

УДК 625.7/.8

Онищенко А. М.¹, д-р техн. наук, доц., <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

Гаркуша М. В.¹, канд. техн. наук, доц., <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>

Давиденко О. О.¹, канд. техн. наук, доц., <https://orcid.org/0000-0003-0176-3256>

Цепелєв С. Ю.¹, <https://orcid.org/0000-0001-7232-4651>

Федоренко О. В.², <https://orcid.org/0000-0003-3628-4298>

¹ Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна

² Державне агентство автомобільних доріг України (Укравтодор), м. Київ, Україна

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ НА ТРАНСПОРТНИХ СПОРУДАХ

Анотація

Вступ. Автодорожні мости є невід'ємною складовою мережі автомобільних доріг транспортної інфраструктури України. Технічний стан переважної більшості автодорожніх мостів не відповідає сучасним вимогам забезпечення безпеки дорожнього руху та конструктивної надійності елементів споруд.

Проблематика. Відсутні рекомендації з проектування і влаштування цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів, а також альбом типових рішень таких конструкцій.

Мета. Проведення аналізу причин та видів утворення тріщин на цементобетонному покритті, технічної літератури та чинної нормативної документації щодо розрахунку тріщиностійкості та довговічності цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів.

Результати. Проведено аналіз застосування цементобетонного покриття на транспортних спорудах. Встановлено причин та видів утворення тріщин на цементобетонному покритті. Виконано аналіз технічної літератури та чинної нормативної документації щодо розрахунку тріщиностійкості та довговічності цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів. Встановлено методологію розрахунку оцінки довговічності цементобетонного покриття з урахуванням спільного впливу прогону будови мосту, зміни температури та дії транспорту.

Висновки. У роботі проведено аналіз перспективи застосування цементобетонного покриття на транспортних спорудах.

Ключові слова: автодорожній міст, довговічність, залізобетонна плита, утворення тріщин, проїзна частина, тріщиностійкість, цементобетонне покриття.

Актуальність роботи

На автомобільних дорогах України експлуатується 16191 од. автодорожніх мостів підпорядкованих Укравтодору. Зауважимо, що 93 % автодорожніх мостів в Україні є залізобетонними [1, 2]. Конструктивно залізобетонні автодорожні мости складаються з балок та залізобетонної плити прогону будови мосту з автодорожнім покриттям проїзної частини (переважно асфальтобетоном).

Автодорожній залізобетонний міст розглядається як будівельна конструкція з семи груп елементів [3]: проїзна частина, прогону будова, опори та опорні частини, фундаменти, підходи до мосту, підмостове русло та регуляційні споруди. З цих семи груп елементів — три групи є

визначальними елементами (несими): прогонова будова (залізобетонні балки і плита проїзної частини), опори та опорні частини, фундаменти. В рамках нашого дослідження розглядаємо лише дві групи елементів, які є предметом дослідження — проїзна частина мосту та прогонова будова.

На дорогах України загального користування експлуатується автодорожніх мостів загальною довжиною 364 км, у тому числі загальнодержавного значення мостів довжиною 72,5 км та мостів довжиною 291,5 км місцевого значення [4–7]. З них на сьогодні понад 9500 од. мостів не задовольняють частково чи повністю вимогам чинних норм експлуатації і, тим самим, порушуються вимоги безпечної експлуатації, а 702 од. — потребують термінового ремонту [8]. Сьогодні 90–95% залізобетонних прогонових будов мостів мають дефекти бетону й арматури, які знижують довговічність і несну здатність [1].

Проблема безпечної експлуатації мостів стала нагальною ще в часи Радянського Союзу. В останнє десятиріччя проблема ще загострилася в силу низки несприятливих причин. Наведемо деякі з них: система експлуатації не відповідає сучасним технічним нормам і не володіє потрібними ресурсами для правильного та своєчасного догляду за спорудами; система фінансування дорожньої мережі України не дає змоги застосовувати сучасні та інноваційні технології з експлуатації і будівництва мостів. В Україні немає чіткого стратегічного плану вдосконалення, підтримання та експлуатації автодорожніх мостів. У зв'язку зі зростанням параметрів транспортних навантажень та аномально високими літніми температурами, значного розповсюдження набули дефекти асфальтобетонному покриття залізобетонних автодорожніх мостів, що перешкоджають безпечній експлуатації споруди. Актуальною залишається проблема, пов'язана з станом покриття автодорожніх мостів та мостів в цілому, що є невід'ємною складовою мережі автомобільних доріг, більшість з яких (близько 65 %) побудовано до 1970 року за діючими на той час нормативами. З того часу навантаження на автомобільні дороги, особливо транзитних напрямків, значно зросли. Також ці недоліки посилює рівень фінансування дорожньої галузі за останні 10 років, який становив (14–34) % від мінімально необхідної потреби на ремонт та утримання мережі автомобільних доріг [4, 7].

