки, нелінійної деформаційної теорії залізобетону, методу скінченних елементів.

Практичне значення отриманих результатів. За результатами досліджень удосконалено конструкцію прогонової будови сталезалізобетонного мосту. Отримано поперечний переріз з властивостями рівномірності, а також надані пропозиції щодо розрахунку сталезалізобетонної прогонової будови, що складається з двотаврових

балок із залізобетонним верхнім поясом. Запропоновано алгоритм оптимального проектування багатопрогонних балочних конструктивних систем мосту під дією тимчасового навантаження. Розроблено скінченно-елементну модель трипрогонного сталезалізобетонного мосту для розрахунку несучої здатності з урахуванням нелінійних властивостей матеріалів, повзучості, багатостадійної роботи конструкції і податливості контакту бетону і сталі.

Особистий внесок здобувача. Здійснено огляд та аналіз літератури за тематикою дослідження; запропоновано двотавровий переріз з властивостями рівномірності та методику розрахунку сталезалізобетонних прогонних будов; застосовано методику оптимального проектування на прикладі трипрогонного сталезалізобетонного мосту; розроблено та удосконалено скінченно-елементну модель в ПК ЛІРА-САПР 2018 Pro (Ліцензія №1/6638). Участь автора у спільних публікаціях відображена в переліку опублікованих робіт.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: науково-технічних конференціях Українського державного університету залізничного транспорту (м. Харків, 2016 р., 2018 р.); міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» - Трансбуд (м. Харків, УкрДУЗТ, 2018 р., 2019 р.); міжнародних науково-практичних конференціях Одеської державної академії будівництва та архітектури «Актуальные проблемы инженерной механики» (м. Одеса, 2016 р.) та «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (м. Одеса, 2019 р.); XII науково-технічній конференції «Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація» та III-ій всеукраїнській інтернет-конференції молодих учених і студентів «Проблеми сучасного будівництва» Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка (м. Полтава, 2016 р.); 9-й та 11-й міжнародних наукових конференціях «Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies» BULTRANS (м. Созополь, Болгарія, 2017 р., 2019 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні технології будівництва та експлуатації автомобільних доріг» (м. Харків, 2020 р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 16 наукових праць, з них 3 статті у фахових виданнях, рекомендованих МОН України, в тому числі 1 – у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази WoS; 2 публікації у міжнародних періодичних виданнях, що індексуються НМБД Scopus, 10 публікацій апробаційного характеру та 1 додаткова публікація.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 186 сторінках і містить 115 сторінок основного тексту, 14 таблиць, 34 рисунків, 164 найменувань літератури, 6 додатків на 48 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено обґрунтування актуальності розглянутої теми, дана загальна характеристика дисертації, її основні положення, наукова новизна і практична цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** розглядається аналіз літератури, присвяченої використанню сталобетонних елементів при будівництві та реконструкції будівель і споруд. Проведено порівняльний аналіз методів розрахунку несучої здатності і оцінки НДС сталезалізобетонних прогонових будов.

Розробкою та дослідженням НДС сталезалізобетонних конструкцій займалися такі вчені як Л.І. Стороженко, Е.Д. Чихладзе, З.Я. Бліхарський, О.В. Семко, О.Л. Кришан, В.С. Шмуклер, М.М. Стрелецький, О.І. Лапенко, О.Л. Шагін, Jianguo Nil, Yan Xiao, Geel Van E, William K.J., Mills L.L. та ін.

Важливим питанням є урахування та оцінка роботи конструкції на всіх етапах навантаження і до моменту руйнування, що можливо реалізувати лише на базі нелінійних моделей. Розробці нелінійної теорії залізобетону присвячені роботи А.Я. Барашикова, А.М. Бамбури, В.М. Бондаренка, П.Ф. Вахненко, О.О. Гвоздева, О.Л. Шагіна, В.С. Шмуклера та ін., де обґрунтовується, що основні підходи до вирішення нелінійних задач будуються на методах послідовних наближень. Головною їх перевагою є можливість шляхом побудови ітераційних процедур спеціального виду використовувати лінійні рішення, отримуючи за допомогою, наприклад методу скінченних елементів (МСЕ).

Розглянуто підходи до раціоналізації поперечних перерізів сталезалізобетонних прогонових будов. Значних успіхів у даному напрямленні досягли: М.П. Абовський, Є.І. Беленя, Р. Белман, В.В. Бірюльов, В.М. Бондаренко, Г.В. Васильков, Г.Л. Ватуля, О.І. Виноградов, О.С. Городецький, Л.В. Канторович, Ю.П. Кітов, Я.М. Ліхтарников, А.В. Перельмутер, О.Р. Ржаніцин, М.І. Рейтман, С.П. Тимошенко, Е. Хог, Е.Д. Чихладзе, В.С. Шмуклер та ін. При цьому вибір геометричних параметрів цих перерізів обґрунтовується недостатньо. Тому залишається актуальним задача вибору форми та геометричних розмірів комбінованого перерізу з урахуванням фізико-механічних характеристик його матеріалів.

Поряд з достатнім досвідом проектування сталобетонних конструкцій залишається актуальним питання пошуку раціональних конструктивних рішень з точки зору економії сталі, зі збереженням несучої здатності, а також удосконалення методів розрахунку сталезалізобетонних прогонових будов. Раціональним з точки зору економії матеріалу доцільно вважати прогонові будови з використанням комбінованих перерізів, що мають властивості рівномірності. З урахуванням вищесказаного було сформульовано основні задачі дисертаційних досліджень.

Другий розділ присвячено розробці методики пошуку раціональних геометричних параметрів комбінованого перерізу, у тому числі їх числовому дослідженню, пошуку оптимальних конструктивних систем на прикладі трипрогової будови мосту.

