

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

ДІАКОВСЬКА ТЕТЯНА ІГОРІВНА



УДК 625.84

**МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ ЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО
ОДЯГУ ІЗ БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЮ 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: доктор технічних наук, професор
Гамеляк Ігор Павлович,
Національний транспортний університет, м. Київ
завідувач кафедри аеропортів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Солодкий Сергій Йосифович
Національний університет «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України, м. Львів
завідувач кафедри автомобільних доріг та мостів;

кандидат технічних наук, доцент
Нагайчук Василь Михайлович
«ДерждорНДІ», м. Київ
головний науковий співробітник.

Захист відбудеться «26» лютого 2021 р. о 13:00 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. 209.

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

Автореферат розіслано «25» січня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Усиченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В мережі автомобільних доріг загального користування України цементобетонні дороги складають лише 1,4 % від загального кілометражу. Згідно з Програми розвитку цементобетонних доріг в Україні на 2021–2025 планується будівництво та реконструкція 2 900 км за 5 років, тобто втілення програми допоможе вийти на показник 3 %, а до 2040 року планується досягти такого ж показника, як і в Європі — 30 % доріг мають бути побудовані з цементобетону.

Нормативний строк експлуатації асфальтобетонних доріг складає $T_{\text{норм}} = 8\text{--}10$ років (табл. Е ДБН В.2.3–4, додаток Л – мінімально допустимий строк $T_{\text{мін}} = 3$ роки). Аналогічний показник для цементобетонної дороги складає $T_{\text{норм}} = 18\text{--}20$ років, цементобетонного покриття $T_{\text{мін}} = 8$ років, тобто більший у 2,7 рази.

Дослідження Українського інституту майбутнього демонструє економічні ефекти від будівництва бетонних доріг до 2030 року в Україні. У дослідженні йдеться, що при будівництві цементобетонних доріг економічний ефект на ВВП України становитиме від 8,5 млрд до 19,4 млрд дол., тоді як для асфальтобетонних — максимум 3,3 млрд. дол.

Але експлуатаційні показники бетонних та залізобетонних елементів постійно знижуються через підвищення агресивності навколишнього середовища, використання хімічних засобів для запобігання ожеледиці, збільшення навантаження та інтенсивності руху транспортних засобів, перепадів температури, циклів замерзання і танення води тощо.

Армування жорсткого дорожнього одягу базальтопластиковою арматурою (БПА) додатково підвищує термін експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження дисертаційної роботи виконувалися в рамках науково – дослідної роботи "Провести дослідження та розробити методику розрахунку бетонних конструкцій мостів, армованих базальтопластиковою арматурою, на витривалість" (номер державної реєстрації 0115U001655). Автором було розроблено алгоритми розрахунків конструкцій із БПА на міцність, тріщиностійкість та витривалість, розроблено методику та програму випробувань. Було взято участь у виготовленні зразків. Проведено експериментально – теоретичні дослідження роботи бетонних перерізів, армованих БПА, під впливом динамічного навантаження та розроблено М 42.1–37641918–759:2017 «Методика розрахунку бетонних конструкцій мостів, армованих базальтопластиковою арматурою, на витривалість», Чинний від 10.10.2017.

В роботі «Провести дослідження та розробити методичні рекомендації щодо забезпечення надійності конструкцій жорстких дорожніх одягів автомобільних доріг при використанні високоміцного цементобетону» (п. пл. 52) (номер державної реєстрації 0116U007515) автором виконано алгоритм розрахунку надійності жорсткого дорожнього одягу. У результаті було впроваджено МР В.2.7–37641918–885:2017 «Методичні рекомендації щодо забезпечення надійності конструкцій жорсткого дорожнього одягу при використанні високоміцного цементобетону».

В роботі «Провести дослідження та розробити методику розрахунку надійності жорсткого дорожнього одягу, армованого неметалевою композитною арматурою» (п. пл. 98) (номер державної реєстрації 0118U000724) здійснено: аналіз результатів

випробувань, розрахунок перерізів дорожніх цементобетонних плит, армованих неметалевою композитною арматурою на витривалість, розрахунок плит проїзної частини мостів, армованих стержнями неметалевої композитної арматури, на витривалість, розробку загальних положень розрахунку конструкцій плит транспортних споруд, армованих неметалевою композитною арматурою на витривалість, розрахунок плит на витривалість,

Мета роботи та задачі дослідження. Метою роботи є розробка методів розрахунку надійності жорсткого дорожнього одягу, армованого базальтопластиковою арматурою, за критеріями витривалості та тріщиностійкості, що ґрунтуються на теоретичних дослідженнях, крупномасштабних лабораторних і польових дослідженнях витривалості арматури та конструкцій в цілому.

Для виконання поставленої мети здобувачем вирішувались такі задачі:

- виконати аналіз, систематизувати математичні моделі оцінки витривалості елементів, армованих БПА, що працюють під дією багаторазово повторюваних циклічних навантажень;
- розробити теоретичні моделі розрахунку надійності жорсткого дорожнього одягу із БПА за критеріями тріщиностійкості та витривалості;
- узагальнити результати випробувань БПА та провести експериментальні дослідження з витривалості бетонних елементів, армованих БПА;
- здійснити аналіз впливу факторів на надійність жорсткого дорожнього одягу за критеріями тріщиностійкості та витривалості. Провести уточнення перехідних коефіцієнтів в залежності від зони завантаження плити дорожнього одягу;
- розробити інженерну методику та алгоритм оцінки надійності жорсткого дорожнього одягу (ЖДО) за критеріями тріщиностійкості та витривалості.

Методи дослідження. Класична теорія надійності на етапі проектування, теорія втоми будівельних матеріалів, теорія ймовірностей та математичної статистики, теорія споруд, класичні методи числового моделювання та сучасних інформаційних технологій.

Наукова новизна отриманих результатів:

Отримані результати є однією з перших спроб розробки теоретичної і методичної бази розрахунку плитних конструкцій, армованих БПА, в дорожньому будівництві:

- вперше отримано математичну модель визначення втомної міцності неметалевої стержневої арматури;
- вперше розроблено модель розрахунку надійності ЖДО з БПА за критеріями тріщиностійкості та витривалості;
- вперше виконано експериментальні дослідження з витривалості базальтобетонних елементів, отримані нові наукові дані з розвитку втомних явищ в елементах, армованих БПА, що згинаються;
- отримано коефіцієнти перерахунку пружного прогину, згинального моменту (напруження розтягу при згині) при навантаженні армованої та неармованої плити в центрі, на краю та на куті дослідної ділянки та розрахунку методом скінченних елементів.
- дістала подальший розвиток статистична база розрахунку бетонних елементів, армованих БПА, за методом граничних станів.

Практичне значення результатів роботи полягає у розробленні інженерної методики та алгоритму оцінки надійності жорсткого дорожнього одягу за критеріями тріщиностійкості та витривалості.

Розроблені та впроваджені на галузевому рівні в організаціях, які входять у сферу управління Державного агентства автомобільних доріг України (УКРАВТОДОР) наступні документи:

- М 42.1–37641918–759:2017 «Методика розрахунку бетонних конструкцій мостів, армованих базальтопластиковою арматурою, на витривалість»;

- МР В.2.7–37641918–885:2017 «Методичні рекомендації щодо забезпечення надійності конструкцій жорсткого дорожнього одягу при використанні високоміцного цементобетону»;

- М 42.1–37641918–777:2019 «Методика розрахунку надійності жорсткого дорожнього одягу, армованого неметалевою композитною арматурою»;

Побудовано експериментальну ділянку цементобетонної дороги, повністю армованої сітками БПА і проведено ряд експериментальних досліджень цієї ділянки.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, які виносяться на захист, отримано автором самостійно. У спільних публікаціях [2, 9, 10, 11, 17] здобувачем запропоновано статистичний аналіз результатів лабораторних випробувань неметалевої композитної арматури, надано алгоритм розрахунку втомної міцності неметалевої композитної арматури, надано математичну модель втомної міцності неметалевої композитної арматури, виділено дві зони роботи БПА при малоцикловій втомі, отримані параметри закону втоми у вигляді степеневі залежності для БПА в області мало– та багато циклової втоми.

