

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ЦИБУЛЬСЬКИЙ ВІТАЛІЙ МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 624.21.095:539.3

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ЖОРСТКОГО
ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ МОСТІВ З КОМПОЗИТНОЮ
АРМАТУРОЮ**

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному транспортному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Канін Олександр Петрович,
Національний транспортний університет,
професор кафедри транспортного будівництва та управління майном.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Мішутін Андрій Володимирович,
Одеська державна академія будівництва та архітектури,
завідувач кафедрою автомобільних доріг та аеродромів;

кандидат технічних наук, доцент
Павленко Надія Володимирівна,
ФОП «Павленко Надія Володимирівна» – офіційний
представник СП «КРЕДО–ДІАЛОГ» – ТОВ в Україні.

Захист відбудеться «07» травня 2021 р. о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02 у Національному транспортному університеті за адресою: 01010, Україна, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, ауд. 333.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного транспортного університету за адресою: 01103, м. Київ, вул. Михайла Бойчука, 42.

Автореферат розісланий «05» квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент



О.Ю. Усиченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. В Україні проектний строк служби залізобетонних автодорожніх мостів переважно становить до 70 років. Враховуючи те, що більшість з них була побудована 50–60 років тому з проектною інтенсивністю руху та граничним навантаженням, що не відповідають сучасним вимогам, ці фактори прискорюють фізичний знос конструктивних елементів прогонових будов та дорожнього одягу мостів. Крім того, основними причинами деградації залізобетонних плит є процеси корозії сталевих арматур, втрата об'єму робочої частини та незадовільний стан компенсаційних швів на опорах. Збільшення ваги великогабаритної техніки спричиняє надмірне навантаження на дорожній одяг та захисний шар армобетонних конструкцій мостів, що призводить до виникнення тріщин в бетоні, через які сталеві арматури піддаються впливу агресивного зовнішнього середовища.

Традиційно основними напрямками вирішення зазначених проблем прийнято вважати обробку сталевих арматур антикорозійними матеріалами та використання вискоєфективного бетону. Проте, як показали дослідження, ці заходи не можуть в повній мірі усунути проблему корозії сталевих арматур в дорожньому одязі мостів.

З початку 21-го століття розвиток матеріалознавства і технологій привів до застосування інноваційних будівельних матеріалів у дорожньому будівництві, до яких, зокрема, відносяться сучасні волокнисті композитні матеріали (FRP), що використовуються для армування бетонних конструкцій дорожнього одягу мостів. Поліпшений композитними матеріалами бетон був предметом багатьох досліджень, які показали, що за рахунок такого армування можуть покращуватися структурні властивості та довговічність бетонних елементів. Крім того, практичний зарубіжний досвід показує, що використання неметалевого армування є економічно вигідною альтернативою сталі. Композит FRP має очевидні переваги, такі як висока міцність, невелика вага, хороша стійкість до втоми та корозії, простота формування у порівнянні зі сталевими елементами.

Перспективним композитом є базальт, застосування якого у світовій практиці набуває поширення у дорожньому будівництві для зміцнення ґрунтів, підсилення армобетонних конструктивних елементів мостів та дорожнього одягу автомобільних доріг.

Поведінка роботи армобетонних конструктивних елементів з використанням базальтової арматури недостатньо вивчена як вітчизняними, так і зарубіжними дослідниками. Крім того, існує значна розбіжність в результатах проектних розрахунків за теоретичними методами й моделями в порівнянні з натурними та експериментальними дослідженнями. Таким чином, актуальність роботи обумовлена необхідністю удосконалення методу розрахунку армобетонних конструктивних елементів прогонової будови мостів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Наукові результати роботи одержані в процесі виконання:

- плану науково-дослідних робіт Національного транспортного університету «Дослідження напружено-деформованого стану та розробка методів просторового розрахунку конструкцій композитної структури з ускладненими фізико-механічними властивостями» (д/б № 34 РК 0113U000294);

- плану науково-дослідних робіт Державного агентства автомобільних доріг України «Розробити методичні рекомендації з проектування плит проїзної частини із залізобетонною незнімною опалубкою та відповідну розрахунково-аналітичну систему» (договір № 75-13 РК 0113U003711).

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є удосконалення методу розрахунку армобетонних конструктивних елементів дорожнього одягу мостів шляхом врахування деформацій зсуву та напружень від обтиснення.

Для досягнення мети дисертаційного дослідження були поставлені такі **задачі**:

- провести дослідження причин руйнування армобетонних конструктивних елементів мостів та визначити основні підходи до вирішення виявлених проблем;
- удосконалити метод розрахунку армобетонних конструктивних елементів дорожнього одягу мостів на основі узагальнення досліджень методів та моделей розрахунку шаруватих конструкцій з врахуванням напруження від обтиснення;
- розробити модель та алгоритм удосконаленого розрахунку цементобетонного дорожнього одягу армованого композитними матеріалами, на основі шаруватих систем та виконати їх апробацію;
- провести аналіз експериментальних досліджень щодо впливу деформацій зсуву на загальну міцність армобетонних конструктивних елементів прогонових будов мостів та виконати порівняльний аналіз розрахунку компонентів напружено-деформованого стану плит;
- розробити практичні рекомендації для застосування удосконаленого методу розрахунку цементобетонного дорожнього одягу, армованого композитними матеріалами.

Об’єкт дослідження – процеси зміни напружено-деформованого стану жорсткого дорожнього одягу мостів з композитною арматурою.

Предмет дослідження – метод розрахунку жорсткого дорожнього одягу мостів з композитною арматурою.

Методи дослідження – аналітичні (з використанням положень теорій пружності та пластичності на основі теорії шаруватих систем), дедукції (дослідження міцності шарів дорожнього одягу у спільній роботі з плитою прогонової будови мосту та відшарованого від плити), моделювання (вивчення поведінки плит прогонових будов мостів при використанні різних матеріалів армування та дорожнього одягу при різній глибині закладання арматури), порівняння (зіставлення результатів розрахунку за удосконаленим методом з експериментальними дослідженнями з метою встановлення адекватності).

Наукова новизна:

- на підставі теорії згину шаруватих конструкцій з врахування поперечних нормальних напружень від обтиснення удосконалено метод розрахунку армобетонних конструктивних елементів дорожнього одягу прогонових будов мостів;
- вперше розроблено модель розрахунку та алгоритм проектування дорожнього одягу армованого композитними матеріалами на різних типах прогонової будови мостів, який автоматизовано з використанням програмного комплексу Mathcad;
- отримав подальший розвиток метод розрахунку компонентів напружено-деформованого стану дорожнього одягу.

Практичне значення отриманих результатів:

На основі удосконаленого методу розрахунку армобетонних конструктивних елементів дорожнього одягу прогонових будов мостів отримані уточнені напруження за рахунок поперечного обтиснення та деформацій зсуву, що дає змогу об’єктивно оцінити міцність конструкції.

Модель розрахунку та алгоритм проектування дорожнього одягу, армованого композитними матеріалами, автоматизовано з використанням програмного комплексу Mathcad, що пришвидшує процес розрахунку і сприяє прийняттю обґрунтованих управлінських рішень щодо використання різних матеріалів армування на різній висоті залягання у дорожньому одязі.

У розвиток методу розрахунку компонентів напружено-деформованого стану дорожнього одягу запропоновано використання додаткового коефіцієнту, що дозволяє здійснювати перехід від класичної моделі розрахунку шаруватих конструкцій дорожнього одягу мостів до уточненої.

Результати дослідження сприятимуть довговічності та зносостійкості дорожніх одягів прогонових будов мостів, що, як наслідок, позитивно впливатиме на дотримання міжремонтних строків служби армобетонних конструктивних елементів дорожнього одягу та забезпечить економію коштів на ремонтно-відновлювальні заходи.

Практична апробація результатів була виконана при науково-технічному супроводі реконструкції автомобільної дороги загального користування державного значення М-14 Одеса - Мелітополь - Новоазовськ (на м. Таганрог) на ділянках з влаштуванням цементобетонного покриття: км 142+800 – км 158+500, км 159+500 – км 161+909 з шляхопроводом через залізницю (замовник ТОВ «Міжнародний проектний інститут») та км 158+500 – км 159+500 з транспортною розв'язкою в різних рівнях, км 171+000 – км 176+586 з надземним пішохідним переходом (замовник ТОВ «Інститут комплексного проектування об'єктів будівництва»).

Особистий внесок здобувача. Отримані автором результати теоретичних досліджень та аналітико-розрахункові порівняння з експериментальними, які виносяться на захист, відображені в публікаціях, що оприлюднені у фахових виданнях та виданнях іноземних держав. У публікаціях [6, 8, 9, 10, 12] автором розглянуто методику розрахунку напружено-деформованого стану плити проїзної частини автодорожнього моста, яка пов'язана з теорією згину шаруватих конструкцій з врахуванням поперечних нормальних напружень від обтиснення шарів та теорією пружності для оцінки міцності. У приведеній уточненій неklasичній моделі розрахунку враховано додатково вплив деформацій зсуву за допомогою окремої функції. У праці [7, 11, 15] виконано дослідження вигину балочно-плитних систем мостів під дією синусоїдального навантаження.

За результатами досліджень [1, 2, 4, 5] було удосконалено метод розрахунку конструктивних елементів на основі моделі шаруватих систем від комбінації постійних та тимчасових навантажень для дорожнього одягу, відшарованого від плити прогонової будови, а також, при необхідності, безпосередньо плити, відокремленої від одягу. У публікації [3, 13, 14, 16] розглянуто особливості проектування плит прогонових будов мостів, армованих FRP композитними матеріалами.