Проведено аналіз можливості раціоналізації внутрішніх і зовнішніх параметрів конструкцій прогонових будов і пошук оптимальної системи з точки зору вартості та міцності форми і геометричних розмірів комбінованого перерізу з урахуванням характеристик матеріалів, з яких складається переріз.

Раціональність конструктивної форми перерізів визначається відповідністю конструкції її експлуатаційному призначенню, надійністю і економічністю, що в значній мірі залежить від того, наскільки конструктивна форма відповідає вимогам виробництва.

У сучасному будівництві вважається, що конструктивна форма повинна створюватись з урахуванням вимог виготовлення і монтажу, що включає в себе вибір габаритних розмірів, типізацію елементів, конструкцію вузлів і з'єднань, число і тип монтажних стиків і т. д. У свою чергу, конструктивна форма впливає на технологію і монтаж, на технологічний процес при проектуванні обладнання, пристроїв, стимулює появу нових технологічних процесів. Увесь цей комплекс взаємопов'язаних питань вирішується у процесі проектування, важливою частиною якого є варіантне проектування і оптимізація.

У роботі пропонується у якості прикладу розглянути раціоналізацію сталезалізобетонних прогонових будов, що складаються з двотаврових балок з залізобетонним верхнім поясом. На рис. 1 показані два варіанти комбінованого перерізу сталезалізобетонної балки, що працює на згин. Аналізуючи роботи авторів с пропозиціями щодо підсилення сталевих стержнів бетоном, наведено обґрунтування того, що для сприйняття деформації при згині ефективним є розташування плити у стиснутій зоні двотаврового перерізу (рис. 1, б). Така форма перерізу прийнятна під час реконструкції споруди для її підсилення.

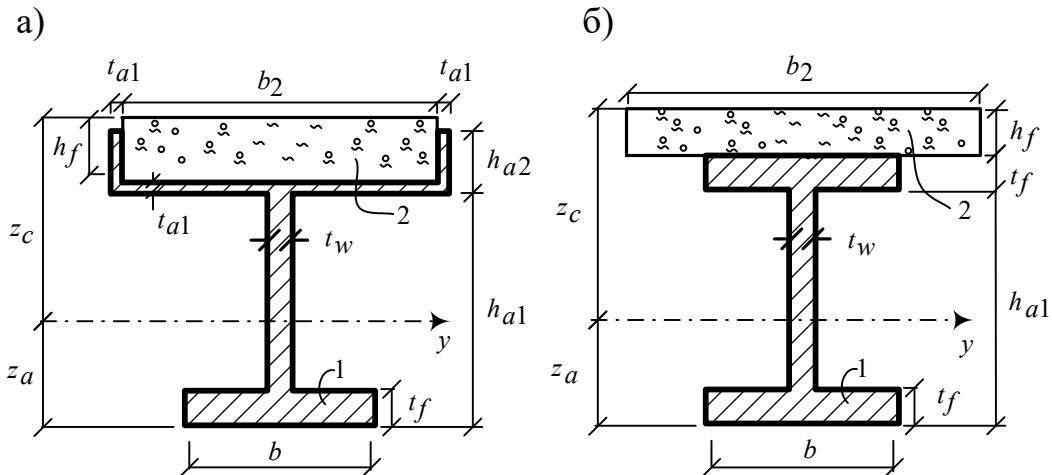


Рис. 1. Поперечний переріз сталезалізобетонної балки у вигляді: а) тонкостінного «корита» з бетонною плитою; б) прокатного профілю (1) з залізобетонною плитою (2)

У сталезалізобетонних конструкціях, що проектуються, форма та розміри елементів перерізу повинні бути обрані у відповідності з вказаними вище особливостями НДС комбінованого перерізу.

У запропонованому раціональному перерізі (рис. 1, а) верхня полиця сталевого двотавру, у якої немає необхідності сприймати стискаючі напруження, відкидається і замінюється тонкостінним «коритом». Це «корито» у більшій мірі потрібне для забезпечення сумісної роботи бетонної плити і сталевому нижньому поясу перерізу.

Для того, щоб переріз був раціональним, необхідно врахувати одну з вимог оптимальності конструкції – рівномірність. Рівномірність для перерізу означає, що напруження у найбільш віддалених від нейтральної осі волокнах одночасно досягають граничних станів. Для бетону це $\sigma_c = f_{cd}$ у стиснутих волокнах, у сталі – $\sigma_a = f_{yd}$ у розтягнутих волокнах.

Для пошуку рівномірного перерізу прогонової будови запропоновано алгоритм оптимізації, при якому визначалось положення нейтральної осі за допомогою методу приведенного перерізу. Сумарна осьова сила, що діє у поперечному перерізі, повинна дорівнювати нулю, тобто:

$$\int \sigma_a dA + \int \sigma_c dA = 0. \quad (1)$$

Напруження при згині в бетонній і сталевій частинах визначалися:

$$\sigma_a = \frac{E_a z}{\rho}, \quad \sigma_c = \frac{E_c z}{\rho}, \quad (2,3)$$

де E_a , E_c - модулі пружності сталі і бетону.

Для приведенного перерізу:

$$\int z dA + n \int z dA = 0, \quad (4)$$

де $n = E_c / E_a$.

Згідно рівняння зігнутої осі, визначаємо найбільший розрахунковий згинальний момент M_{Ed} за виразом:

$$M_{Ed} = \frac{\gamma_{M0} f_{yd} J_{np}}{z_a}. \quad (5)$$

Момент інерції приведенного перерізу визначається за виразом:

$$J_{np} = J_a + \frac{E_c}{E_a} J_c, \quad (6)$$

де J_a , J_c - моменти інерції сталеві і бетонної частин перерізу відносно нейтральної осі перерізу.