В спільній публікації [3] автором виготовлені дослідні зразки та розроблена методика випробувань, яка дозволяє значно скоротити довготривалі у часі випробування на витривалість, а також скоротити фінансові витрати на дослідження надійності мостових елементів мостів та автомобільних доріг.

В спільних публікаціях [4, 11, 13] автором проведено ряд експериментальних випробувань бетонних зразків, армованих стержнями БПА, та наведено результати цих випробувань.

В спільній публікації [5] автором проведено оцінювання неоднорідності властивостей органічних в'язучих матеріалів шарів дорожнього одягу.

Апробація результатів дисертації. Результати експериментально–теоретичних досліджень доповідалися на: III міжнародній науково–технічній інтернет–конференції «Будівництво, реконструкція, і відновлення споруд міського господарства» (Харків, 2012 р.); Міжнародній науково–практичній конференції «Покращення конструктивних, технологічних та експлуатаційних показників автомобільних доріг і штучних споруд на них в дослідженнях студентів і молодих науковців» (ХНАДУ, 2014), Всеукраїнській інтернет – конференції молодих учених і студентів «Композиційні будівельні матеріали і вироби – шляхи підвищення надійності, довговічності, корозієстійкості» (Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, 2017), щорічних наукових конференціях професорсько–викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету (м. Київ, 2012–2019).

Публікації. По темі дисертаційної роботи опубліковано 18 наукових праць, з них 1 стаття у іноземному виданні, що включене до наукометричної бази SCOPUS, 4 статті у фахових науково–технічних виданнях. Автором отримано 2 патенти на корисну модель і 2 авторських свідоцтва.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 120 найменувань та восьми додатків. Робота викладена на 240 сторінках, в тому числі містить 160 сторінок основного тексту, 45 таблиць, 45 ілюстрацій, 20 сторінок списку використаних джерел та 80 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У Вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, наведено відомості про зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет досліджень та перелічено використовувані методи. Визначено наукову новизну роботи, практичне значення одержаних результатів, подано відомості про впровадження результатів роботи. зазначений особистий внесок здобувача, наведено інформацію про апробацію результатів роботи, публікації за темою дисертаційного дослідження, описано структуру та обсяг роботи.

У першому розділі наводиться аналіз проблеми застосування базальтопластикової арматури, а також огляд досліджень армованих бетонних елементів, що згинаються, при дії багаторазово повторюваного навантаження.

Наведено фізико–механічні характеристики такого типу арматури українського виробництва. За результатами вивчення праць Бабяка І.П., Клімова Ю.А., Солдатченка А.С., Васильчишиної С.А., Орешкина Д. О., Мяснікова А.А., Асланова М.С., Жавріда С.С., Зимина Д.Е., Михайлова К.В., Розеналь Н.К., Кустікової Ю.О., Васильчишиної С.А., Вергуна І.А., Ковалю П.М., Колесніка О.П., Костіва Р.Б., Кузеванова Д.В., Мацьопи І.Р., Муріна, А.Я., Молькова Ю.В., *Charles E. Bakis, Edoardo Cosenza, Francesca Ceroni, Maurizio Guadagnini*, зроблені висновки про перспективність застосування БПА. Виконано аналітичне порівняння фізичних властивостей БПА із традиційною арматурою, встановлено основні відмінності у характері роботи перерізів при розрахунках за нормативними документами різних країн.

Дослідженнями надійності конструкцій дорожнього одягу в загальному та армованих бетонних елементів, що згинаються зокрема, при нестационарних режимах повторюваного навантаження займалися такі вчені Нагайчук В.М., Алтухов В.Д., Батракова А.Г., Оксень Є.І., Белобров І.К., Бокарев С.А., Волков Ю.С., Грушко І.М., Дмитрієв М.М., Ефимов С.В., Ісмаїлова Н.П., Карапухин Н. С., Кваша В.Г., Кириллов А.П., Критов В.А., Кушнарьова Г.О., Лантух–Лященко А.І., Мельник І.В., Мозговий В.В., Павлюк Д.О., Піскунов В.Г., Пічугін С.Ф., Радовський Б.С., Савенко В.Я., Самбор Ю.В., Скатинський В.І., Трусковський М.П., *Alexander M., Beushausen H., Evangelista L., J.de Brito, Sarja A., Vesikari E., Wang B.* та ін.

Вчені та дослідники, що займалися вивченням можливості практичного застосування неметалевої композитної арматури в елементах, які зазнають циклічних

навантажень: Солодкий С.Й., Вергун І.А., Гамеляк І.П., Гвоздюк М.М., Гримак О.Я., Іваницький Я.Л., Квашневський Ю.І., Коваль М.П., Бабяк І.П., Колеснік О.П., Костів Р.Б., Кузеванов Д.В., Лучко Й.Й., Мурин, А.Я., та ін.

Завдяки тому, що стержні БПА неможливо спровокувати на процес деградації внаслідок впливу хімічних сполук, її використання у сучасній дорожній галузі може частково вирішити проблему експлуатаційної надійності бетонних елементів, що підвищить надійність та довговічність жорстких дорожніх одягів. Але зважаючи на те, що робота конструкцій із такою арматурою під дією циклічних багаторазово повторюваних навантажень маловивчена, для її застосування необхідне проведення теоретичних та експериментальних досліджень в цьому напрямку.

Другий розділ присвячено розробці теоретичних моделей оцінювання надійності жорсткого дорожнього одягу за двома критеріями: тріщиностійкість та витривалість.

Базуючись на основних положеннях класичної теорії надійності на етапі проектування та виходячи з конкретного типу конструкцій і умов їх навантаження, випадкові процеси несучої здатності та навантаження представляються у виді системи випадкових величин. Тоді надійність H (ймовірність безвідмовної роботи P виконання умов роботоzдатності Z_i) конструкції дорожнього одягу має один із видів:

$$H = P\{Z_i = R_i(x_1) > Q_i(x_2)\} \quad (1a)$$

або

$$\begin{aligned} H &= P\{Z_i = R_i(x_1) - Q_i(x_2) > 0\}, i = 1, k_\phi \\ H &= P\{Z_i = R_i(x_1)/Q_i(x_2) > 1\}, i = 1, k_\phi \end{aligned} \quad (1б)$$

де $R_i(x_1)$, $Q_i(x_2)$ – функції несної здатності й навантаження від векторів початкових факторів x_1 та x_2 ; k_ϕ – кількість функцій роботоzдатності або критеріїв граничного стану.

В роботі розраховано відповідні похідні та представлено алгоритм розрахунку надійності жорсткого дорожнього одягу за критеріями тріщиностійкості та витривалості.

Надійність за критерієм тріщиностійкості представлена через класичну модель різниці опору та навантаження:

$$H_e = 0,5 + \varphi(\beta_{cr}), \quad (2)$$

в якій враховано нормовану функцію Лапласа,

$$\varphi(\beta_{cr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{\beta_{cr}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx, \quad (3)$$

а характеристика надійності (безпеки) має вигляд:

$$\beta_{cr} = \frac{\Delta_{cr} - a_{cr}}{\sqrt{S_{\Delta_{cr}}^2 + S_{a_{cr}}^2}} \text{ або } \beta_{cr} = \frac{K_{cr} - 1}{\sqrt{V_{a_{доп}}^2 \cdot K_{cr}^2 + V_{a_{cr}}^2}}, \quad (4)$$

де $K_{cr} = \Delta_{cr} / a_{cr}$ – коефіцієнт запасу за тріщиностійкістю; $V_{a, \text{доп}}$ – коефіцієнт варіації допустимого розкриття тріщини (приймається за даними узагальнення натурних випробувань, в середньому $V_{a, \text{доп}} = 0,15$); $S_{a, \text{доп}} = \Delta_{cr} \cdot V_{a, \text{доп}}$ – середньоквадратичне відхилення допустимого розкриття тріщин; $V_{a, cr}$ – коефіцієнт варіації ширини розкриття тріщин; $S_{a, cr} = a_{cr} \cdot V_{a, cr}$ – середньоквадратичне відхилення ширини розкриття тріщин.