У праці [22] проаналізовано важливість врахування якісних показників стану дорожнього одягу в довгострокових контрактах з експлуатаційного утримання автомобільних доріг.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на наукових конференціях професорсько-викладацького складу Національного транспортного університету №№ 70-75 в 2014-2020 рр.; на 11-тій Міжнародній науковій конференції «Математичні проблеми технічної механіки» в 2012 р.; на науково-практичному семінарі «Впровадження інновацій в дорожньому будівництві» ДП «ДерждорНДІ» в 2020 р.; на XII Всеукраїнській заочній науково-практичній конференції «Освіта і наука в Україні: шляхи розвитку та напрямки взаємодії» в 2020 р.; на Міжнародній науковій інтернет-конференції «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» в 2020 р.; на I Міжнародній науково-практичній конференції «Наука. Інновації. Якість» (SIQ) в 2020 р. та на конференції «Modern systems of science and education in the USA, EU and post-Soviet countries» в 2021 р.

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи викладено у 16 публікаціях: 2 статті у виданні іноземної держави, яке включено до міжнародної наукометричної бази, 1 стаття у вигляді розділу зарубіжної монографії, 5 статей у фахових виданнях, 8 праць апробаційного характеру. За матеріалами дисертаційних досліджень отримано 6 охоронних документів (1 патент України, 5 свідоцтв України про реєстрацію авторського права).

Структура дисертації. Дисертація включає вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел із 156 найменувань та трьох додатків. Основний текст викладений на 132 сторінках. Текст ілюструється 66 рисунками та містить 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність досліджень; наведено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами; визначено мету, задачі, об'єкт, предмет, наукову новизну та методи дослідження; наведено практичне значення отриманих результатів та особистий внесок здобувача; відображено апробацію результатів та основні публікації за темою дисертації; описано структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі показано дослідження причин руйнування армобетонних конструктивних елементів мостів, визначено основні підходи до використання композитних матеріалів у конструкціях дорожнього одягу мостів та виконано аналіз можливостей застосування композитних матеріалів у дорожньому будівництві.

Наведено зарубіжний та вітчизняний досвід використання та дослідження фізико-механічних властивостей композитних матеріалів, зокрема, розглянуто роботи Benmokrane, Deitz, Eitel, El-Ragaby, El-Salakawy, Harik, Alagusundaramoorthy, Siddiqui, Lopez-Anido, Morton, Dutta, Shahrooz, Hassan, Abdelrahman, Tadros, Rizkalla, Holden, Yost, Schmeckpeper, Kwon, Chen, Davalos, Ray, Banibayat, Patnaik, Brik, Sim, Dhand, Wu, Brik, Deák, Czigány, Scheffler, Morozov, Park, Mingchao, Li, Sudha, Mohan, Rathod, Gonbare, Pujari Kishore, Mounika, Maruthi, Harikrishna, Lokesh, Gokilapriya, Dharshini, Suresh, M. Урбанський, Hulin, Lipatov, Borhan, Bailey, Sinica, Ayub, Kabay, Shen, Du, Hewitt, Batchelor, Perdikaris, Beim, Kuang, Morely, П.М. Ковалю, О.І. Валового, О.Ю. Єршоменка, М.О. Валового, Ю.А. Клімова, Ю.А. Вітківського, І.П. Гамеляка, Т.І. Коваль, А.С. Целікова, А.О. Худобича, І.А. Карпюк, А.І. Костюка.

Визначено, що посилення базальтовою арматурою балочно-плитних систем може бути використане як для будівництва нових, так і для зміцнення старих (існуючих) автодорожніх мостів. Проте, з'ясовано, що це твердження вимагає подальшого дослідження поведінки армобетонних конструктивних елементів з використанням композитних матеріалів, для чого необхідно провести аналіз існуючих методів та моделей.

У другому розділі виконані теоретичні дослідження методів та моделей розрахунку шаруватих конструкцій дорожнього одягу мостів. Розглянуті роботи вчених Б.І. Когана, Р.М. Раппорта, М.Б. Корсунського, П.І. Теляєва, Б.С. Радовського, А.К. Приварнікова, В.В. Мозгового, О.Я. Шехтера, А.О. Салля, В.Ф. Бабкова, В.К. Вінокурова, М.І. Горбунов-Посадова, І.А. Меднікова, М.М. Дмитрієва, І.П. Гамеляка, Н.Н. Іванова, Л.І. Манвелова, Г.І. Глушакова, А.В. Михайлова, Н.Н. Волхова, Л.І. Горецького, А.П. Сініціна, Ю. Н. Жемочкіна, О.Н. Троцького, В.А. Кульчицького, С.Г. Лехницького, В.Г. Піскунова, С.А. Амбарцумяна, С.П. Тимошенка, О.О. Рассказова, В.С. Сіпетова, О.П. Каніна, Б.В. Гриневіцького, І.О. Кондрюкової, Б.Г. Гальоркіна, Б.Ф. Власова, А.В. Мішутіна, Л.Е. Брюккера, Дж. Гудієра, А.П. Прусакова, Н.В. Павленко, Я.М. Григоренка, А.Т. Василенка, Н.Д. Панкратової, А. Нурома, В. Бартон, М. Савоя, Дж. Редді, І.І. Воровича, А.Л. Гольденвейзера, В.З. Власова, Н.Н. Леонтьєва, Н.А. Кільчевського, А.І. Лур'є, Х.М. Муштарі, І.Г. Терегулова, О.М. Марчука, Ф.А. Когана, Е. Рейснера, В.І. Корольова, П.П. Чулкова, Е.І. Григолюка, Л.В. Баєва, В.В. Болотіна, Ю.Н. Новічкова, А.Т. Василенка, І.Н. Векуа, В.І. Гуляєва, В.К. Чибірякова, І.Ю. Хоми, А.А. Сахарова, А.В. Буригіної, О.В. Горика, В.Н. Череднікова, Ali Mohammadi Mohaghegh.

Проаналізовані наукові праці показали сучасний стан проблеми розрахунку шаруватих композитних конструкцій, в тому числі плит автодорожнього моста.

Визначено, що є необхідність у застосуванні для їх розрахунку уточнених моделей, які враховують вплив деформацій поперечного зсуву. Аналіз застосування досліджених методів розрахунку багатошарових та одношарових плит дав можливість певного об'єднання різних методик для створення ефективного підходу до визначення напруженого стану конструктивних елементів дорожнього одягу як шаруватої системи.

У результаті дослідження запропоновано удосконалення методу розрахунку плит проїзної частини прогонової будови мосту, який розроблений на підставі теорії згину шаруватих конструкцій із врахуванням поперечних нормальних напружень від обтиснення.

Досліджено напружено-деформований стан елементарної частини плити, конструкцію якої утворюють ізотропні шари різної жорсткості по товщині. Це дало можливість розглянути роботу всіх шарів з різними товщинами та фізико-механічними характеристиками.

На першому етапі удосконалення методу введені гіпотези Кірхгофа, а на другому – отримані вирази поперечних напружень, які дали можливість ввести гіпотези, що враховують вплив деформацій зсуву. Варіаційним шляхом отримано рівняння рівноваги, граничні умови та загальну систему розв'язуючих рівнянь.

З систем диференціальних рівнянь отримано вираз функції прогину за довжиною балки для випадку синусоїдального навантаження:

$$w(x) = \left[\left(\sum_{i=0}^n q_{z0}^{(i)} c_z^{(i)} \right) \cdot \left[\left(\frac{1}{D_{11}} + \left(\frac{D_{12}}{D_{11}} \right)^2 \right) \right] / \left[D_{22} + \frac{l^2}{\pi^2} \bar{D} - \left(\frac{D_{12}}{D_{11}} \right)^2 \right] \right] \cdot \frac{l^4}{\pi^4} \cdot \sin \left(\frac{\pi x}{l} \right), \quad (1)$$

де D_{11} , D_{12} , D_{22} – характеристики жорсткості; q_{z0} - амплітуда навантажень; w - прогин; l - довжина балочно-плитної системи.

Застосовано аналогію, яка дозволила розв'язок задачі в уточненій постановці та зведення її до розв'язку на основі класичної теорії, що значною мірою спрощує отримання результатів.

У третьому розділі розглянуто побудову моделі та алгоритму розрахунку за удосконаленим методом.

Удосконалений метод спрямований на розрахунок дорожнього одягу для найбільш розповсюджених в мостовій галузі України типів прогонових будов таких як ребристі, плитні, плитно-ребристі та коробчасті, а також для індивідуально запроектованих прогонових будов. В основу удосконаленого методу розрахунку армобетонних конструктивних елементів дорожнього одягу покладено:

- розрахункові залежності теорії згину шаруватих конструкцій (балок, плит), уточнені врахуванням поперечних нормальних напружень від обтиснення шарів;

- залежності теорії пружності для оцінки міцності матеріалів конструкцій та характеристики матеріалів, що входять до шаруватих конструкцій прогонових будов і дорожніх одягів;

- методи визначення зусиль (згинаючих моментів), що застосовуються при розрахунках конструкцій прогонових будов залізобетонних мостів та безпосередньо результати визначення зусиль за даними типових проектів.

Принципова модель розрахунку дорожнього одягу армованого композитними матеріалами на різних типах прогонових будов мостів представлена на рис.1.

На базі моделі було розроблено алгоритм проектування армованого цементобетонного дорожнього одягу на прогоновій будові мосту, який реалізовано у програмному комплексі Mathcad (рис.2).