Підставивши в умову (4) підінтегральний вираз, у відповідності з рис. 1, а, отримуємо рівняння відносно z , рішенням якого є положення нейтральної осі z_a :

$$z_a = \frac{\frac{bt_f^2}{2} + \frac{h_{a1}^2 - t_f^2}{2} t_w + (b_2 + 2t_{a1}) t_{a1} \left(h_{a1} + \frac{t_{a1}}{2} \right) +}{bt_f + (h_{a1} - t_f) t_w + (b_2 + 2t_{a1}) t_{a1} + 2(h_{a2} - t_{a1}) t_{a1} + \frac{E_c}{E_a} b_2 h_f} + \frac{2(h_{a2} - t_{a1}) t_{a1} \left(h_{a1} + \frac{h_{a2} + t_{a1}}{2} \right) + \frac{E_c}{E_a} b_2 h_f \left(h_{a1} + t_{a1} + \frac{h_f}{2} \right)}{bt_f + (h_{a1} - t_f) t_w + (b_2 + 2t_{a1}) t_{a1} + 2(h_{a2} - t_{a1}) t_{a1} + \frac{E_c}{E_a} b_2 h_f}. \quad (7)$$

Розрахунковий переріз відповідає максимальному згинальному моменту. Тут в найбільш віддалених від нейтральної осі волокна виникають найбільші напруження, які за умовою міцності не повинні перевищувати розрахункових значень:

$$\sigma_{a \max} = \frac{M_{Ed} z_a}{J_{np}} \leq \gamma_{M0} f_{yd}, \quad (8)$$

$$\sigma_{c \max} = \frac{E_c}{E_a} \sigma_{np \max} = \frac{E_c}{E_a} \frac{M_{Ed} z_c}{J_{np}} \leq f_{cd}, \quad (9)$$

Щоб переріз був рівномічним і відповідно, оптимальним, умови міцності бетону і сталі при одному і тому ж згинальному моменті M_{Ed} повинні виконуватись у вигляді рівностей:

$$\frac{M_{Ed}}{J_{np}} = \frac{f_{cd}}{(E_c/E_a) z_c} = \frac{\gamma_{M0} f_{yd}}{z_a}. \quad (10)$$

Розміри окремих елементів перерізу повинні знаходитись з умови постійності відношення відстаней до крайніх волокон бетону і сталі від нейтральної осі.

$$\frac{z_c}{z_a} = \frac{f_{cd}}{(E_c/E_a) \gamma_{M0} f_{yd}}. \quad (11)$$

Із рис. 1,а видно, що

$$z_c = h_{a1} + h_f + t_{a1} - z_a. \quad (12)$$

Із (11) і (12) знаходимо:

$$z_a = \frac{(h_{a1} + h_f + t_{a1})(E_c/E_a) \gamma_{M0} f_{yd}}{f_{cd} + (E_c/E_a) \gamma_{M0} f_{yd}}. \quad (13)$$

Так як рівняння (13) є нелінійним, можна отримати різні комбінації b_2 і h_f рівномічних перерізів. Із них необхідно вибрати той, для якого $M_{\max} = M_{Ed}$, де M_{\max} – максимальний згинальний момент, що виникає в балці від заданого навантаження. Отримавши раціональні значення b_2 і h_f , знаходимо значення розрахункового згинального моменту для цього перерізу і порівнюємо його з максимальним для балки. Якщо ці моменти не збігаються, змінюємо номер двотавру і виконуємо розрахунок знову. Далі знаходимо об'єми матеріалів і вартість погонного метра балки. Порівняння розрахунку перерізів та показник їх вартості наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння поперечних перерізів

	b_2 , см	h_f , см	M_{Ed} , кНм	Показник вартості
Підсилення у вигляді «корита»	57,7	12,0	1224,4	0,74
Підсилення у вигляді плити на верхній полиці двотавру	34,0	23,0	1234,1	0,78
Двотавр	70ШЗ		1411,8	1

У якості прикладу було розглянуто трипрогонову конструкцію балочного моста заданої довжини під дією постійного і тимчасового навантаження (рис. 2).

Під оптимальним розподіленням внутрішніх зусиль у системі мається на увазі сукупність внутрішніх зусиль, при якій система становиться оптимальною, наприклад, системою мінімального об'єму або вартості. Система є оптимальною, якщо у всіх її елементах максимальні напруження дорівнюють розрахунковим, тобто якщо вона є рівномірною системою. Якщо при цьому НДС і перерізи всіх елементів однакові, то рівномірною можна назвати систему з рівними зусиллями у розрахункових перерізах.