Для забезпечення тріщиностійкості плити (згідно із п. 5.2.4 ДСТУ–Н Б В. 2. 6–185) необхідно, щоби максимальна ширина розкриття тріщин a_{cr} не перевищувала гранично допустиму ширину Δ_{cr} тобто умова тріщиностійкості $a_{cr} < \Delta_{cr} = 0,08$ см, або:

$$a_{cr} = \left[\frac{M_n \varepsilon}{\left(n \frac{\pi d^2}{4} \right) \left(h - a_b - \frac{d}{2} \right) - 0,5 \left(\frac{R_f \left(n \frac{\pi d^2}{4} \right)}{R_b b} \right) \sigma_{bfr}} \right] \times \left[1,5 \sqrt{\frac{b(a_b + \frac{d}{2} + 6d)}{\beta \pi d}} \right] < \Delta_{cr}, \quad (5)$$

де M_n – найбільший нормативний згинальний момент в перерізі для розрахунків за II групою граничних станів, Н·м; ε – гранична деформація бетону на стиск; n – кількість стержнів однакового діаметру у перерізі; d – діаметр стержня, см; h – повна висота перерізу, см; a_b – товщина захисного шару арматури, см; R_f – нормативна міцність арматури на розтяг МПа; R_b – нормативна міцність бетону на стиск МПа; b – ширина розрахункового перерізу, см; σ_{bfr} – напруження в розтягнутій арматурі; $\beta_{зч}$ – коефіцієнт зчеплення арматури з бетоном.

Для визначення коефіцієнта варіації для критерію граничного стану за тріщиностійкістю використовується залежність:

$$C_{a, cr} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial a_{cr}}{\partial \Phi_i} \right)^2 \left(\frac{\bar{\Phi}_i}{\bar{a}_{cr}} \right)^2 C_{\Phi_i}^2 \right]}, \quad (6)$$

де n – кількість параметрів, які впливають на розрахунок для даного критерію граничного стану; Φ_i та $\bar{\Phi}_i$ – параметр розрахунку та його середнє значення; C_{Φ_i} – коефіцієнт варіації параметру.

Граничний стан за витривалістю (втомною) для плити дорожнього одягу настає від багаторазової дії рухомого навантаження внаслідок втомного руйнування арматури або бетону. При цьому допускається виникнення нормальних тріщин в розтягнутій зоні, ширина яких не перевищує гранично допустимих. Розрахунок на витривалість елементів із БПА виконується за формулами опору матеріалів без врахування роботи бетону розтягнутої зони. Режимом роботи при цьому вважається згин в одній з головних площин.

Надійність за критерієм витривалості представлена як:

$$\beta_{dam.} = \frac{M_{dam.dyn} - M_{dam.theor}}{\sqrt{S_{dam.theor}^2 + S_{dam.dyn}^2}},$$

або

$$\beta_{dam.} = \frac{K_{мц} - 1}{\sqrt{V_{dam.theor}^2 \cdot K_{мц} + V_{dam.dyn}^2}},$$
(7)

де $K_{мц} = M_{dam.dyn}/M_{dam.theor}$ – коефіцієнт запасу та коефіцієнти варіації параметрів; $M_{dam.dyn}$ – момент руйнування, отриманий експериментально після впливу багаторазово повторюваного циклічного навантаження, кНм; $M_{dam.theor}$ – теоретично очікуваний момент руйнування зразка Нм; $S_{dam.theor}$ – середньоквадратичне теоретичного значення моменту руйнування внаслідок багаторазово повторюваного циклічного навантаження; $S_{dam.dyn}$ – середньоквадратичне практично отриманого значення моменту руйнування внаслідок багаторазово повторюваного циклічного навантаження; $V_{dam.theor}$ – коефіцієнт варіації теоретично очікуваного моменту руйнування внаслідок впливу циклічного багаторазово повторюваного навантаження; $V_{dam.dyn}$ – коефіцієнт варіації практично отриманого моменту руйнування внаслідок впливу багаторазово повторюваного циклічного навантаження.

Для визначення коефіцієнта варіації для критерію граничного стану за витривалістю використовується залежність:

$$C_{dyn} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial \sigma_{dyn.theor}}{\partial \Phi_i} \right)^2 \left(\frac{\overline{\Phi_i}}{\overline{\sigma_{dyn.theor}}} \right)^2 C_{\Phi_i}^2 \right]},$$
(8)

де n – кількість параметрів, які впливають на розрахунок для даного критерію граничного стану; Φ_i та $\overline{\Phi_i}$ – параметр розрахунку та його середнє значення; C_{Φ_i} – коефіцієнт варіації параметру; $\sigma_{dyn.theor}$ – теоретично очікуване напруження, яке визначається через $M_{dam.dyn}$ що вираховується за алгоритмом, наведеним нижче.

Перевірка бетону плити на витривалість:

$$\frac{M_{max}}{I'_{red}} \cdot x_1 \leq m_{b1} \cdot R_b,$$
(9)

де M_{max} – максимальний момент розтягу в перерізі, Нм; I'_{red} – момент інерції приведенного перерізу, м⁴; x_1 – товщина стиснутої зони бетону, м; m_{b1} – коефіцієнт асиметрії циклу напружень у бетоні; R_b – розрахунковий опір бетону на стиск, Па.

Перевірка стержнів БПА у прямокутному перерізі на витривалість:

$$n' \frac{M_{max}}{I'_{red}} \cdot (x_1 \cdot a_u) \leq R_{fa} \cdot \gamma'_\mu,$$
(10)

де n' – коефіцієнт, при якому враховується віброповзучість бетону; a_u – відстань від зовнішньої розтягнутої грані перерізу до осі найближчого ряду арматури, м.

Розрахунковий опір БПА на витривалість R_{fa} [2], Па:

$$R_{fa} = \sum (71,9n_d d_f^2 - 136,4n_d d_f + 486,6) + (-4,8n_d d_f^2 + 24,3n_d d_f + 79,5) \ln(N). \quad (11)$$

де n_d – кількість стержнів однакового діаметру в перерізі; d_f – величина діаметру в перерізі, мм.

Коефіцієнт γ_μ , що враховує відношення коефіцієнту армування перерізу із БПА до його корисної площі, який залежить від коефіцієнту армування, пропонується: $\gamma'_\mu = 0,8$ – для випадків $\mu_f < \mu_{fb}$ або $\gamma'_\mu = 0,4$ – для випадків $\mu_f > \mu_{fb}$.

Коефіцієнт корисної площі базальтобетонного перерізу приймається:

$$\mu_{fb} = \frac{0,81 \cdot (R_b + 8) \cdot \varepsilon_{cu}}{f_{fk} \cdot \left(\frac{f_{fk}}{E_{fk}} + \varepsilon_{cu} \right)}, \quad (12)$$

де ε_{cu} – значення відносних граничних деформацій стиску бетону; f_{fk} – характеристичне значення міцності неметалевої композитної арматури на розтяг, МПа; E_f – характеристичне значення модуля пружності неметалевої композитної арматури, МПа.