Для дослідження напружено-деформованого стану конструктивних елементів застосування удосконаленого методу передбачає наступні варіанти розрахункових схем Ghttконструкції:

- загальний спільний пакет шарів дорожнього одягу та конструкції, відповідно плитної, ребристої або іншої прогонової будови при його роботі у пружній стадії;
- аналогічний пакет шарів, при виключенні з роботи бетону в розтягнутій зоні плити;
- пакет дорожнього одягу, відшарований від плити по поверхні їх контакту (шару гідроізоляції);
- пакет дорожнього одягу, відшарований від плити, у якій виключено з роботи бетон у розтягнутій зоні.

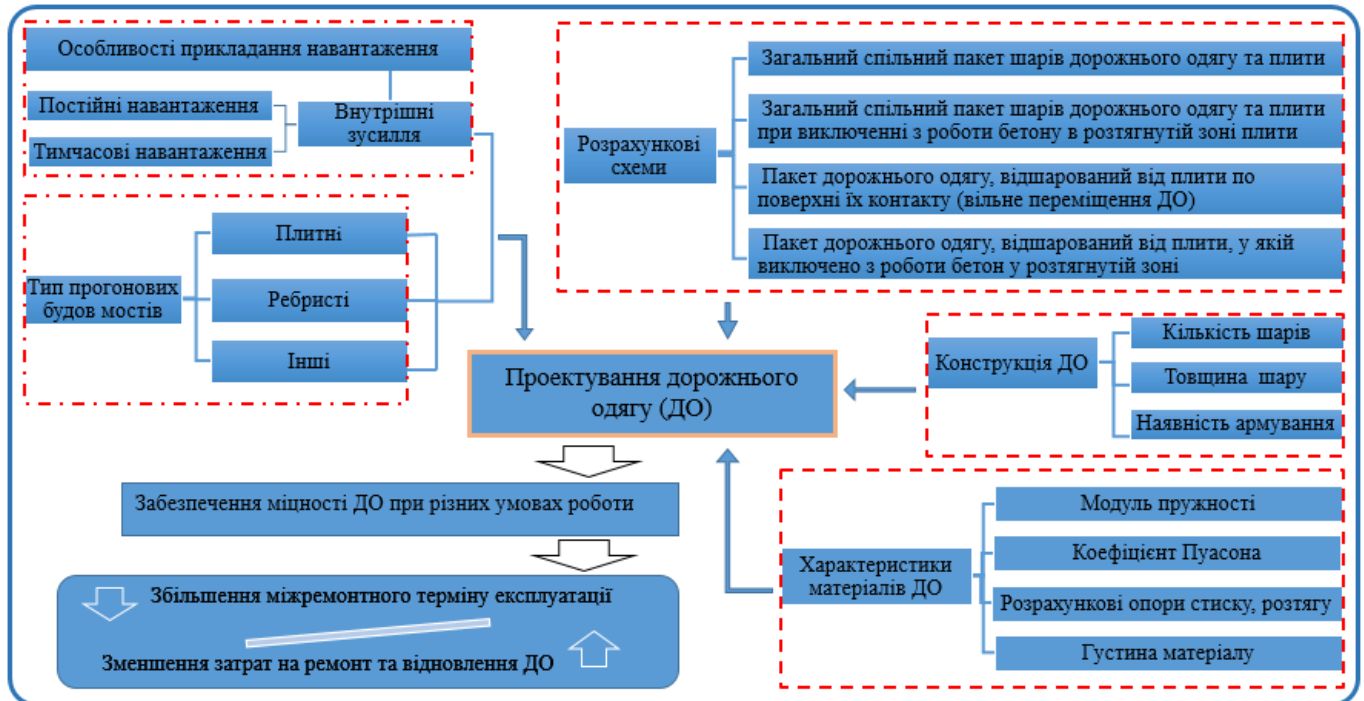


Рисунок 1 – Модель розрахунку дорожнього одягу, армованого композитними матеріалами

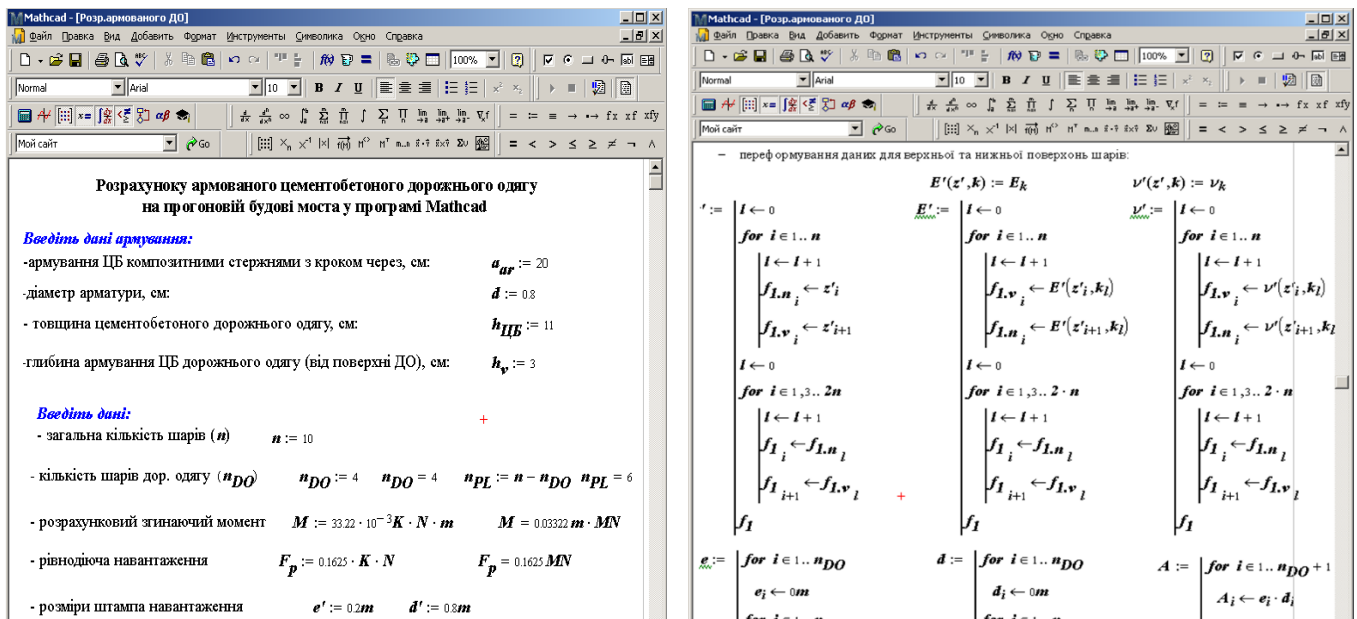


Рисунок 2 – Вигляд автоматизованого алгоритму перевірки міцності армованого дорожнього одягу

Дорожній одяг та плита прогонової будови розглядається в загальному пакеті з шарами як єдина шарувата конструкція (рис. 3).

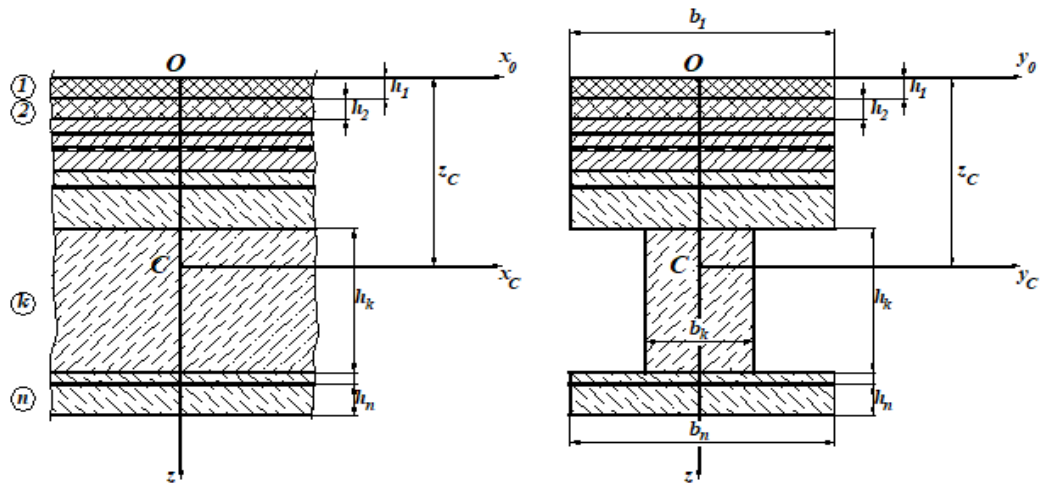


Рисунок 3 – Схема пакету шаруватої конструкції

Кожен шар $i=1,2,...,n$ має свою задану товщину h_i (м), ширину b_i (м) та фізико-механічні характеристики: модуль пружності E_i (МПа), коефіцієнт Пуассона ν_i , розрахункові опори на розтяг R_{pi} (МПа) та стиск R_{cti} (МПа). Характеристики бетону та арматури приймаються згідно чинних нормативно-технічних документів.

Армування конструкції замінюється еквівалентним до її загальної площі шаром з відповідною до цієї площі товщиною. Ширина шарів b_i у перерізі приймається як розрахункова ширина смуги плити для визначення згинаючого розрахункового моменту (зазвичай $b_i = b = 1$ м). Для плитних прогонових будов з пустотних блоків ширина плити дорівнює ширині блоку ($b_i = b = 1$ м), а на рівні пустот – товщині стінки приведенного до форми двотаврового перерізу плитного блока.

У вихідні дані також входить розрахунковий згинаючий момент M та рівнодіюча тимчасового нормативного навантаження F_p , що діє по площі штампу навантаження згідно з нормативно-правовими документами (наприклад, для А-15 – розмір штампу $e_{AT} = 0.2$ м, $d_{AT} = 0.6$ м, а для НК-100 – $e_{HK} = 0.2$ м, $d_{HK} = 0.8$ м). Рівнодіюча сила F_p визначається з урахуванням коефіцієнту надійності та динамічного коефіцієнту. Якщо розрахунковий момент виникає від двох смуг навантаження А-15, то приймається $F_p = 0$.