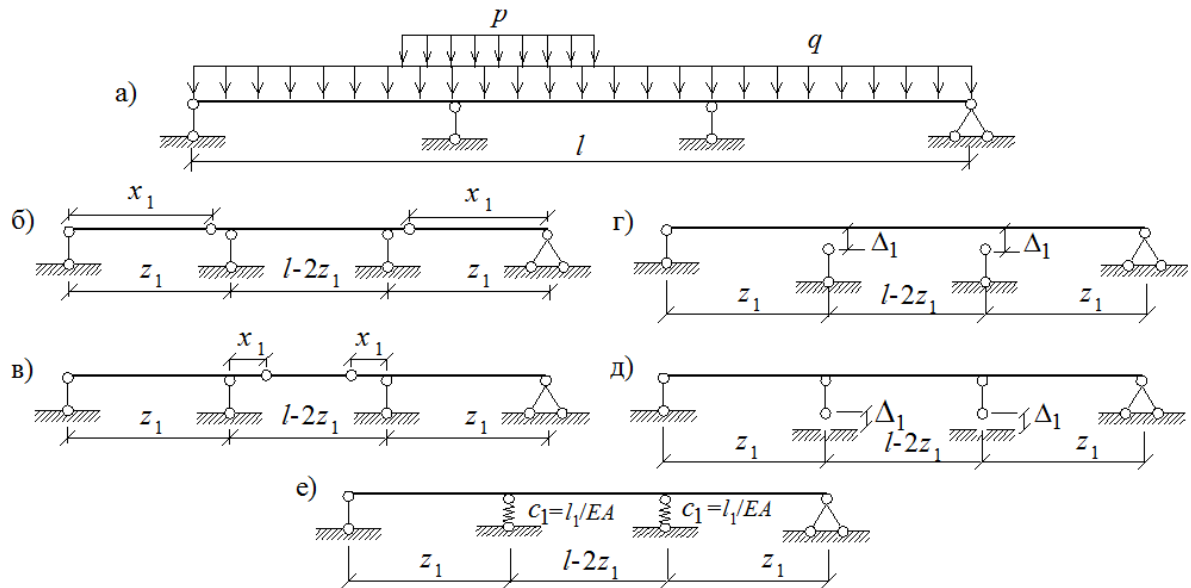


Рис. 2. Конструктивні рішення оптимальних систем:

- а) задана нерозрізна трипрогонова балка; б) багатопрогонова балка з шарнірами на крайніх прогонах; в) багатопрогонова балка з шарнірами на середньому прогоні; г) балка з односторонніми опорними зв'язками; д) балка зі зміщеними опорами; е) балка з пружно-податливими зв'язками

У даному дослідженні наведено алгоритм оптимізації багатопрогонових статично визначених і статично невизначених балок постійного перерізу, у якому узагальнюється розрахунок конструкції на випадок дії постійних і тимчасових навантажень, а також застосовується для розрахунку балок зі зміщенням опорних закріплень.

Метою дослідження є отримання рівномірної системи, в усіх елементах якої максимальні напруження дорівнюють розрахунковим. У множині статично визначених систем зусилля визначено з рівнянь рівноваги, і їх розподіл під дією заданого навантаження залежить лише від лінійних розмірів елементів та їх взаємного розташування. Для статично невизначених конструкцій виконано варіювання не тільки лінійними розмірами, а й розташуванням опорних закріплень. Результати оптимізації, що отримані для балок, які показані на рис. 2, наведені у загальній табл. 2.

Результати оптимізації статично визначених і статично невизначених балок

Навантаження	Вид системи		z_1 , м	x , м	cEJ , м^3 ; ΔEJ , кНм^3 або k	$M_{1\max}$, кНм	$ M_{\text{оп}} $, кНм	$M_{2\max}$, кНм
	1	2	3	4	5	6	7	8
q	Статично визначена трипрогонова балка	Шарніри в крайніх прогонах	11,351	9,404		11,054	11,050	11,054
		Шарніри в середньому прогоні	11,352	1,947		11,058	11,049	11,049
	Нерозрізна балка	З односторонніми опорними зв'язками	11,369		k 0,0271	10,994	10,996	10,989
		Зі зміщеними опорами	11,351		ΔEJ 495	11,053	11,053	11,052
		З пружно-податливими зв'язками	11,351		cEJ 40,151	11,053	11,052	11,052
	q, p	Статично визначена трипрогонова балка	Шарніри в крайніх прогонах	11,942	9,896		24,483	24,433
Шарніри в середньому прогоні			11,005	2,049		24,470	24,465	24,465
Нерозрізна балка		З односторонніми опорними зв'язками	11,410		k 0,0431	25,750	25,749	25,814
		Зі зміщеними опорами	11,444		ΔEJ 403	25,732	25,726	25,727
		З пружно-податливими зв'язками	11,351		cEJ 29,50	24,835	24,776	24,709

У третьому розділі реалізовано запропонований алгоритм проектування у вигляді скінченно-елементної моделі нерозрізної сталезалізобетонної прогонової будови мосту з монолітною залізобетонною плитою проїзної частини.

При створенні скінченно-елементної моделі прогонової будови були прийняті наступні гіпотези:

1. Розрахунок передбачає побудову пластинчато-стержневу розрахункову схему з застосуванням універсальних стержневих скінченних елементів (СЕ) для моделювання балочної решітки і фізико-нелінійних СЕ оболонки (рис. 3) для моделювання плити проїзної частини.
2. Модель будується у межах всієї прогонової будови. Об'єднання у сумісну роботу елементів перерізу виконано за допомогою абсолютно жорстких тіл, а також двовузлових СЕ пружного зв'язку із заданою жорсткістю (рис. 3) для моделювання роботи гнучких упорів.
3. Для розрахунку на повзучість було застосований підхід у відповідності з Єврокод 2, який базуються на даних експериментів і встановлює залежність між деформацією і часом через коефіцієнт повзучості $\varphi(t, t_0)$. Міцність і деформативність бетону характеризується параболічно-лінійними діаграмами деформування $\sigma_c - \varepsilon_c$ у залежності від його класу, а також діаграмами довготривалого деформування $\varphi(t) - t$. При розрахунку приймалась відносна вологість 74%, а вік бетону плити – 28 діб. Для врахування арматурної сталі приймається діаграма $\sigma_s - \varepsilon_s$ без площадки текучості.