Коефіцієнт армування базальтобетонного перерізу вираховується за формулою:

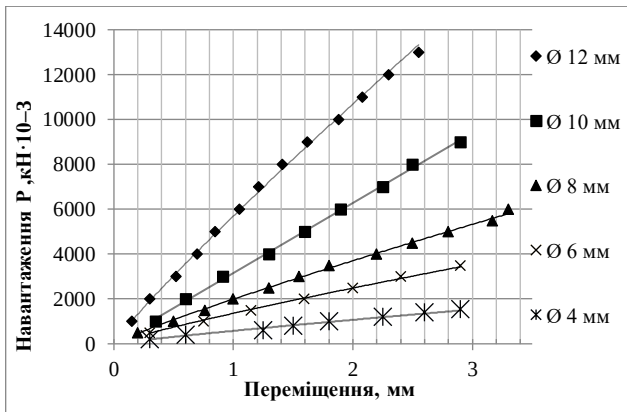
$$\mu_f = \frac{A_f}{A_b}, \quad (13)$$

де A_f – площа стержнів БПА в перерізі елемента; A_b – загальна площа перерізу елемента із БПА.

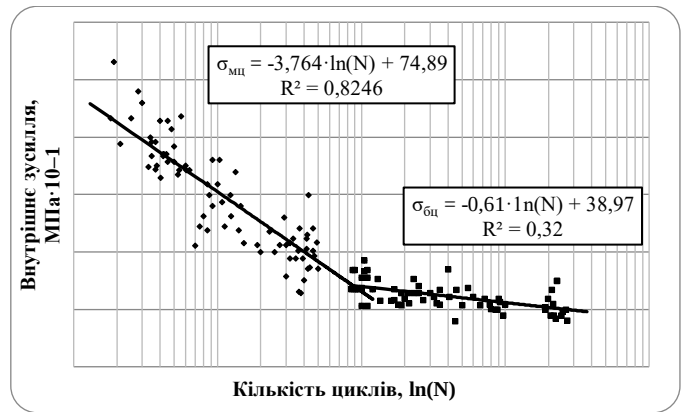
Аналогічно переріз перевіряється на дію мінімальних згинальних моментів та напружень.

У третьому розділі методику, проведення та результати теоретичних, лабораторних та польових експериментальних досліджень за критеріями тріщиностійкості та надійності ЖДО із БПА.

За результатами випробувань стержнів БПА по визначенню міцності за статичного розтягу та по визначенню втомної міцності БПА за циклічного розтягу, що були проведені у Фізико–механічному інституті ім. Г.В. Карпенка у м. Львові у 2014 році, встановлено залежність зміни фізико–механічних характеристик стержнів БПА від дії статичного розтягу (рис. 1а) та від дії циклічного багаторазово повторюваного навантаження (випробування на втому). При обробці випробувань стержнів БПА на втому, було виявлено 2 умовні режими роботи стержнів: мало– та багатоциклова втома (рис. 1б).



а



б

Рисунок 1 – Аналіз результатів випробувань стержнів БПА: а – графік навантаження–переміщення зразків при випробуванні БПА на статичний розтяг; б – діаграма Веллера для малоцикливої та багатоцикливої витривалості БПА

Виявлення цієї закономірності дозволили розробити алгоритм розрахунку стержнів БПА на втому [3].

Для випробувань елементів, армованих БПА, що згинаються, на втому, було складено методику випробувань бетонних елементів, армованих одиничним стержнем БПА різного діаметру, програму таких випробувань, що включала виготовлення зразків балок розміром $2,1 \times 0,2 \times 0,1$ м, у кількості відповідній до програми, та проведення випробувань в у лабораторії кафедри будівельних конструкцій Інституту будівництва та інженерії довкілля Національного університету "Львівська Політехніка". Встановлено, що БПА ефективно працює з складі перерізу, виконаного з монолітного бетону. Жоден зразок не був зруйнований внаслідок втоми, навіть найперший, який зазнав $6,5 \cdot 10^6$ циклів при найменшому коефіцієнті армування ($0,625 \cdot 10^{-3}$); при цьому аналогічний зразок з цієї ж серії витримав найвищий рівень навантаження протягом всіх $2 \cdot 10^6$ циклів без утворення тріщин. Всі зразки доводилися до повного руйнування статичним методом після проходження $2 \cdot 10^6$ циклів навантаження–розвантаження для перевірки залишкової міцності. Конструкції із БПА володіють значною живучістю, не обвалюються під час 88% від навантаження тріщиноутворення рівнів при динамічному режимі роботи (рис. 2). БПА має високий коефіцієнт зчеплення з бетоном, що доведено нульовим показником переміщення обох кінців стержня БПА. Характер НДС базальтобетонних конструкцій прямо залежить від коефіцієнту армування перерізу БПА: чим цей коефіцієнт більший по відношенню до корисної площі армування, тим більшими будуть значення ширини розкриття тріщин та зусиль в перерізі в момент утворення тріщини. Навантаження тріщиноутворення в елементах з різним коефіцієнтом армування не залежить від цього коефіцієнту, і це значення для зразків різних серій близьке.



а



б

Рисунок 2 – Зразок, армований стержнем БПА 12 мм:

а – після проходження $2 \cdot 10^6$ циклів навантаження; б – руйнуюча тріщина

Випробування включали в себе контроль якості виготовленого цементобетону.

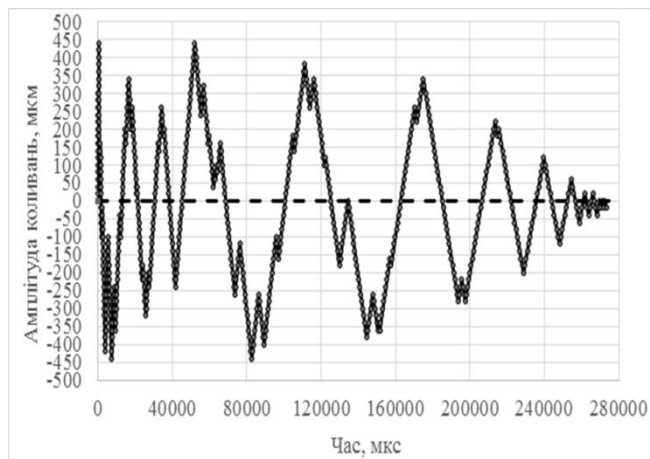
За результатами випробувань виявлено, що елементи БПА, які працюють на втому, мають 5 умовних етапів життєвого циклу (рис. 3).

	Пружна робота (без тріщиноутворення)	Утворення нормальних тріщин	Утворення похилих тріщин	Розрив арматури	Руйнування стиснутого бетону
I Б, Ø 4		Руйнування 13,9 кН			
II Б, Ø 6		Руйнування 15,3 кН			
III Б, Ø 8				Руйнування 21,9 кН	
IV Б, Ø 10					Руйнування 26,9 кН
V Б, Ø 12					Руйнування 28,4 кН

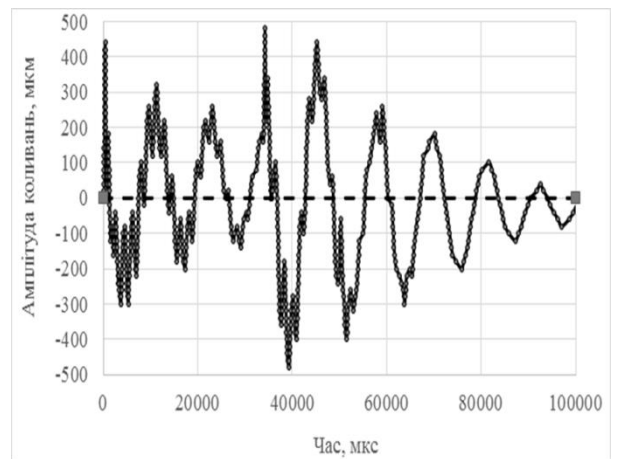
Рисунок 3 – Етапи життєвого циклу зразків

Метою польових досліджень було визначення жорсткості (модуля пружності) та затухання коливань на поверхні цементобетонних плит, армованих металевою та БПА, при дії ударного навантаження (рис. 4). Для виявлення прихованих дефектів використано теплововізійний метод досліджень.