Для розрахунку дорожнього одягу, відшарованого від плити прогонової будови, а також, при необхідності, безпосередньо плити, відокремленої від одягу, виконується перерозподіл розрахункового згинаючого моменту.

Наступним кроком є визначення центра ваги відносно жорсткості. Для кожного шару визначається:

- 1) жорсткість на розтяг:

$$B = \begin{cases} \text{for } i \in 1..n \\ B_i \leftarrow \frac{E_i \cdot b_i \cdot h_i}{1 - (\nu_i)^2} \\ B \end{cases} \quad (2)$$

- 2) координати центрів ваги відносно осі, положення якої збігається з верхньою межею конструкції:

$$z = \begin{cases} \text{for } i \in 1..n-1 \\ \left| \begin{array}{l} z_1 \leftarrow \frac{h_1}{2} \\ z_{i+1} \leftarrow \sum_{i=1}^i h_i + \frac{h_i + 1}{2} \text{ if } n \neq 1 \end{array} \right. \\ z \end{cases} \quad (3)$$

Координата центра ваги (жорсткості) усього пакету шарів конструкції знаходиться за формулою:

$$z_C = \frac{\sum_{i=1}^n B_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n B_i} \quad (4)$$

Координата визначає положення центральної осі (рис. 3).

Для кожного шару $i = 1, 2, \dots, n$ визначається власна циліндрична жорсткість при згині:

$$D = \begin{cases} \text{for } i \in 1..1 \\ \left| \begin{array}{l} D_i \leftarrow \frac{B_i \cdot (h_i)^2}{12} \end{array} \right. \\ D \end{cases} \quad (5)$$

Координати центрів ваги (жорсткості) шарів відносно центральної осі Cy_C визначаємо наступним чином:

$$c = \begin{cases} \text{for } i \in 1..n \\ \left| \begin{array}{l} c_i \leftarrow z_i - z_C \end{array} \right. \\ c \end{cases} \quad (6)$$

Визначаємо загальну жорсткість конструкції плити при згині – циліндричну жорсткість:

$$D = \sum_{i=1}^n (D_i + c_i^2 \cdot B_i) \quad (7)$$

Центральна вісь Cy_C розділяє переріз плити на стиснуту та розтягнуту зони. У розтягнутій зоні утворюються тріщини в бетоні, внаслідок чого ця зона виключається з роботи плити. Для цієї зони виконується перерозподіл шарів. Шар $i = k$ (рис. 3) товщиною h_k , у якому розташована центральна вісь, визначена координатою z_C , розділяється на два шари, один з яких лежить вище від осі Cy_C , а інший – нижче. Їх товщини відповідно:

$$h'_k = z_C - \sum_{i=1}^{k-1} h_i, \quad h''_k = h_k - h'_k \quad (8)$$

Призначається нова послідовна нумерація шарів $i = 1, 2, \dots, n$, кількість яких збільшується на одиницю, у зв'язку з попереднім розділенням шару. Згідно з новою нумерацією переформовуються відповідні значення $h_i, b_i, E_i, \nu_i, R_{P_i}, R_{CT_i}$. Для бетонних шарів, які розташовані у розтягнутій зоні (нижче від осі Cy_C) приймається модуль пружності з умовним значенням $E_i = 1 \text{ МПа}$.

Повторюється процедура визначення циліндричної жорсткості плити за формулами (2) – (7), в яких $z_C = z'_C$. Координата центра ваги z'_C визначає нове положення центральної осі $C'y'_C$.

Циліндрична жорсткість конструкції, яка розшарована по поверхні контакту між дорожнім одягом та плитою, визначається як сума жорсткостей шарів дорожнього одягу та плити:

$$D_{\Sigma} = D_{DO} + D_{PL}. \quad (9)$$

Розшарування може бути наслідком руйнування шарів (гідроізоляція, вирівнюючий шар) у контактній зоні в процесі експлуатації або передбаченим проектом.

Кожна з жорсткостей D_{DO} та D_{PL} знаходиться за алгоритмом згідно з формулами (2) – (8), які застосовуються для кожного з пакетів шарів – одягу та плити, відокремлених один від одного. Для кожної конструкції вводиться своя нумерація шарів $i=1,2,...,n$ та відповідно до неї характеристики $h_i, b_i, E_i, \nu_i, R_{P_i}, R_{CT_i}$.

Циліндричні жорсткості D_{DO} та D_{PL} визначаються за кінцевою формулою всього алгоритму – формулою (6), у якій $D = D_{DO}$ та $D = D_{PL}$. Жорсткість D_{Σ} є їх сумою згідно з формулою (9).

Якщо ж дорожній одяг відшарований від плити, то напруження в ньому розраховують від моменту M_{DO} , що сприймає дорожній одяг, а напруження у плиті – від моменту M_{PL} , що сприймає плита:

$$M_{DO} = M \cdot \frac{D_{DO}}{D_{\Sigma}}, \quad M_{PL} = M \cdot \frac{D_{PL}}{D_{\Sigma}}. \quad (10)$$

Відповідно D_{Σ} визначається за формулою (9), а D_{DO} та D_{PL} за формулою (7), в якій приймається $D = D_{DO}$ та $D = D_{PL}$.

Загальний згинаючий момент дорівнює їх сумі:

$$M = M_{DO} + M_{PL}. \quad (11)$$

Процедура визначення напружень в усіх випадках однакова.

Наступним етапом є визначення напруження пошарово для загального пакету шарів від розрахункового згинаючого моменту M в дорожньому одязі, який працює спільно з плитою:

$$\sigma_i^{(\pm)} = \frac{E_i \cdot M}{(1 - \nu_i^2) \cdot D} \cdot z_i^{(\pm)}. \quad (12)$$

Для визначення напружень у шарах дорожнього одягу та плити відшарованих один від одного, у формулі (12) приймається відповідно $M = M_{DO}$, $D = D_{DO}$ та $M = M_{PL}$, $D = D_{PL}$.

Проводиться уточнення напружень за рахунок впливу поперечного обтіснення (поперечних нормальних напружень), для чого виконується розподіл рівнодіючої сили тимчасових навантажень F_p від яких виникає розрахунковий згинаючий момент, за товщиною дорожнього одягу.

Визначаються площі, через які передається рівнодіюча F_p на верхню поверхню дорожнього одягу ($A_1^{(+)} = e_1 \cdot d_1$) та верхні поверхні послідовних шарів:

$$A_i^{(+)} = e_i \cdot d_i = (e_{i-1} + 2 \cdot h_i) \cdot (d_{i-1} + 2 \cdot h_i), \quad A_{i-1}^{(-)} = A_i^{(+)}, \quad (13)$$

де e_1, d_1 – розміри ділянок (відповідно вздовж і поперек осі моста) передачі навантаження F_p на верхню поверхню дорожнього одягу;

h_i – товщина i -того шару.

Далі визначаємо тиск на поверхні одягу (14) та поверхнях між шарами (15) й відповідні поперечні нормальні напруження (16):

$$\sigma_{z_1}^{(+)} = -q_1^{(+)} = -\frac{F_p}{A_1^{(+)}}, \quad (14)$$

$$\sigma_{z_1}^{(-)} = \sigma_{z_2}^{(+)} = -q_2^{(+)} = -\frac{F_p}{A_2^{(+)}}, \quad (15)$$

$$\sigma_{z_{i-1}}^{(-)} = \sigma_{z_i}^{(+)} = -q_i^{(+)} = -\frac{F_{PO3P}}{A_i^{(+)}}. \quad (16)$$

Визначаємо повні уточнені нормальні напруження в шарах одягу з урахуванням поперечних нормальних напружень:

$$\bar{\sigma}_i^{(\pm)} = (1 - \nu_i^2) \cdot \sigma_i^{(\pm)} + \nu_i \cdot \sigma_{z_i}^{(\pm)}. \quad (17)$$

Для оцінки міцності матеріалу шарів використовується критерій міцності Кулона–Мора, який застосовується для матеріалів, що мають різний розрахунковий опір розтягу R_p та стиску R_{CT} .

Формуються головні напруження для кожного шару дорожнього одягу з уточнених поздовжніх нормальних напружень $\bar{\sigma}_i^{(\pm)}$ та поперечних нормальних напружень $\sigma_{z_i}^{(\pm)}$:

$$\sigma_{\max_i}^{(\pm)} = \frac{1}{2} \left[\left(\bar{\sigma}_i^{(\pm)} + \sigma_{z_i}^{(\pm)} \right) + \sqrt{\left(\bar{\sigma}_i^{(\pm)} - \sigma_{z_i}^{(\pm)} \right)^2} \right], \quad (18)$$

$$\sigma_{\min_i}^{(\pm)} = \frac{1}{2} \left[\left(\bar{\sigma}_i^{(\pm)} + \sigma_{z_i}^{(\pm)} \right) - \sqrt{\left(\bar{\sigma}_i^{(\pm)} - \sigma_{z_i}^{(\pm)} \right)^2} \right]. \quad (19)$$

Пошарово визначаються еквівалентні напруження та виконується перевірка міцності:

$$\sigma_{ekv_i}^{(\pm)} = \sigma_{\max_i}^{(\pm)} - \frac{R_{p_i}}{R_{CT_i}} \sigma_{\min_i}^{(\pm)} \leq R_{p_i}. \quad (20)$$

Для подальшого дослідження адекватності удосконаленого методу розрахунку армобетонних конструктивних елементів мостів було здійснено обчислення на реальному прикладі. Для початку було визначено вплив деформацій зсуву та поперечних нормальних напружень, які не враховуються у класичній теорії балок.