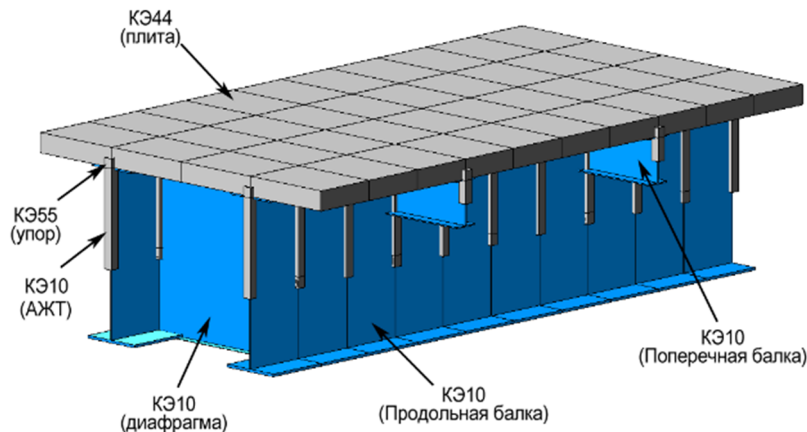


Рис. 3. Типи прийнятих скінченних елементів

4. Структурна нелінійність системи була виявлена методом проектування «Монтаж», яка враховує еволюційні перетворення. Крім того, для кожного етапу будівництва були передбачені СЕ. Також було розраховано навантаження, що відповідало даному етапу. Для СЕ, що включені у декілька етапів, усі зусилля було підсумовано. При цьому розглядається три стадії навантаження (монтажу). Навантаження, що сприймаються балками на першій стадії (1-а частина постійних навантажень) включають власну вагу балок, діафрагм, а також навантаження від ваги залізобетонної плити проїзної частини. Навантаження, що сприймаються об'єднаним перерізом на другій стадії (2-а частина постійних навантажень) включають власну вагу асфальтобетону, перильного і бар'єрного огорожень.

У четвертому розділі застосовано оптимізаційну процедуру на існуючих об'єктах впровадження. Оптимальне проектування сталезалізобетонної прогонової будови, що базується на управлінні фізико-геометричними характеристиками, у процесі якого виконується раціоналізація її параметрів, призводить до розробки оптимальних рішень з точки зору економії матеріалів.

Таблиця 4

Порівняння результатів розрахунку розмірів перерізів

Параметр раціоналізації	Комбінований переріз, запропонований на етапі проектування	Комбінований переріз, отриманий за допомогою алгоритму раціоналізації	Комбінований переріз, отриманий за допомогою ПК ЛПА-САПР 2018 Pro (Ліцензія №1/6638)	
			Об'єднаний переріз у прогоні	Об'єднаний переріз на опорі
	мм	мм	мм	
Товщина плити	225	155	225	225
Висота стінки	2300	2060	2100	2100
Ширина верхнього поясу	660	530	600	600
Ширина нижнього поясу	800	630	700	900
Товщина верхнього поясу	25	20	20	20
Товщина нижнього поясу	35	30	30	40
Витрати бетону, %	100	69	100	100
Витрати металу, %	100	84	89	94

Оптимізаційна процедура та її результати, що описані у розділі 2, дозволила запропонувати раціональні перерізи з властивостями рівномірності з оптимальними витратами матеріалів, які можуть бути застосовані при будівництві чи реконструкції автодорожніх та залізничних мостів. Запропоновані раціональні перерізи, що були отримані з урахуванням вимог експлуатації, наведено на рис. 5.

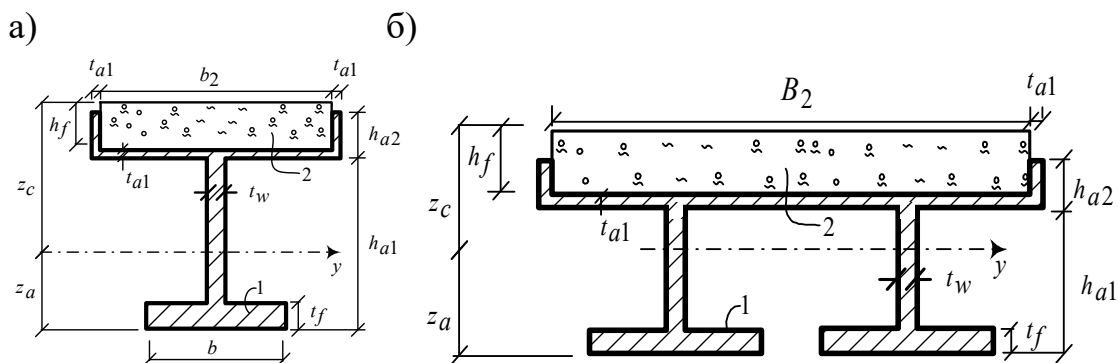


Рис. 5. Запропоновані сталезалізобетонні перерізи

Впровадження результатів розробки та дослідження сталезалізобетонних прогонових було виконано:

- через реконструкцію;
- через проектування та будівництво.

Запропонований конструктивний підхід до оптимізаційної процедури з проектування автодорожнього мосту було застосовано та впроваджено в рамках госпдоговірних науково-дослідних робіт з розробки проектно-кошторисної документації на капітальний ремонт: мосту через р. Вереп автомобільної дороги державного значення Р-69 Київ - Чернігів у Чернігівській області; мосту на автомобільній дорозі загального користування О221801 Чаплинка – Новотроїцьке – Рикове на ділянці км 0+000 – км 20+000 у Херсонській області. Виконано порівняння запропонованої конструкції сталезалізобетонної прогонової будови з існуючими залізобетонними і металевими конструкціями, результати порівняння наведено у табл. 5.