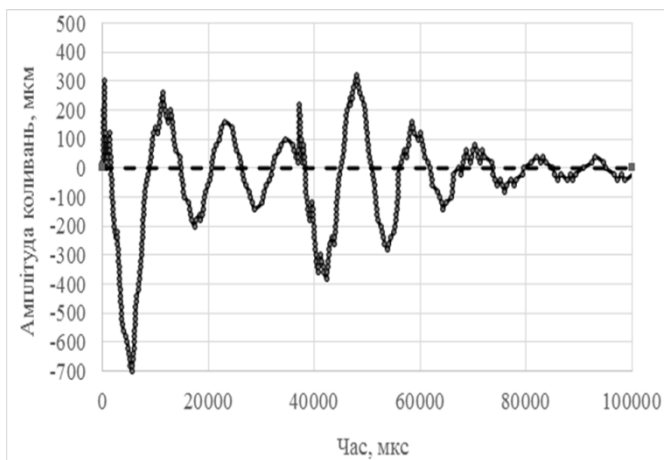
За результатами досліджень рекомендується розрахункові значення згинаючих моментів m_d , кН·м/м, домножувати на одиницю ширини перерізу одношарових жорстких покриттів всіх типів на k — перехідний коефіцієнт від згинаючого моменту при центральному завантаженні до моменту при крайовому завантаженні плити (таблиця 1).



а



б



в

Рисунок 4 – Результати обробки даних коливань на поверхні плити, армованої БПА: а – по центру плити; б – на куті плити; в – на краю плити

Таблиця 1 – Перехідний коефіцієнт від згинального моменту при центральному завантаженні до моменту при крайовому завантаженні

Згідно методу дослідження	Перехідний коефіцієнт від згинального моменту (напружень) при центральному завантаженні до моменту при крайовому завантаженні
ПК ЛПА	1,49
Експеримент	1,32
ГБН В.2.3–37641918–557:2016	1,50
СНиП 2.05.08–85. Аеродроми	1,50

Також було встановлено міцність бетону на експериментальних ділянках за результатами випробувань склерометром. Статистичний аналіз даних дозволив отримати практично близький до нормального закон розподілу міцності цементобетону.

У четвертому розділі викладено аналіз зміни напружено–деформованого стану конструкції ЖДО в залежності від товщини цементобетонного покриття, армованого та неармованого БПА. Розрахунки проводилися в програмних комплексах ЛПА та CREDO Radon.

В ПК CREDO Radon змодельовано конструкцію ЖДО товщиною 0,26 м без армування. Було розраховано 5 альтернативних конструкцій товщиною 0,24; 0,22; 0,20; 0,18; 0,16 м та у відповідності до класичної теорії надійності (1–3) обчислено

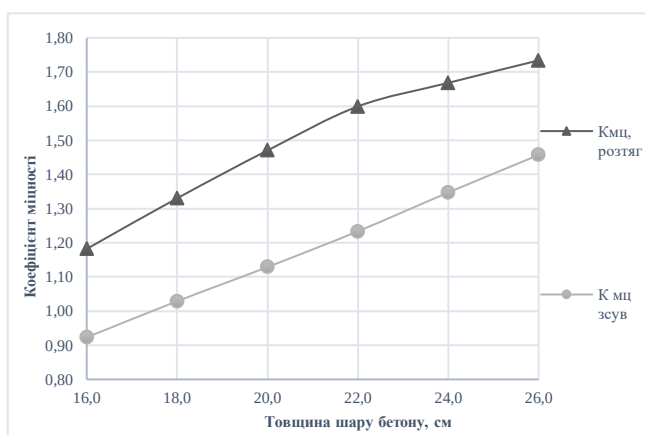
коефіцієнти надійності K_n та індекси надійності β за критеріями міцності на розтяг при згині та критерії зсуву (табл. 2).

Побудовано графічні залежності коефіцієнтів запасу міцності від товщини бетону ЖДО (рис. 5а), а також залежність індексів надійності β від товщини бетону (рис. 5б).

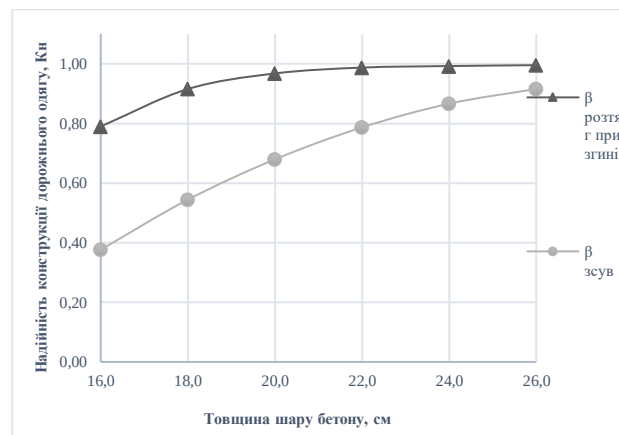
При зменшенні товщини плити критерій зсуву стає визначальним. Тому при проектуванні необхідно підбирати належну товщину основи, або використовувати матеріали із більшим модулем пружності. Також, при наявності зернистих матеріалів в ґрунті основи доцільно армувати ці шари геосинтетичними матеріалами, які збільшують модулі пружності армованих матеріалів в 1,3–1,8 рази (ГБН В.2.3 – 37641978–544:2014 «Застосування геосинтетичних матеріалів у дорожніх конструкціях. Основні вимоги»). У окремих випадках необхідно передбачати роботи із заміни ґрунту, осушення, влаштування дренажу для пониження ґрунтових вод тощо.

Таблиця 2 – Результати розрахунків надійності конструкцій жорсткого дорожнього одягу в ПК *CREDO* за критеріями розтягу при згині та зсуві

Товщина цементобетонного покриття, м	Індекс надійності за критерієм розтягу при згині в монолітних шарах, $\beta_{\text{розтяг}}$	Надійність конструкції дорожнього одягу за розтягом при згині, $K_{n\text{згин}}$	Індекс надійності за критерієм зсуву, $\beta_{\text{зсув}}$	Надійність конструкції дорожнього одягу за зсувом, $K_{n\text{зсув}}$
0,26	2,59	0,995	1,375	0,915
0,24	2,42	0,992	1,108	0,866
0,22	2,23	0,987	0,795	0,787
0,20	1,85	0,967	0,466	0,679
0,18	1,37	0,915	0,111	0,544
0,16	0,81	0,790	-0,315	0,376



а



б

Рисунок 5 – Залежності показників надійності від товщини бетону ЖДО:

а – товщина шару бетону – коефіцієнти міцності;

б – товщина шару бетону – коефіцієнт надійності конструкції

Аналіз розрахунків аналогічного дорожнього одягу у ПК «Ліра», з армуванням БПА представлено в табл. 3, де наведено аналіз зміни напружено–деформованого стану конструкції ЖДО при різних проектних рішеннях.

Таблиця 3 – Результати підбору товщини конструкції жорсткого дорожнього одягу

h	A_f	A_s	Напруження		Надійність, K_n
			без армування	з армуванням	без армування
26	1,30	1,30	2,28	3,82	0,995
24	1,20	1,34	2,60	4,34	0,992
22	1,10	1,44	3,29	4,99	0,987
20	1,10	1,56	3,50	5,83	0,967
18	1,21	1,70	4,17	6,89	0,915
16	1,33	2,52	5,03	8,27	0,789

Прим.: h – товщина цементобетонного покриття в конструкції ЖДО, см; A_f – необхідна площа БПА, см²/1м; A_s – необхідна площа арматури А400С, см²/1м;
Коефіцієнт надійності K_n представлено як значення за критерієм розтягу при згині, і складає 0,99 для всіх випадків конструкції із армуванням.