Дорожній одяг в запропонованому удосконаленому методі розрахунку працює в спільній роботі з плитою прогонової будови мосту. Розрахунок автоматизовано за допомогою програмного комплексу Mathcad, в основу якого покладено прольотну будову мосту з поперечним перерізом із 6 балок, що розташовані на відстані 2,3 м одна від одної з довжиною 30,6 м, аналогічно мосту Воттон, Канада (рис. 4). Плита проїзної частини моста розглядається як нерозрізна 5-прольотна система шириною b .

Поперечний переріз дорожнього одягу та плити прогонової будови розбитий на шари певних матеріалів із окремими фізико-механічними характеристиками. Прийнята конструкція складається з 5 шарів дорожнього одягу та 5 шарів залізобетонної плити, яка розміщена на тавровій балці (рис.4).

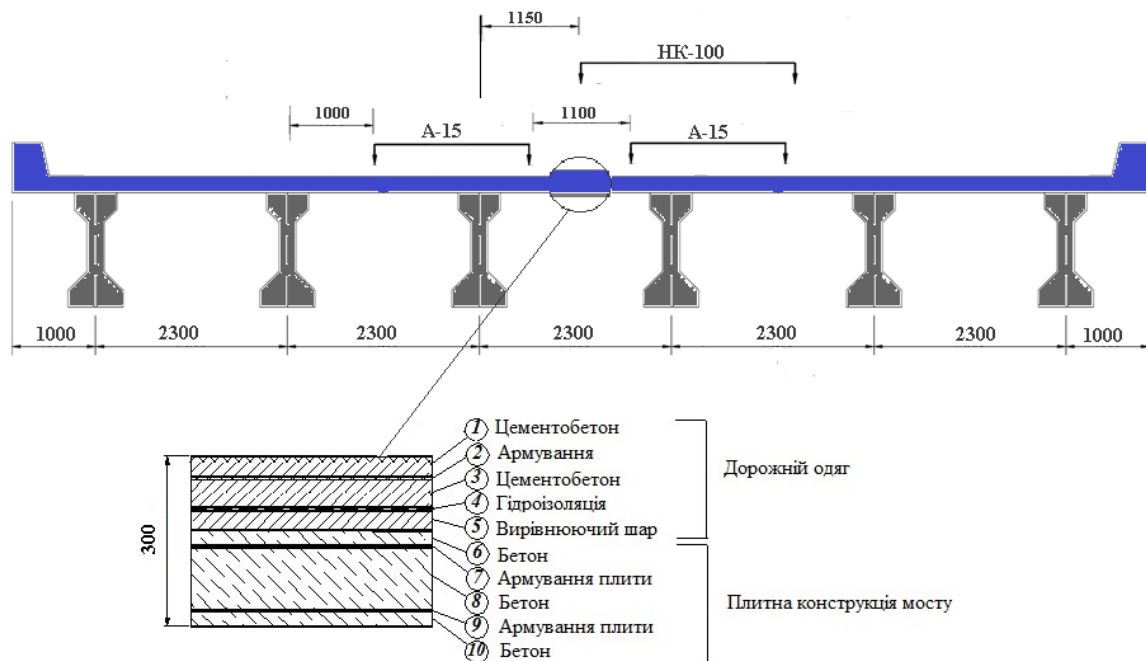


Рисунок 4 – Поперечний переріз дорожнього одягу та плити прогонової будови мосту

У даному перерізі було отримано графіки компонентів напружено-деформованого стану та виконано перевірку міцності прийнятої конструкції. На графіку (рис.5) показано характерні лінії прогинів, обчислених за класичною теорією (зелена лінія), враховуючи уточнення за рахунок деформацій зсуву (помаранчева лінія) та сумарний уточнений прогин (синя лінія).

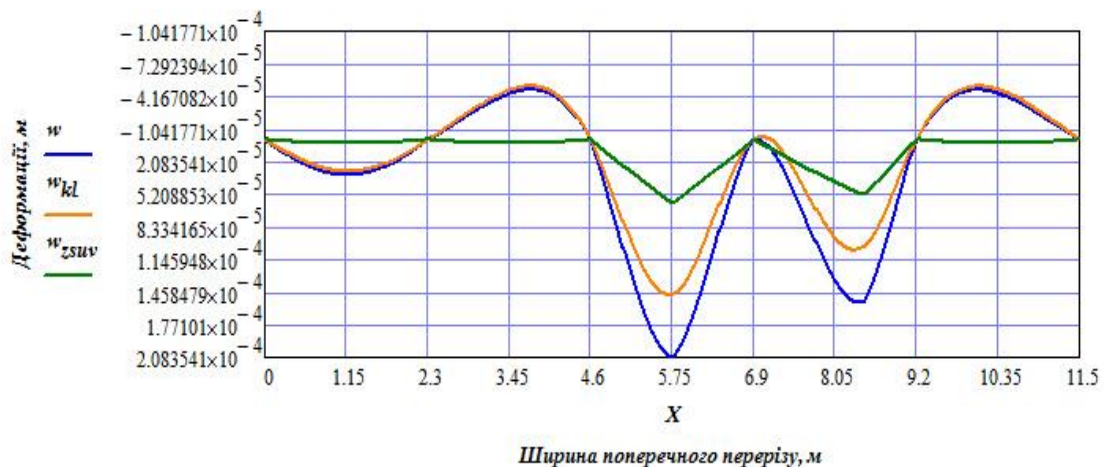


Рисунок 5 – Епюра прогинів від небезпечного навантаження при армуванні BFRP

За цими графіками зроблено висновок, що класична теорія не враховує розподіл деформацій на ненавантажені прольоти. Максимальний прогин нерозрізної плити виникає в 3-му прольоті, найбільший прогин конструкції спостерігається з армуванням BFRP.

Завдяки даним дослідженням було визначено, що співвідношення прогину за уточненою та класичною моделями складає 1,4078 та 1,4042, що дає можливість застосування коефіцієнта переходу для прогинів у розмірі $\approx 1,4$.

Оцінку характеру амплітуди дотичних напружень в арматурі, яка розміщена у верхніх шарах плити, можна здійснити за побудованими епюрами (рис. 6 – 7).



Рисунок 6 – Епюра розподілу дотичних напружень у верхньому поясі армування

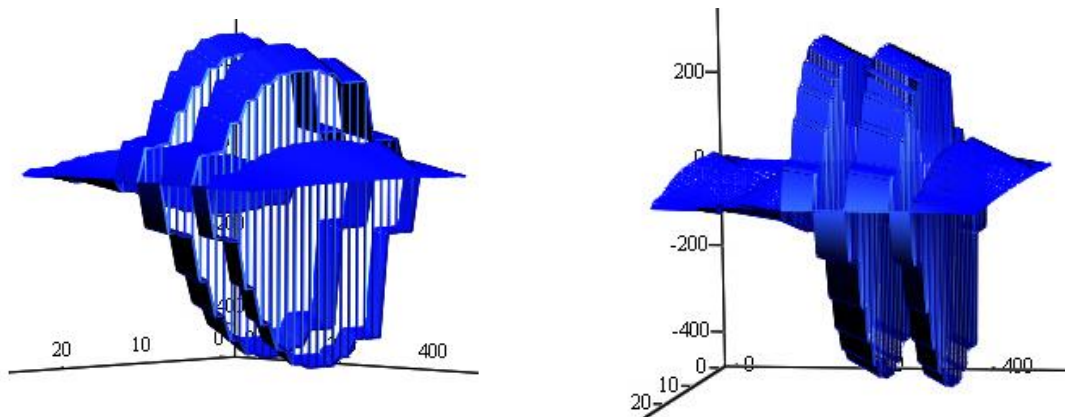


Рисунок 7 – 3D розподіл дотичних напружень у верхньому поясі армування плити

На рис. 8 наведено 3D вигляд розподілу нормальних напружень посередині третього прольоту.

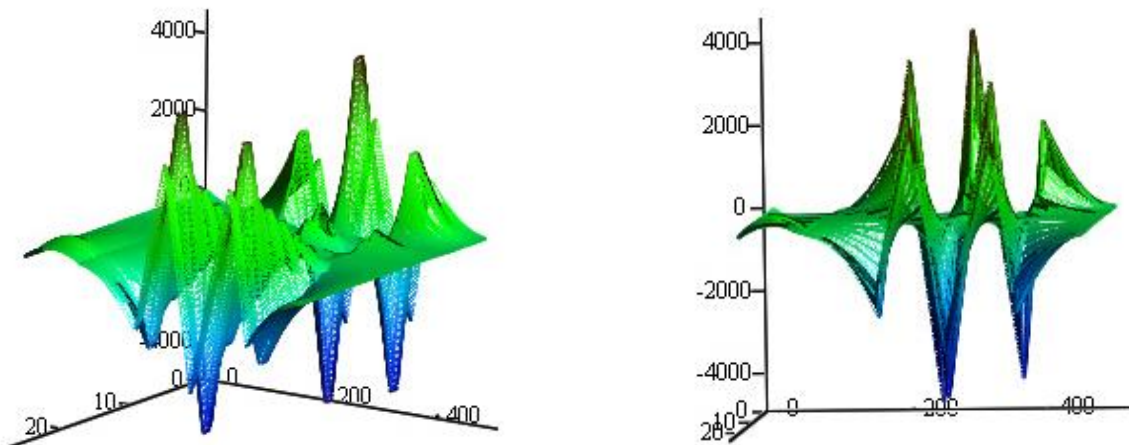


Рисунок 8 – 3D модель розподілу нормальних напружень

За наведеними еквівалентними епюрами (рис.9) зроблено висновок, що еквівалентні напруження (синя лінія) в небезпечному опорному перерізі та посередині третього прольоту не перевищують розрахункові опори матеріалів. Отже, міцність забезпечена без виникнення тріщин.