Таблиця 5

Порівняння показників витрат і вартості запропонованої конструкції

Найменування показника порівняння	Матеріал перерізу		
	сталебетон	метал	залізобетон
Площа перерізу, м ²	0,075	0,04	0,405
Площа металу, м ²	0,023	0,04	0,023
Площа бетону, м ²	0,052	-	0,382
Витрати металу, %	100	174	57
Витрати бетону, %	100	-	375
Показник вартості	1	1,35	1,12

Запропонований алгоритм оптимального проектування та пошуку раціонального комбінованого перерізу було застосовано при проектуванні і реконструкції об'єктів транспортних споруд у філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця». Було запропоновано сталезалізобетонну прогонову будову на заміну існуючої залізобетонної. Результати зіставлення показників витрат і вартості наведено у таблиці 6.

Таблиця 6

Порівняння показників витрат і вартості запропонованої конструкції

Найменування показника порівняння	Матеріал перерізу	
	сталебетон	залізобетон
Площа перерізу м ²	0,390	1,17
Площа металу, м ²	0,238	0,04
Площа бетону, м ²	0,152	1,13
Витрати металу, %	100	16
Витрати бетону, %	100	743
Показник вартості	1	1,1

Результати досліджень знайшли практичне застосування в навчальному процесі при підготовці магістрів-науковців та докторів філософії за освітніми програмами «Залізничні споруди та колійне господарство» і «Будівництво та цивільна інженерія».

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено методику пошуку раціонального перерізу конструкції сталезалізобетонної прогонової будови із залізобетонним верхнім поясом. У якості керуючих параметрів оптимізації прийнято геометричні розміри комбінованого поперечного перерізу. У якості критерію оптимальності було вибрано мінімізацію вартості. Варіювання геометричних параметрів дозволяє отримати раціональне рішення з точки зору зменшення загального об'єму матеріалів, що призводить до зниження вартості в цілому. Застосування запропонованої методики пошуку раціонального перерізу дозволяє знизити витрати матеріалів на 12% у порівнянні з існуючими видами залізобетонних і сталевих перерізів з тією ж самою несучою здатністю.

2. Запропоновано алгоритм раціоналізації поперечних перерізів та алгоритм оптимального проектування конструктивної системи сталезалізобетонного мосту на прикладі трипрогонової будови мосту. В результаті отримано раціональний комбінований переріз з уточненням його геометричних параметрів. Встановлено, що оптимальне рішення існує як у множині статично визначених систем, так і статично невизначених, враховуючи дію постійного і тимчасового навантаження. Доведено ефективність запропонованого підходу на прикладі трипрогонового балочного мосту.

3. Виконано скінченно-елементне моделювання конструкції прогонової будови сталезалізобетонного мосту з урахуванням отриманого раціонального перерізу для опису його НДС. Скінченно-елементне моделювання виконувалось з урахуванням нелінійних властивостей матеріалів, повзучості, послідовності завантаження моделі прогонової будови і податливості по контакту бетону і сталі і з урахуванням навантажень НК-100 і А-15. На основі просторової моделі було проведено аналіз НДС конструкції і встановлено істинну несучу здатність конструкції прогонової будови мосту, а також уточнено геометричні параметри конструкції приведенного перерізу, отриманої шляхом запропонованого алгоритму раціоналізації, відповідно до сучасних норм будівництва. Уточнення розмірів, отримане за допомогою ПК ЛІРА-САПР 2018 Pro (Ліцензія №1/6638), дозволило знизити витрати металу на 6-11%.

4. Виконано дослідження НДС конструкції прогонової будови мосту, враховуючи дію постійного і тимчасового навантаження та нелінійні властивості матеріалів, повзучість та генетичну нелінійність конструкції. Результати дисертаційної роботи було впроваджено в практику будівництва та реконструкції транспортних споруд і в навчальний процес УкрДУЗТ. Ефективність застосування запропонованих поперечних перерізів сталезалізобетонних прогонових будов підтверджено зменшенням витрат матеріалів на 10-12%, а також зниженням показників їх вартості на 12-35% у порівнянні з застосуванням аналогічних залізобетонних або металевих поперечних перерізів, що мають ту ж саму несучу здатність.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

1. Китов Ю.П., Ватуля Г.Л., Веревичева М.А., Дериземля С.В. Рационализация сечений сталежелезобетонных балок. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2016. Вып. 10. С. 27-34.
Особистий внесок здобувача: запропоновано алгоритм раціоналізації комбінованого поперечного перерізу, виконано порівняння запропонованого раціонального перерізу з існуючим тієї ж несучої здатності.
2. Kitov Yu.P., Verevicheva M.A., Vatulia G.L., Deryzemlia S.V. Design solutions of optimal systems under action of dead and live mobile load. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2018. Vol. 100. P. 124-139.
Особистий внесок здобувача: виконано розрахунок оптимальних рішень, отриманих за допомогою запропонованого алгоритму оптимізації, на дію постійних і тимчасових навантажень.
3. Дериземля С.В. Обґрунтування та вибір раціональних конструктивних перерізів, можливості їх застосування у різних напрямках будівництва. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2021. Вип. 195. С. 20-25.
Особистий внесок здобувача: виконано огляд існуючих загальних характеристик і конструктивних особливостей найбільш поширених сталезалізобетонних поперечних перерізів.

Публікації у міжнародних періодичних виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз:

4. Kitov Yu., Verevicheva M., Vatulia G., Orel Ye., Deryzemlia S. Design solutions for structures with optimal internal stress distribution. *MATEC Web of Conferences*, 2017, Vol. 133. 03001.
Особистий внесок здобувача: отримано оптимальні рішення конструктивних систем балочних мостів у множині статично визначених і статично невизначених систем.
5. Vatulia G L, Lobiak O V, Deryzemlia S V, Verevicheva M A, Orel Ye F Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019*, Vol. 664 (1). 012014.
Особистий внесок здобувача: виконано скінченно-елементне моделювання з ціллю перевірки і уточнення запропонованого алгоритму оптимізації.