Виконано розрахунок напружено – деформованого стану ЖДО при дії навантаження по центру плити, на краю та на куті. Приклад результатів розрахунку представлені на рис. 6.



Рисунок 6 – Результати розрахунку напружено – деформованого стану ЖДО в ПК «Ліра»: *a* – по центру плити; *б* – на краю плити; *в* – на куті плити

Графічна інтерпретація зв'язку площі необхідного армування металевою арматурою А400С та БПА в залежності від товщини цементобетонного покриття ЖДО (рис. 7).

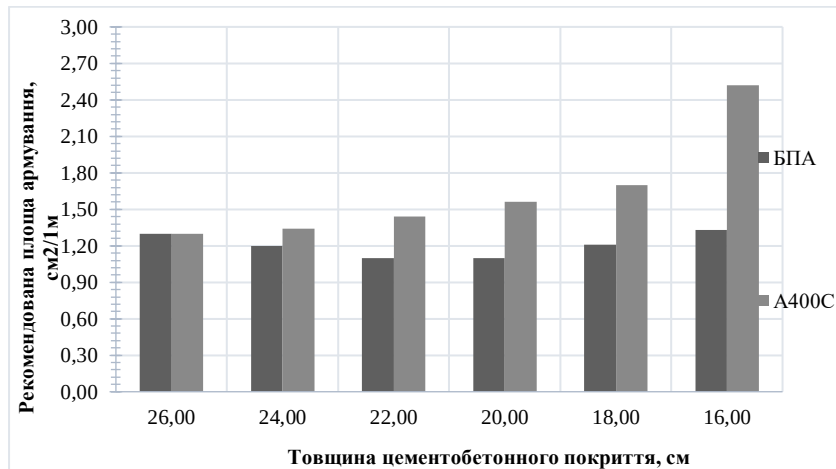
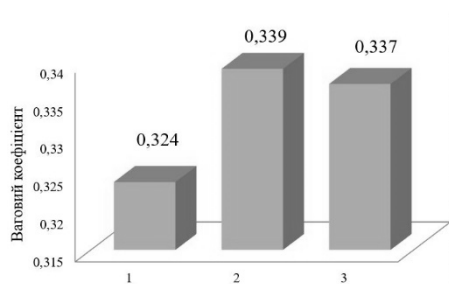


Рисунок 7 – Розрахункова площа необхідного армування металевою арматурою А400С та БПА в залежності від товщини цементобетонного покриття

Доведено, що армування цементобетонного покриття підвищує надійність ЖДО, а армування стержнями БПА дозволяє зменшити площу робочої арматури та підвищити термін експлуатації таких конструкцій і, як наслідок, забезпечення збільшення міжремонтних термінів, що, безумовно, підвищує експлуатаційну надійність конструкцій ЖДО із БПА.

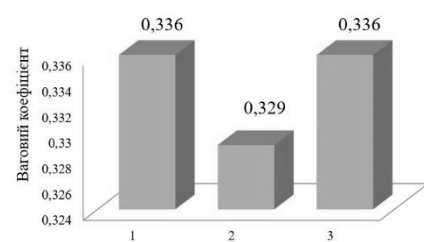
В розділі 5 представлено проведення техніко–економічного порівняння варіантів армування методом аналізу ієрархій.

Виконано техніко–економічне порівняння варіантів трьох типів конструкцій ЖДО, які різняться за типом армування: армована металевою арматурою класу А400С; дорожня плита, армована БПА; дорожня плита, армована БПА, конструктивні рішення якої змінені з огляду на високу хімічну стійкість БПА (рис. 8).



а

- 1 – із А400С; 2 – із БПА із верхнім захисним шаром 5 см;
3 – із БПА із верхнім захисним шаром 2см



б

- 1 – балка, армована К-7; 2 – балка, армована А400 С; 3 – балка, армована БПА

Рисунок 8 – Результати техніко–економічного порівняння дорожніх споруд із різними типами армування: *а* – конструкції цементобетонного покриття ЖДО; *б* – прогонові будови мостів

До аналізу приймаються такі критерії: площа робочої арматури A_s та A_f ; критерій експлуатаційної надійності P ; ширина розкриття тріщин a_{cr} ; напруження в

арматурі, які виникають при дії циклічних багаторазово повторюваних навантажень σ ; вартість арматури; спостережуваний критерій – хімічна стійкість арматури, що дозволяє збільшити міжремонтний період. Результати розрахунків для ЖДО представлені на рис. 8а, для прогонової будови мосту представлені на рис. 8б.

Порівняння вагових критеріїв різних конструкцій вказує, що застосування БПА при армуванні ЖДО є актуальним питанням, оскільки техніко–економічні показники варіантів плити із БПА вищі, за показник ЖДО з металевою арматурою.

Всі три варіанти армування мають близькі значення компонентів вектору пріоритетів. Можна припустити, що основою для цього є однакові вихідні дані. Найвищу техніко – економічну оцінку має плита, армована БПА із захисним верхнім шаром у 5 см. Їй надавалась перевага з точки зору експлуатаційної надійності, але математично перевагу має плита зі зменшеним захисним шаром до 2 см. Основою такого конструктивного рішення послугувала висока хімічна стійкість БПА.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової задачі, що полягає в розробці ефективних методів розрахунку жорстких дорожніх одягів із базальтопластиковою арматурою.

1. Виконано аналіз та систематизовано математичні моделі оцінки витривалості елементів, армованих БПА, що працюють під дією багаторазово повторюваних циклічних навантажень.

2. При розробці теоретичних моделей розрахунку надійності ЖДО із БПА встановлено, що основний підбір параметрів конструкції залежить від розрахунків за *I* та *II* групами граничних станів. У розрізі даної роботи – втрати міцності внаслідок втоми, тобто критерій витривалості, *I* група граничних станів. Такий критерій було обрано за аналогією до розрахунку плит проїзної частини мостів, адже на сьогоднішній день витривалість в ЖДО, армованих неметалевою арматурою, не враховується. Це не дозволяє виконувати порівняння варіантів при проектуванні дорожніх одягів. До *II* групи граничних станів належать розрахунки за критерієм тріщиностійкості. Встановлено, що теоретично очікуване тріщиноутворення конструкцій із БПА на 2,3 % менше аналогічної конструкції із традиційною арматурою.

3. Узагальнення результатів випробувань БПА дало уявлення про особливості роботи стержнів БПА на дію статистичного та багаторазово повторюваного циклічного навантаження. Побудовано діаграму Веллера втомної міцності БПА, виявлено 2 режими роботи такої арматури: мало– та багатоциклова втома, що може бути пов'язано із втомою компоненту термічно–активного в'язучого БПА.

Спроектовано та побудовано експериментальну ділянку цементобетонної дороги, армованої сітками БПА. Проведено ряд масштабних випробувань ділянки за допомогою випробування падаючим вантажем (УДВО–2,3,4), тепловізійного обстеження та склерометра. Виявлено, що амплітуда коливань практично незмінна і становить 250 мкм (0,25 мм). При цьому спостерігається практично однакова частотність коливань до 150 000 мкс (0,15 с), що свідчить про хорошу повторюваність

даних випробувань. Виявлено більшу швидкість затухання коливань на ділянках, армованих металевою арматурою.

За результатами тепловізійного обстеження виявлено такі дефекти та руйнування цементобетонного покриття: нечасті тріщини поздовжні, поперечні та затухаючі в покритті, сколювання плит, вибоїни, незначне руйнування компенсаційного шва. Загалом цементобетонне покриття ділянки обстеження знаходиться в доброму експлуатаційному стані.