Еквівалентні напруження, які виникають у нижньому шарі армування BFRP арматурою плити, в 3,6 разів перевищують відповідні значення при армуванні сталевую арматурою, що пов'язано із значною міцністю композиту.

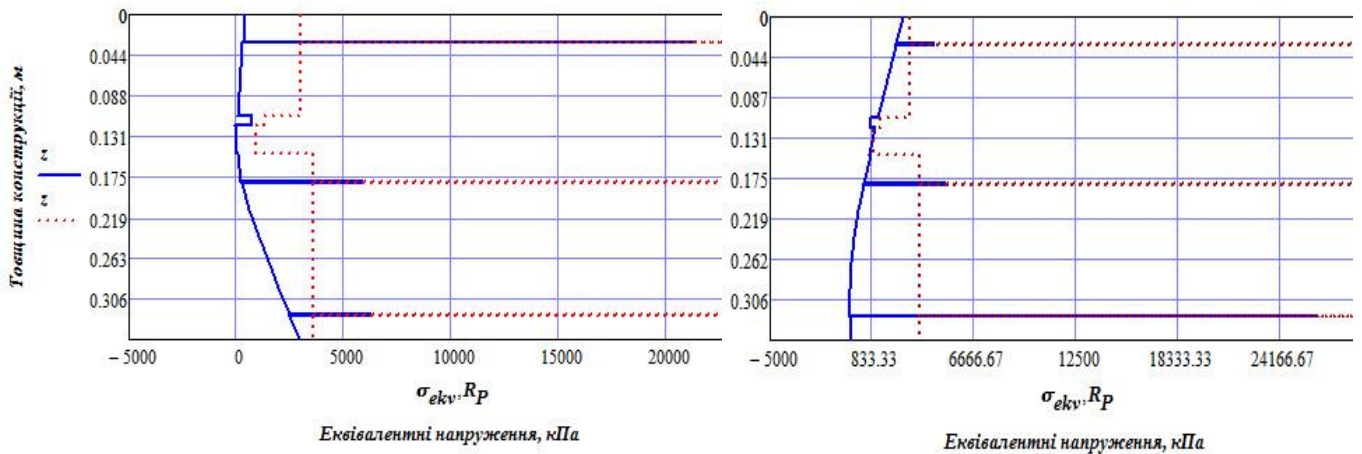


Рисунок 9 – Епюри розподілу еквівалентних напружень посередині небезпечного прольоту та на опорі із застосуванням BFRP-армування плити

У верхній зоні конструкції еквівалентні напруження близькі до розрахункових опорів матеріалу, тому є доцільність застосування армування у шарах цементобетонного дорожнього одягу для попередження утворення тріщин.

У **четвертому розділі** наведена порівняльна характеристика експериментальних досліджень, розрахунків в програмному комплексі ANSYS 14.0 та практична реалізація удосконаленого методу армобетонних конструктивних елементів дорожнього одягу мостів.

Аналіз експериментальних випробувань здійснено на основі даних про роботу плит, які були виготовлені з використанням FRP-армування, мосту Воттон (Квебек, Канада). При випробуванні плит прогонових будов максимальні значення деформації розтягу бетону були дуже малі та знаходилися на рівні 10-25 мікронапружень. Ці значення істотно нижчі деформації руйнування бетону, які розташовуються в інтервалі від 100 до 125 мікронапружень для звичайного важкого бетону. Максимальна деформація розтягування в композитної арматури склала 15 мікронапружень, що становить 0,1% від граничної деформації матеріалу. Прогини досліджених плит прогонових будов реального мосту були істотно нижчі, ніж допустимі межі, визначені американською асоціацією AASHTO (рис. 10).

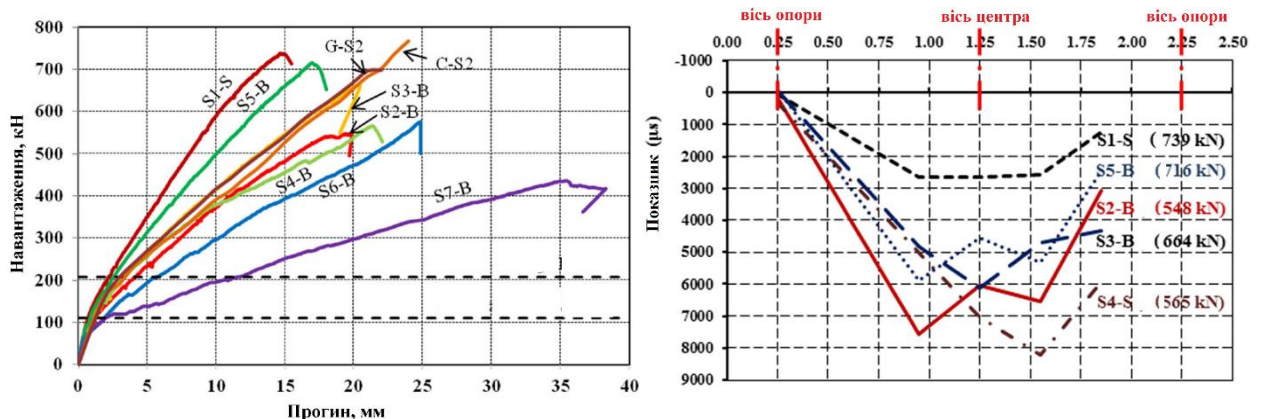


Рисунок 10 – Залежність прогинів та мікронапружень від навантаження

З метою дослідження мосту та перевірки нелінійної реакції вибраної мостової системи було змодельовано його конструкцію у програмному комплексі ANSYS 14.0.

На рис. 11 показано 3D вигляд змодельованого мосту з навантаженням згідно стандартів CHBDC (CAN / CSA-S6- 00).

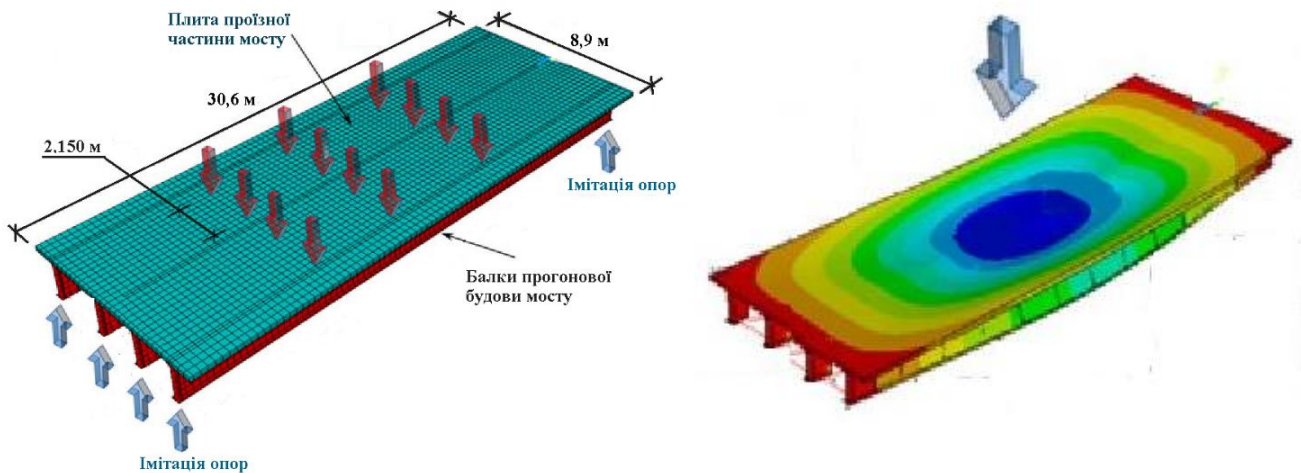


Рисунок 11 – Приклад змодельованого реального мосту з використання FRP- армування

Порівняння результатів показують, що відношення прогинів між теоретичним та експериментальним дослідженням плити армованою FRP-композитом становила 1,13; відношення за уточненим методом розрахунку відношення становило 1,07 (рис. 12). Отримані результати вказують про адекватність запропонованого уточненого методу розрахунку армобетонних конструктивних елементів.

У результаті проведених досліджень зроблені практичні рекомендації щодо підсилення дорожнього одягу мостів FRP-арматурою. При проектуванні покриття на плитах прогонових будовах мосту необхідно враховувати деформації, які виникають при навантаженні конструкції. Напруження у верхньому шарі дорожнього одягу перевищують гранично допустимі при розміщенні арматури в нижній частині, що призводить до розтріскування захисного шару покриття. Напруження, які виникають в FRP стержнях, відрізняються в 2,22 до 6,74 разів в порівнянні зі сталеву арматурою, що пов'язано з особливостями цих матеріалів.