Публікації апробаційного характеру:

6. Дериземля С.В. Численное моделирование сталебетонной балки при температурно-силовом воздействии. Образование, наука, производство: сб. тр. конф. VII Международный молодежный форум. Белгород: БелГТУ им. Шухова, 2015. С. 2469-2474.
7. Дериземля С.В. Вибір раціональних моделей розрахунку сталебетонних конструкцій напружено-деформованого стану сталебетонних конструкцій. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*, 2016. Вип. 160, ч. 2. С. 76-77.

8. Дериземля С.В. Моделирование работы сталебетонных конструкций под воздействием силовых и температурных нагрузок. *Актуальные проблемы инженерной механики: тезисы докладов III Международной научно-практической конференции*. Одесса: ОГАСА, 2016. С. 62-65.
9. Дериземля С.В. Можливість моделювання сталебетонних конструкцій в різних програмних комплексах. *Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація: зб. наук. статей*. Полтава: ПолтНТУ, 2016. Вип. 12. С. 108-109.
10. Дериземля С.В., Комагорова С.Д. Про методи оптимального проектування комбінованих систем. *Проблеми сучасного будівництва: зб. наук. праць за матеріалами III всеукраїнської інтернет-конференції молодих учених і студентів*. Полтава: ПолтНТУ, 2016. С. 163-165.
Особистий внесок здобувача: виконано аналіз існуючих методів оптимального проектування комбінованих систем.
11. Дериземля С.В. Вибір оптимальної конструкції трипрогонового балкового моста при дії постійного і тимчасового навантаження. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. 177. С. 99.
12. Кітов Ю.П., Веревичева М.А., Дериземля С.В., Ватуля Г.Л., Орел Є.Ф. Розрахунок конструкції трипрогонового балочного моста під дією постійного і тимчасового навантаження. *ТРАНСБУД 2018*. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 114-115.
Особистий внесок здобувача: розраховано трипрогонову балочну систему під дією рухомого навантаження.
13. Дериземля С.В., Ватуля Г.Л., Орел Е.Ф., Опанасенко Е.В. Оптимизация конструкции балочных систем при постоянной и временной нагрузке. *III Міжнародна конференція «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд»* Одеса: ОДАБА, 2019. С. 57.
Особистий внесок здобувача: застосовано алгоритм оптимального проектування для трипрогонової балки.
14. Ватуля Г.Л., Лобяк А.В., Дериземля С.В., Веревичева М.А., Орел Е.Ф. Выбор оптимального сечения сталежелезобетонных пролетных строений мостов с монолитной железобетонной плитой. *Трансбуд2019*. Харків: УкрДУЗТ, 2019. С. 44-45.
Особистий внесок здобувача: застосовано алгоритм раціоналізації комбінованого перерізу для реальної конструкції.
15. Дериземля С.В., Ватуля Г.Л., Опанасенко Е.В. Конструктивные решения систем с оптимальным распределением внутренних усилий. *МНТК «Сучасні технології будівництва та експлуатації автомобільних доріг»* Харьков: ХНАДУ, 2020.
Особистий внесок здобувача: запропоновано можливі варіанти оптимальних конструкцій трипрогонового мосту.

Додаткові публікації:

16. Веревичева М.А., Берестянская А.А., Дериземля С.В. Выбор рациональных параметров фибрового армирования. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2015. Вып. 82. С. 60-69.
Особистий внесок здобувача: обґрунтування вибору відсотку та типу фібрового армування.

АНОТАЦІЯ

Дериземля С.В. Напружено-деформований стан сталезалізобетонних прогонових будов з раціоналізацією їх геометричних параметрів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2021.

Дисертація присвячена дослідженню НДС сталезалізобетонних прогонових будов, що працюють на згин, при дії постійного і тимчасового навантаження.

Виконаний аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновок про актуальність питання раціоналізації сталезалізобетонних перерізів та їх використання при будівництві та реконструкції споруд.

У роботі представлена розроблена методика раціонального проектування комбінованих перерізів, що застосовується для сталезалізобетонних прогонових будов. В основу методики покладено критерій рівномірності віддалено крайніх від нейтральної осі елементів перерізу. Для чого було реалізовано алгоритм пошуку раціональних геометричних параметрів приведенного перерізу, обмежених деяким діапазоном значень. За допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР 2018 Pro (Ліцензія №1/6638) було виконано скінченно-елементне моделювання роботи сталезалізобетонної прогонової будови мосту з метою перевірки і уточнення результатів з урахуванням багатостадійної роботи, фізичної нелінійності, повзучості бетону і перерозподілу зусиль по контакту бетону і сталі. Ефективність сталезалізобетону з часом не знижується і буде залежати від раціонального складу бетону, при якому мінімізуються деформації повзучості і оптимальних співвідношень конструктивних параметрів.

Скінченно-елементне моделювання дозволило виконати аналіз і оцінку НДС прогонових будов, а також призначити раціональну конструкцію трипрогонового сталезалізобетонного мосту.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в практику проектування і будівництва, а також у навчальному процесі.

Ключові слова: сталезалізобетонна балка, сталезалізобетонна прогонова будова, розрахунок сталезалізобетонної балки, напружено-деформований стан, раціоналізація перерізу, скінченно-елементне моделювання.

АННОТАЦИЯ

Дериземля С.В. Напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных пролетных строений с рационализацией их геометрических параметров. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Украинский государственный университет железнодорожного транспорта МОН Украины, Харьков, 2021.