Спроековано та виготовлено зразки бетонних балок, армованих із різними діаметрами БПА. Проведено випробування на дію багаторазового повторюваного циклічного навантаження. За результатами виявлено: 5 етапів життєвого циклу конструкцій із БПА, що згинаються, а також типові характери руйнувань елементів із різним армуванням. Зразки із БПА мають високий рівень тріщиностійкості під дією багаторазово повторюваних циклічних навантажень, – на жодному із зразків не було виявлено тріщин при рівні 88% від теоретично очікуваного навантаження тріщиноутворення індивідуально для кожного зразка (приблизно 5 кН). Для першого зразка із діаметром БПА 4 мм було виконано $6,5 \cdot 10^6$ циклів навантаження у динамічному режимі. По закінченню роботи не було виявлено ані тріщин, ані зміщення стержня БПА. Навантаження руйнування було на 53% більше за теоретично очікуване. Встановлено, що навантаження тріщиноутворення в елементах з різним коефіцієнтом армування не залежить від цього коефіцієнту і для зразків різних серій близьке, а саме близько 12,7 кН. Встановлено, що теоретично очікуване тріщиноутворення конструкцій із БПА на 60% менше практично отриманого.

4. За результатами аналізу впливу факторів на надійність ЖДО за критерієм тріщиностійкості виявлено, що до найвпливовіших чинників належить геометрія запроектованого перерізу: товщина цементобетонної плити, площа робочої БПА, її положення відносно нижньої грані та товщина захисного шару бетону. Всі ці фактори збільшують «плече внутрішньої пари сил».

За результатами аналізу впливу факторів на надійність ЖДО за критерієм витривалості, крім зазначених факторів (геометрія запроектованого перерізу із БПА, товщина плити та відносна площа робочої БПА) важливим є також режим завантаження перерізу (асиметрія циклу).

Аналіз випробувань дослідної ділянки виявив, що швидкість затухання коливань на ділянці, що армована БПА, посередині, на краю та на куті дещо відрізняється від швидкості затухання на ділянці, що армована класичною металевою арматурою і побудована за допомогою лазерного бетоноукладача.

В ПК ЛІРА змодельована конструкція дослідної ділянки та досліджено НДС цементобетонного покриття ЖДО при різних схемах навантаження (середина, край, кут). Проведено статистичний аналіз результатів, отриманих внаслідок теоретичного моделювання. Зроблено висновок про вплив факторів на надійність ЖДО та уточнено перехідні коефіцієнти в залежності від точки завантаження плити дорожнього одягу. Отримані в роботі коефіцієнти відрізняються від раніше використовуваних на 0,6 %.

5. Розроблено інженерну методику оцінки надійності ЖДО за критерієм тріщиностійкості. Дана модель, де характеристика безпеки виражена через традиційні параметри поперечного перерізу елемента, що згинається, дає можливість обчислити

надійність елемента за II групою граничних станів. Початковими даними для моделі є обчислена ширина розкриття тріщин від постійних і тимчасових навантажень.

Виведено коефіцієнт γ_{μ} , що враховує відношення коефіцієнту армування перерізу стержнями БПА до його корисної площі, який залежить від коефіцієнту армування.

Для узагальнення перспективності питання надійності ЖДО із БПА було проведено техніко–економічне порівняння варіантів армування методом аналізу ієрархій. Встановлено, що найвищий ваговий критерій отримала конструкція цементобетонного покриття із БПА та захисним шаром у 5 см – 0,339, далі йде плита зі зменшеним захисним шаром до 2 см – 0,337 і найнижчий ваговий критерій отримала плита із металевою арматурою – 0,324. Аналіз цих показників дає уявлення, що використання БПА підвищує надійність ЖДО не тільки з точки зору експлуатації, а і з точки зору нецінових показників життєвого циклу споруди.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

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

1. Коваль Т. И. Исследование надежности элементов мостов, армированных базальтопластиковой арматурой. *Mechanics of Composite Materials*. Vol. 53, No. 4, September. 2017. P. 479-486. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11029-017-9677-5> (Scopus).

Статті у фахових виданнях:

2. Гамеляк І. П., Коваль Т.І. Математична модель втомної міцності неметалевої стержневої арматури. *Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка : зб. наукових праць. Серія Галузеве машинобудування, будівництво*. 2015. С. 162-168. http://znp.nupp.edu.ua/files/archive/ua/43_2015/21.pdf

3. Гамеляк І. П., Коваль Т. І. Удосконалення методики випробувань на втому бетонних перерізів елементів армованих неметалевою базальтопластиковою арматурою. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво : науково-технічний збірник*. 2017. Вип. 99. С. 184-201.

4. Коваль Т. І., Римарчук П. П. Вплив багаторазово повторюваних навантажень на міцність базальтобетонних зразків балок. *Наука та будівництво*. 2017 Вип. 4. С. 70-75.

5. Гамеляк І. П., Коваль Т. І. Технологічна надійність при влаштуванні асфальтобетонних шарів дорожнього одягу. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво : науково-технічний збірник*. 2018. Вип. 104. С. 49-56.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

6. Коваль Т. І. Ефективність використання базальтової арматури для плит проїзної частини автодорожніх мостів. «*Строительство, реконструкция и восстановление зданий городского хозяйства*»: III міжнародна науково-технічна інтернет-конференція. 2012. <https://eprints.kname.edu.ua/25241/>

7. Коваль Т. І. Дослідження можливості застосування базальтової арматури при армуванні балки прогонової будови мосту. *LXVIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників*

відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету : тези доповідей. К. : НТУ, 2012. С. 144.

8. Коваль Т. І. Дослідження можливості застосування базальтової арматури при армуванні прогонової будови мосту. *LXIX конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету* : тези доповідей. К. : НТУ, 2013. С. 161.

9. Гамеляк І. П., Коваль Т. І. Визначення втомної міцності базальтової арматури. *LXX конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету* : тези доповідей. К. : НТУ, 2014. С. 150.

10. Гамеляк І. П., Коваль Т. І., Іваницький Я. Л. Визначення втомної міцності базальтової арматури. «Покращення конструктивних, технологічних та експлуатаційних показників автомобільних доріг і штучних споруд на них в дослідженнях студентів і молодих науковців : матеріали міжнародної науково-практичної конференції. 2014 р. <http://journals.nupp.edu.ua/znp/article/view/120>

11. Гримак О. Я., Коваль П. М., Коваль Т. І. Дослідження роботи бетонних балок, армованих базальтопластиковою арматурою, при дії циклічних навантажень. «Композиційні будівельні матеріали і вироби – шляхи підвищення надійності, довговічності, корозієстійкості» : збірник матеріалів Всеукраїнської інтернет–конференції молодих учених і студентів 25 листопада 2015 р., Полтава. С. 8-9.

12. Коваль Т. І. Визначення втомної міцності неметалевої базальтопластикової арматури. *LXXI конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету* : тези доповідей. К. : НТУ, 2015. С. 135.

13. Коваль П. М., Гримак О. Я., Коваль Т. І. Ефективність використання базальтопластикової арматури при армуванні плити проїзної частини моста. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2016 р., Одеса. Вип. 61. С. 193-198.

14. Коваль Т. І. Експериментальне визначення втомної міцності базальтобетонних конструкцій. *LXXII конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету* : тези доповідей. К. : НТУ, 2016. С. 199.

15. Коваль Т. І. Підвищення надійності та довговічності базальтобетонних перерізів. *LXXIII конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету* : тези доповідей. К. : НТУ, 2017. С. 229.

16. Коваль Т.І. Застосування неметалевої композитної базальтопластикової арматури в гідротехнічних спорудах. *LXXIV конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету* : тези доповідей. К : НТУ, 2018. С. 236.

17. Коваль Т. І., Баран Д. Р. Нормування показників механічних властивостей неметалевої арматури. *LXXV конференції професорсько-викладацького складу,*

аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету : тези доповідей. К : НТУ, 2019. С. 228.