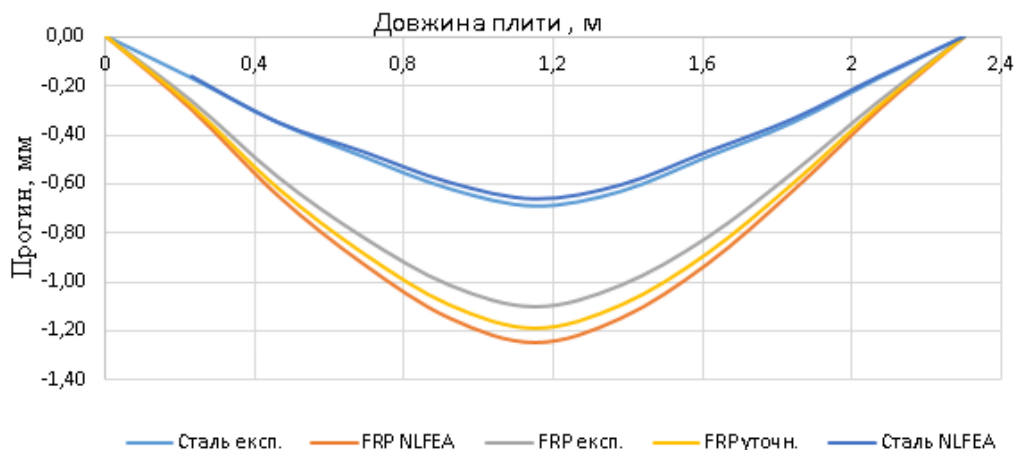


Рисунок 12 – Порівняльний графік прогинів плити в другому прольоті

Визначено, що залишковий ресурс реконструйованої плити прогонової будови мосту з використанням FRP-композитів в 1,2 рази більший ніж при звичайному сталевому армуванні. Це вказує на ефективність застосування FRP-армування при будівництві та реконструкції плит прогонових будов.

Результати дослідження впроваджено у навчальний процес Національного транспортного університету для проведення занять зі студентами спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» за усіма освітніми програмами; в Державному

агентстві автомобільних доріг України (Укравтодор) під час виконання НДР; в Комунальному підприємстві по ремонту і утриманню мостів і шляхів м. Києва «Київшляхміст»; в ТОВ «Науково-виробничому центрі «ДорбудТехнологія»; в ПП «Парк Нових Технологій»; в ТОВ «Торговий дім АРОН»; в ТОВ «Міжнародний проектний інститут»; в ТОВ «Інститут комплексного проектування об'єктів будівництва».

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі були вирішені актуальні науково-прикладні задачі в сфері дорожньо-мостового будівництва:

1. Проведено дослідження причин руйнування залізобетонних конструктивних елементів мостів. Встановлено, що основними причинами руйнування цих елементів є корозія сталевих арматур, втрата об'єму робочої частини, незадовільний стан компенсаційних швів на опорах, низька стійкість бетону при згинальних навантаженнях. Визначено, що основними підходами до вирішення виявлених проблем згідно з світовою практикою є застосування композитних матеріалів (FRP-арматури) у якості підсилення конструкцій, прогресивним з яких вважається базальт.

2. Удосконалено метод розрахунку армобетонних конструктивних елементів дорожнього одягу мостів, який розроблений на підставі теорії згину шаруватих конструкцій з врахуванням поперечних нормальних напружень від обтиснення, на основі узагальнення досліджень основних підходів до вирішення проблем зносостійкості елементів, методів та моделей розрахунку конструкцій на міцність. При розробці удосконаленого методу було досліджено напружено-деформований стан плити як достатньо тонкої оболонки, яка складається з ізотропних шарів з різними фізико-механічними характеристиками. При цьому були введені гіпотези Кірхгофа та отримані вирази поперечних напружень, які дали можливість врахувати в методі розрахунку вплив деформацій зсуву. У результаті досліджень було отримано рівняння рівноваги варіаційним шляхом, граничні умови та загальну систему розв'язуючих рівнянь.

3. Розроблено модель та алгоритм застосування удосконаленого розрахунку цементобетонного дорожнього одягу армованого композитними матеріалами, на основі шаруватих систем. Алгоритм застосування удосконаленого методу дозволяє практично визначити нормальні напруження в шарах дорожнього одягу та виконати перевірку міцності за еквівалентними напруженнями, застосовуючи критерій міцності Кулона-Мора. Для визначення валідації запропонованого методу було проведено розрахунок на прикладі конструкції прогонової будови мосту при застосуванні армування різними матеріалами. За результатами розрахунків за удосконаленим методом отримано коефіцієнт співвідношення прогинів армобетонних конструктивних елементів за класичною теорією та уточненим методом, який становить 1,4 та підтверджує доцільність врахування деформацій зсуву при проектуванні плит прогонових будов мостів. Також було зроблено практичний висновок щодо доцільності армування верхнього шару дорожнього одягу з метою забезпечення його міцності та експлуатаційних характеристик.

4. Проведений аналіз експериментальних досліджень плит прогонових будов мостів, армованих FRP-стержнями від концентрованого навантаження колесом показав, що основною причиною руйнування конструкції є не згинання, а складний внутрішній напружений стан, який викликаний деформаціями зсуву. Результати дослідження компонентів напружено-деформованого стану плит прогонових будов показали, що максимальні значення деформації розтягу бетону були дуже малі та знаходилися на рівні 10-25 мікронапружень, що істотно нижче деформації руйнування бетону. Максимальна деформація розтягування в композитній арматурі склала 15 мікронапружень, що становить 0,1% від граничної деформації матеріалу, що вказує на її ефективну роботу в

конструкції та відповідність стандартам американської асоціації AASHTO. На основі аналізу зроблено висновок про доцільність використання композитної арматури у конструктивних елементах мостів та дорожньому будівництві.

Виконано порівняльний аналіз розрахунку компонентів напружено-деформованого стану плит за удосконаленням методом та у програмному комплексі ANSYS 14.0. Адекватність запропонованого методу була перевірена порівнянням з результатами розрахунків, зробленими в програмному комплексі ANSYS 14.0, та експериментальними дослідженнями, що мають високу збіжність з похибкою 7%.

5. Застосування удосконаленого методу розрахунку цементобетонного дорожнього одягу, армованого композитними матеріалами, на практиці при проектуванні визначає необхідність врахування деформацій, які виникають при навантаженні конструкції мосту. Удосконалений метод дозволяє враховувати різні варіанти роботи дорожнього одягу, що дає можливість передбачити забезпечення міцності в період експлуатації конструкції.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Tsybulskiy Vitalii, Improvement of calculation method of road pavement embankment on the approaches to road bridges. *Integration of traditional and innovation processes of development of modern science: collective monograph / edited by authors*, 3rd ed, Riga, Latvia : "Baltija Publishing", 2020. Pp. 277-297. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-021-6>

Статті у виданнях іноземних держав, які включені до міжнародних наукометричних баз:

2. Tsybulskiy V.M. Development of a method for calculating reinforced concrete structural elements of pavement bridges. *Modern engineering and innovative technologies*. Issue №14, Part 3. Indexed in INDEX COPERNICUS (ICV: 84.35), Germany, 2020. Pp. 6-11. DOI: 10.30890/2567-5273.2020-14-03-053

3. Tsybulskiy V.M., Kharchenko A.N. Features of sliding structures design of bridges reinforced with composite materials. *Modern engineering and innovative technologies*. Issue №15, Part 1. Indexed in INDEX COPERNICUS (ICV: 84.35), Germany, 2021. Pp. 75-83. DOI: 10.30890/2567-5273.2021-15-01-096

Статті у фахових виданнях:

4. Піскунов В.Г., Цибульський В.М. Постановка методики розрахунку армобетонних конструктивних елементів на основі моделі шаруватих систем. *Вісник Національного транспортного університету*. К.: НТУ, 2011. С. 327-332. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2011_24\(2\)_81](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2011_24(2)_81)

5. Піскунов В.Г., Цибульський В.М. Розрахунок шаруватих конструкцій дорожнього одягу мостів армованого композитними матеріалами. *Вісник Національного транспортного університету*. 2012. Вип. 26. С. 448-452. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2012_26\(2\)_89](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2012_26(2)_89)

6. Канін О.П., Гриневицький Б.В., Цибульський В.М. Побудова неklasичної розрахункової моделі міцності композитної балочно-плитної конструкції автодорожніх мостів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Науково-технічний збірник*, 2018. Вип. 104. С. 82-86. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/104/82.pdf

7. Канін О.П., Гриневицький Б.В., Цибульський В.М. Порівняльний аналіз вигину балочно-плитних систем мостів під дією синусоїдального навантаження. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Науково-технічний збірник*, 2019. Вип. 106. С. 105-109. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/106/105.pdf

8. Канін О.П., Гриневецький Б.В., Цибульський В.М. Розрахунок плити проїзної частини автодорожнього моста за неklasичною моделлю. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Науково-технічний збірник*, 2020. Вип. 107. С. 40-44. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/107/40.pdf

Опубліковані праці апробаційного характеру:

9. Піскунов В.Г., Цибульський В.М. Розрахунок плит дорожнього одягу мостів з армобетонних конструктивних елементів на основі моделі шаруватих систем. 11-та Міжнародна наукова конференція «Математичні проблеми технічної механіки»: тези доповідей, м. Дніпродзержинськ, 2012. С. 173.

10. Коваль М.П., Кот Д.В., Цибульський В.М. Дослідження напружено-деформованого стану плит проїзної частини автодорожніх мостів зі залізобетонною незнімною опалубкою за допомогою натурних випробувань. LXX наукова конференція професорсько-викладацького складу, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. К.: НТУ, 2014. С. 192.

11. Цибульський В.М. Порівняльний аналіз розрахунку елементів прогонових будов мостів з армуванням різними матеріалами. LXXII наукова конференція професорсько-викладацького складу, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. К.: НТУ, 2016. С. 217.

12. Цибульський В.М., Запотіцький М.М., Шульжик А.Р. Дослідження впливу динамічних та ударних навантажень на конструкції. LXX наукова конференція професорсько-викладацького складу, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. К.: НТУ, 2019. С. 242.

13. Цибульський В.М. Зарубіжний досвід використання сучасних композитних матеріалів для посилення бетонних конструктивних елементів мостів. I Міжнародна науково-практична конференція «Наука. Інновації. Якість» (SIQ): тези доповідей, м. Бердянськ, БДПУ, 2020. С. 203-207.