Диссертация посвящена исследованию НДС сталежелезобетонных пролетных строений, работающих на изгиб, при действии постоянной и временной нагрузках.

Во **введении** представлена общая характеристика работы, приведены актуальность, связь с научными темами, сформулированы цель и задачи исследований, описаны практическая значимость и научная новизна.

В **первом разделе** выполнен обзор научной литературы о сталежелезобетонных конструкциях, применяемых при строительстве и реконструкции зданий и сооружений, рассматриваются существующие методики расчета изгибающих сталежелезобетонных элементов. Рассмотрены подходы к рационализации поперечных сечений сталежелезобетонных балок. Выполнен обзор существующих программных комплексов для моделирования работы сталежелезобетонных конструкций методом конечных элементов.

Во **втором разделе** представлены теоретические исследования комбинированных поперечных сечений и конструктивных систем балочных сталежелезобетонных мостов. Рассмотрен алгоритм рационализации поперечных сечений путем варьирования их геометрических параметров, используя метод приведенного сечения. Проведено сопоставление предложенного комбинированного сечения с существующими аналогичными сечениями. Выполнен алгоритм оптимизации многопролетных статически определимых и статически неопределимых балочных систем. Результаты оптимальных конструктивных схем получены для: многопролетной балки с шарнирами на крайних пролетах; многопролетной балки с шарнирами в среднем пролете; балки с односторонними опорными связями; балки со смещенными опорами; балки с упруго-податливыми связями.

В **третьем разделе** выполнено конечно-элементное моделирование работы сталежелезобетонного пролетного строения моста, используя ПК ЛИРА-САПР 2018 Pro (Лицензия № 1/6638), с целью проверки и уточнения результатов, полученных путем предложенного алгоритма оптимизации, с учетом многостадийной работы конструкции, физической нелинейности, ползучести бетона и перераспределения усилий по контакту бетона и стали. Эффективность сталежелезобетона со временем не снижается и будет зависеть от рационального состава бетона, при котором минимизируются деформации ползучести; и оптимальных соотношений конструктивных параметров. Конечно-элементное моделирование позволило выполнить анализ и оценку НДС пролетных строений, а также назначить рациональную конструкцию трехпролетного сталежелезобетонного моста.

В **четвертом разделе** выполнено внедрение результатов диссертационной работы, применяя предложенный алгоритм оптимального проектирования, а также усовершенствованный расчет конечно-элементной модели пролетного строения сталежелезобетонного моста, выполненного с помощью ПК ЛИРА-САПР 2018 Pro (Лицензия №1/6638). Предложенные решения были реализованы через проектные решения в рамках хозяйственных научно-исследовательских работ по разработке проектно-сметной документации на капитальный ремонт мостов: через р. Вереп автомобильной дороги государственного значения Р-69 Киев – Чернигов в Черниговской области; на автомобильной дороге общего пользования О221801 Чаплинка – Новотроицкое – Рыково на участке км 0+000 – км 20+000 в Херсонской области.

Предложенный алгоритм оптимального проектирования и поиска рационального комбинированного сечения был применен при проектировании и

реконструкции объектов транспортных сооружений в филие «Проектно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» АО «Укрзалізниця».

Результаты исследований нашли практическое применение в учебном процессе при подготовке магистров и докторов философии по образовательным программам «Железнодорожные сооружения и путевое хозяйство» и «Строительство и гражданская инженерия»

Ключевые слова: сталежелезобетонная балка, сталежелезобетонное пролетное строение, расчет сталежелезобетонной балки, напряженно-деформированное состояние, рационализация сечения, конечно-элементное моделирование.

ABSTRACT

Deryzemlia S.V. The Stress-strain State of Steel-concrete Spans Using Rationalization of their Geometrical Parameters. – Manuscript Copyright.

The dissertation for the degree of the candidate of technical sciences on the speciality 05.23.01 – building constructions, buildings and structures. – Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to the research of the stress-strain behaviour of steel-concrete spans work on bending under dead and temporary load.

The literature analysis allows to conclude that nowadays the rationalization of steel-concrete cross-sections and using them in building construction and reconstruction are important issue.

The dissertation presents the developed method of rational design of composite cross-sections that using for steel-concrete spans. The method is based on the equal strength criteria of the extreme equal from the neutral axis of the cross-section elements. To achieve this propose the search algorithm of rational geometrical parameters of transformed cross-section limited by a range of values have been carrying out. Using the software package LIRA-CAD 2018 Pro (License №1/6638), the finite-element modelling of steel-concrete bridge span behaviour is carried out to verify and finalized the obtained results taking into account the multistage work of the span (structural non-linearity), physical non-linearity and concrete creep, redistribution of stresses due to the compliance of a flexible connection over the contact between concrete and steel. The efficiency of the composite reinforced concrete will not decrease with time and will depend on the rational compositions of the concrete to minimize creep deformations and the optimal ratios of the design parameters.

Finite-element modelling allowed to carried out the analysis and estimation of stress-strain of bridge spans and allowed to appoint the rational design of three-span steel-concrete bridge.

The results of the dissertation work are introduced into the practice of designing and building, as well as in the educational process.

Keywords: steel-concrete beam, steel-concrete span, calculation of the steel-concrete beam, stress-strain state, rationalization of cross-section, finite element modelling.

ДЕРИЗЕМЛЯ СВІТЛАНА ВОЛОДИМИРІВНА

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ
ПРОГОНОВИХ БУДОВ З РАЦІОНАЛІЗАЦІЄЮ ЇХ ГЕОМЕТРИЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Підписано до друку 10.08.2021 р.
Формат паперу 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 0,9.
Тираж 100 прим. Зам. № _____

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФОП Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953).
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
тел. +38-067-91-93-922
www.modelist.in.ua