18. Diakovska T. Prospects for the use of non-metallic reinforcement in the construction of pavements. *Journal "ScienceRise"*. Vol. No. 9–10 (62–63). 2019. P 55.

АНОТАЦІЯ

Діаковська Т. І. «Методи розрахунку надійності жорсткого дорожнього одягу із базальтопластиковою арматурою»

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.11 “Автомобільні шляхи та аеродроми” (019 – Архітектура та будівництво). – Національний транспортний університет, Київ, 2021.

Дисертацію присвячено теоретичним та експериментальним дослідженням надійності жорстким дорожнім одягам, армованим базальтопластиковою арматурою. Завдяки своїм фізико–механічним та хімічним властивостям така арматура може бути застосована для запобігання процесам деградації внаслідок впливу агресивних хімічних сполук при армуванні бетонних елементів.

Дисертаційну роботу виконано з метою дослідження ефективності застосування базальтопластикової арматури в цементобетонних покриттях жорстких дорожніх одягів, які працюють під впливом циклічного багаторазово повторюваного навантаження із протіканням процесів тріщиноутворення і втоми.

Для виконання поставленої мети виконано ряд польових досліджень експериментальних ділянок та лабораторних досліджень, зокрема виготовлено 10 зразків базальтобетонних балок та випробувано їх на дію багаторазово повторюваного циклічного навантаження у лабораторних умовах; побудовано експериментальну ділянку із жорстким дорожнім одягом, армовану базальтопластиковою арматурою і досліджено її напружено–деформований стан у різних точках прикладання зовнішнього навантаження.

За результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено методи розрахунку надійності жорстких дорожніх одягів із базальтопластиковою арматурою за критеріями тріщиностійкості та витривалості.

Ключові слова: витривалість, тріщиностійкість, надійність, жорсткий дорожній одяг, базальтопластиковою арматура, базальтобетон.

АННОТАЦИЯ

Диаковская Т. И. «Методы расчета надежности жесткой дорожной одежды с базальтопластиковой арматурой»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.11 "Автомобильные дороги и аэродромы" (019 – Архитектура и строительство). – Национальный транспортный университет, Киев, 2021.

Диссертация посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям надежности жестких дорожных одежд, армированных базальтопластиковой арматурой. Благодаря своим физико–механическим и химическим свойствам такая арматура может быть применена для предотвращения процессов деградации под

воздействием агрессивных химических соединений при армировании бетонных элементов.

Диссертационная работа выполнена с целью исследования эффективности применения базальтопластиковой арматуры в цементобетонных покрытиях жестких дорожных одежд, которые работают под влиянием циклической многократно повторяющейся нагрузки с протеканием процессов трещинообразования и усталости.

Для выполнения поставленной цели выполнен ряд полевых исследований экспериментальных участков и лабораторных исследований, в частности изготовлено 10 образцов базальтобетонных балок и испытано их на действие многократно повторяющейся циклической нагрузки в лабораторных условиях; построен экспериментальный участок с жесткой дорожной одеждой, армированной базальтопластиковой арматурой и исследовано ее напряженно-деформированное состояние в различных точках приложения внешней нагрузки.

На основании результатов, проведенных теоретических и экспериментальных исследований, разработаны методы расчета надежности жестких дорожных одежд с базальтопластиковой арматурой по критериям трещиностойкости и выносливости.

Ключевые слова: выносливость, трещиностойкость, надежность, жесткая дорожная одежда, базальтопластиковая арматура, базальтобетон.

ABSTRACT

Diakovska T. I. "Methods for calculating the reliability of rigid pavement with basalt-plastic reinforcement"

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.22.11 "Highways and airfields" (019 – Architecture and construction). – National Transport University, Kyiv, 2021.

The performance indicators of concrete and reinforced concrete elements are constantly declining due to increased environmental aggression, the use of chemicals to prevent ice, increasing load and intensity of vehicles, temperature changes, cycles of freezing and melting water, and more.

Basalt-plastic reinforcement, which is made in Ukraine with Ukrainian raw materials, has chemical inertness and higher tensile strength compared to traditional metal reinforcement. Therefore, its use can increase the service life of rigid pavements and increase their reliability. To do so, it is necessary to determine the reliability of such structures at the design stage.

The reliability of rigid pavements with basalt-plastic reinforcement by the criterion of crack resistance is presented through the classical model of the difference between resistance and load, which takes into account the normalized Laplace function and the reliability (safety) characteristic. To ensure the crack resistance of the slab, the maximum width of the crack opening mustn't exceed the maximum allowable width Δ_{cr} , i.e. the condition of crack resistance $a_{cr} < \Delta_{cr} = 0,08$.

The algorithm for assessing the reliability of rigid pavement by the crack resistance criterion consists the following steps: calculated derivatives for each member of the equation for expected crack opening width and variation coefficient of allowable crack opening V_{adop} ,

root mean square value of permissible crack opening $S_{\text{адоп}}$ safety factor for crack resistance β_{crc} .

According to the analysis of the influence factors on the rigid pavement reliability by the criterion of crack resistance, it was found that the most influential factors include the geometry–designed cross–section: thickness of cement concrete slab, basalt–plastic reinforcement work area, its position relative to the lower facet. All these factors increase the "shoulder of the inner pair of forces".

The limit state of endurance (fatigue) for the grid pavement slab comes from the repeated action of the moving load due to fatigue reinforcement or concrete failure. The coefficient γ_{μ} is established in the work, which takes into account the ratio of the reinforcement coefficient in the section with basalt–plastic reinforcement to its usable area, which depends on the reinforcement coefficient and proposes: $\gamma'_{\mu} = 0,8$ – for cases when reinforcement coefficient is less than the useful area coefficient and $\gamma'_{\mu} = 0,4$ in otherwise cases. The engineering method of rigid pavement assessing reliability by the criterion of endurance is based on laboratory studies and features of characteristics are revealed at joint work of concrete and basalt–plastic reinforcement in the conditions of cyclic repeated loadings. It is established that the operation of basalt–plastic reinforcement rods in such conditions differs from metal and is given in the work "Algorithm for determining the fatigue strength of non–metallic rod reinforcement".

According to the results of the influence analysis of the factors on the rigid pavement reliability according to the endurance criterion, in addition to these factors (geometry of the designed section with basalt–plastic reinforcement, slab thickness, and relative area of reinforced) the cross–section loading mode is also important.

According to the tests results basalt–plastic reinforcement to determine the strength of static tensile and to determine the fatigue strength of cyclic tensile, the dependence of changes in the physical and mechanical basalt–plastic reinforcement rods characteristics under the static tension and on the cyclic repeated loading action (fatigue test). This work at the Institute of Physics and Mechanics G.V. Karpenko in L'viv in 2014 was conducted.

To test the elements reinforced with basalt–plastic reinforcement, bending, fatigue, was tested in the laboratory of the Department of Building Structures of the National University "L'viv Polytechnic". No specimen was destroyed due to fatigue. Structures with basalt–plastic reinforcement have considerable survivability. They do not collapse during the influence of 88% of crack loading at a dynamic work mode.

The field research purpose was to determine the stiffness (modulus of elasticity) and damping of oscillations on the cement–concrete slabs surface reinforced with metal reinforcement and basalt–plastic reinforcement under the impact load.

Analysis of the change of stress–strain state of rigid pavement structure depending on the cement concrete pavement thickness with and without basalt–plastic reinforcement proved that using cement–concrete pavement, reinforcement increases its reliability and inertness of such fittings.

The dissertation contains the theoretical generalization and the new solution for the scientific problem of rigid pavements effective methods calculation with basalt–plastic reinforcement.

Key words: reliability, rigid pavement, crack resistance, fatigue, basalt–plastic reinforcement, BFRP–concrete.