14. Цибульський В.М. Сучасні матеріали для армобетонних конструкцій автодорожніх мостів. XII Всеукраїнська заочна науково-практична конференція, Освіта і наука в Україні: шляхи розвитку та напрямки взаємодії: тези доповідей. м. Харків, 2020. С. 16-17.

15. Цибульський В.М. Дослідження поведінки армобетонних конструктивних елементів з використанням базальтових композитних матеріалів. Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення», випуск 54: тези доповідей, м. Тернопіль, 2020. С. 100-103.

16. Цибульський В.М., Харченко А.М. Аналіз властивостей композитних матеріалів, використаних для армування плит прогонових будов мостів. *Modern systems of science and education in the USA, EU and post-Soviet countries*, 2021. С. 46-49.

Свідоцтва та патенти:

17. Патент України на корисну модель №82232 Україна, МПК (2013), 7 H01 C7/00. Резистивний композитний матеріал / Піскунов В.Г., Володько О.В., Порхунов О.І., Цибульський В.М. Дата реєстрації 25.07.2013 р.

18. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 102367 Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Удосконалення методу розрахунку насипу дорожнього одягу на підходах до автодорожніх мостів» Цибульський В.М. Дата реєстрації 5.02.2021р.

19. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 102368 Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Розрахунок цементобетонного покриття армованого композитними матеріалами автодорожніх мостів» Цибульський В.М. Дата реєстрації 5.02.2021р.

20. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 102369 Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Лабораторний практикум з виконання експериментальних робіт з Опору матеріалів» Цибульський В.М. Дата реєстрації 5.02.2021р.

21. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 102370 Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Алгоритм розрахунку армованого цементобетонного дорожнього одягу на прогоновій будові моста у програмі Mathcad» Цибульський В.М. Дата реєстрації 5.02.2021р.

22. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 102371 Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Development of a method for calculating reinforced concrete structural elements of pavement bridges» Цибульський В.М. Дата реєстрації 5.02.2021р.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

23. Kharchenko A., Zaviysky O., Tsybulskyi V., Zavorotnyi S. Development of methods for parameters of long-term contracts optimization for operational road maintenance. *Technology Audit and Production Reserves*, Issue №2 (57), Part 1, 2021. Pp. 49–53. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.225532>

АНОТАЦІЯ

Цибульський В.М. Удосконалення методу розрахунку жорсткого дорожнього одягу мостів з композитною арматурою. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми». (192 – Будівництво та цивільна інженерія). – Національний транспортний університет, Київ, 2021.

У дисертаційній роботі виконано огляд досліджень причин руйнування залізобетонних конструктивних елементів мостів та основних підходів до вирішення виявлених проблем згідно з світовою практикою, якими є у першу чергу застосування композитних матеріалів (FRP-арматури) у якості підсилення конструкцій.

Виконане узагальнення досліджень основних підходів до вирішення проблем зносостійкості елементів, методів та моделей розрахунку конструкцій на міцність дозволило удосконалити метод розрахунку армобетонних конструктивних елементів дорожнього одягу мостів, який розроблений на підставі теорії згину шаруватих конструкцій з врахуванням поперечних нормальних напружень від обтиснення. У результаті досліджень варіаційним шляхом отримані рівняння рівноваги, граничні умови та загальну систему розв’язуючих рівнянь, які базуються на врахуванні впливу деформацій зсуву.

Розроблено модель та алгоритм застосування удосконаленого розрахунку цементобетонного дорожнього одягу армованого композитними матеріалами на основі шаруватих систем, що дозволяє на практиці визначити нормальні напруження в шарах дорожнього одягу та виконати перевірку міцності за еквівалентними напруженнями. За результатами розрахунків за удосконаленим методом отримано коефіцієнт співвідношення прогинів армобетонних конструктивних елементів за класичною теорією та уточненим методом, який становить 1,4 та підтверджує доцільність врахування деформацій зсуву при проектуванні плит прогонових будов мостів. Також було зроблено практичний висновок щодо доцільності армування верхнього шару дорожнього одягу з метою забезпечення його міцності та експлуатаційних характеристик.

Виконано порівняльний аналіз розрахунку компонентів напружено-деформованого стану плит за удосконаленим методом, експериментальними дослідженнями та у програмному комплексі ANSYS 14.0, що дозволило підтвердити адекватність розроблюваного методу.

З практичної точки зору доведено, що удосконалений метод дозволяє враховувати різні варіанти роботи дорожнього одягу, що дає можливість передбачити забезпечення міцності в період експлуатації конструкції.

Ключові слова: дорожній одяг, армобетонний конструктивний елемент, шарувата конструкція, композитна арматура, деформації зсуву, метод розрахунку дорожнього одягу

АННОТАЦИЯ

Цыбульский В.М. Усовершенствование метода расчета жёсткой дорожной одежды мостов с композитной арматурой. - Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.11 «Автомобильные дороги и аэродромы». (192 - Строительство и гражданская инженерия). - Национальный транспортный университет, Киев, 2021.

В диссертационной работе выполнен обзор исследований причин разрушения железобетонных конструктивных элементов мостов и основных подходов к решению выявленных проблем согласно мировой практике, каковы в первую очередь применение композитных материалов (FRP-арматуры) в качестве усиления конструкций.

Выполнено обобщение исследований основных подходов к решению проблем износостойкости элементов, методов и моделей расчета конструкций на прочность, что позволило усовершенствовать метод расчета армобетонных конструктивных элементов дорожной одежды мостов, который разработан на основании теории изгиба слоистых конструкций с учетом поперечных нормальных напряжений от обжатия. В результате исследований вариационным путем получены уравнения равновесия, граничные условия и общая система решающих уравнений, основанные на учете влияния деформаций сдвига.

Разработана модель и алгоритм применения усовершенствованного расчета цементобетонной дорожной одежды армированной композитными материалами на основе слоистых систем, позволяет на практике определить нормальные напряжения в слоях дорожной одежды и выполнить проверку прочности по эквивалентным напряжениям. По результатам расчетов за усовершенствованным методом получено коэффициент соотношения прогибов армобетонных конструктивных элементов с классической теорией и уточненным методом, составляет 1,4 и подтверждает целесообразность учета деформаций сдвига при проектировании плит пролетных строений мостов. Также был сделан практический вывод о целесообразности армирования верхнего слоя дорожной одежды с целью обеспечения его прочности и эксплуатационных характеристик.

Выполнен сравнительный анализ расчета компонентов напряженно-деформированного состояния плит с применением усовершенствованного метода, экспериментальных исследований и в программном комплексе ANSYS 14.0, что позволило подтвердить адекватность разрабатываемого метода.

С практической точки зрения доказано, что усовершенствованный метод позволяет учитывать различные варианты работы дорожной одежды, что дает возможность предусмотреть обеспечение прочности в период эксплуатации конструкции.

Ключевые слова: дорожная одежда, армобетонный конструктивный элемент, слоистая конструкция, композитная арматура, деформации сдвига, метод расчета дорожной одежды

ABSTRACT

Tsybulskiy V. Improvement of the calculation method of bridges rigid pavement with composite reinforcement. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation for candidate of technical sciences degree in specialty 05.22.11 «Highways and Airfields» (192 - Construction and Civil Engineering). – National Transport University, Kyiv, 2021.

The dissertation presents a solution to the topical issue of improving the reinforced concrete structural elements calculation method of bridges pavement to ensure strength.

A review of the failure causes studies of reinforced concrete structural bridge elements showed that the main reasons of these elements failure are steel reinforcement corrosion, loss of working volume, unsatisfactory condition of expansion joints on supports, low stability of concrete under bending loads. The main approaches to solving the identified problems according to world practice are the composite materials (FRP-reinforcement) use as a structure reinforcement, of which basalt is considered progressive.

The generalization of the basic approaches to the decision of wear resistance of elements problems, methods and models of designs calculation on durability has allowed to improve a reinforced concrete constructive road bridge pavement elements calculation method which is developed on the basis of the bending theory of layered designs. During the development of the improved method, the stress-strain state of the plate as a sufficiently thin shell of large curvature, which consists of isotropic layers with different physical and mechanical characteristics, was investigated. Kirchhoff's hypotheses were introduced and the expressions of transverse stresses were obtained, which made it possible to take into account the influence of shear deformations in the calculation method. As a result of the research, the equilibrium equation in the variational way, boundary conditions and the general system of solving equations were obtained. From the systems of differential equations the deflection function along the length of the beam expression for the case of sinusoidal load is obtained.

A model and algorithm for the improved calculation of cement-concrete pavement reinforced application with composite materials based on layered systems have been developed. The algorithm of the improved method application allows to practically determine normal stresses in layers of pavement and to carry out check of durability on equivalent stresses, applying criterion of Coulomb-More durability. According to the calculation results by the improved method, the deflection coefficient of reinforced concrete structural elements according to the classical theory and the refined method is obtained, which is 1.4 and confirms the feasibility of taking into account shear deformations in the girder slabs design. A practical conclusion was also made on the feasibility of reinforcing the top layer of pavement in order to ensure its strength and performance. The stresses that occur in FRP rods differ from 2.22 to 6.74 times compared to steel reinforcement, due to the characteristics of these materials.

The analysis of experimental researches of girder structures plates of the bridges reinforced by FRP-rods from concentrated loading by a wheel is carried out. A comparative analysis of the stress-strain state plate components calculation by the improved method, experimental studies and in the software package ANSYS 14.0, which allowed to confirm the adequacy of the developed method.

From a practical point of view, it is proved that the improved method allows to take into account different options for the operation of pavement, which makes it possible to provide strength during the operation of the structure.

Keywords: pavement, reinforced concrete structural element, layered structure, composite reinforcement, shear deformations, method of calculating pavement