Слід зазначити, що відповідно до ДБН В.2.3-22 [9] можливо застосовувати два види автодорожніх покриттів на мостах: конструкція з гідроізоляцією (асфальтобетонне покриття) та конструкція без гідроізоляції (цементобетонне покриття). Нам не вдалося знайти наукових робіт або статистичних даних в яких надається інформація про відсоткове співвідношення мостів за типом автодорожнього покриття, але аналіз типових проектів, досвід і опитування інженерів та будівельників підтверджує, що переважна більшість автодорожніх залізобетонних мостів України в експлуатації мають саме асфальтобетонне покриття.

Асфальтобетонне покриття на автодорожніх мостах є складовим елементом проїзної частини (в рамках дослідження розглядається автодорожнє покриття лише на залізобетонних плитах проїзної частини моста), з урахуванням шарів гідроізоляції й захисного шару [8]. Покриття складається з верхнього шару, яке безпосередньо сприймає вплив транспортних навантажень і атмосферних факторів, і несного шару, що розподіляє й передає навантаження на нижче розташовані елементи проїзної частини. У ряді випадків несний шар може бути відсутнім, тоді функції розподілу й передачі навантаження виконує покриття. Покриття може мати додатковий тимчасовий шар, що виконує роль захисного шару або шару зносу (поверхнева обробка тощо) [11]. Він може влаштовуватись при новому будівництві й відновлюватись в процесі експлуатації або влаштовуватись замість зношеної частини покриття при виконанні ремонтів. Не дивлячись на те, що останнім часом в якості покриття на автодорожніх мостах почали використовувати нові асфальтобетони (ЩМА, литий асфальтобетон, дренажний асфальтобетон та асфальтобетон на в'язучих з використанням полімерів), найпоширенішим матеріалом залишається гарячий асфальтобетон. Вивченням впливу зовнішніх факторів на асфальтобетонне покриття автомобільних доріг та мостів, а також розробкою нових конструктивних рішень, створення нових матеріалів

і технології для підвищення довговічності покриття, займалися і займаються такі вітчизняні та закордонні вчені: А.Г. Батракова, О.І. Безбабічева, М.В. Бистров, О.К. Біруля, А.О. Білятинський, А.М. Богуславский, В.І. Братчун, О.І. Васильєв, Є.Б. Васильєв, Ю.М. Васильєв, С.Л. Вейцман, В.А. Веренько, В.К. Вирожемський, Д.Ю. Виноградський, М.І. Волков, О.О. Воловик, І.П. Гамеляк, Д.Б. Гезенцвей, М.В. Горелишев, В.М. Гоглідзе, Л.М. Гохман, С.К. Головка, В.М. Даценко, С.Г. Джигіт, В.К. Жданюк, Л.В. Захаров, В.О. Золотарьов, М.М. Іванов, О.М. Іщенко, М.І. Калашніков, В.Г. Кваша, І.В. Кияшко, П.М. Коваль, М.М. Корнеєв, Е.В. Котлярський, Я.М. Ковальов, Г.М. Кірюхін, Ю.О. Кірічек, А.І. Лантух-Лященко, А.С. Лапченко, Я.Д. Лівшиц, М.П. Лукін, Й.Й. Лучко, Л.І. Мещеряков, А.В. Мішутін, В.В. Мозговий, В.Б. Назаренко, В.Ф. Невінгловський, Я.М. Новіков, І.Г. Овчинніков, А.М. Онищенко, М.В. Пахомов, Д.О. Павлюк, В.Г. Піскунов, С.М. Попченко, Є.Д. Прусенко, Б.С. Радовський, С.Л. Рутгайзер, А.В. Руденський, І.О. Риб'єв, В.Я. Савенко, Ю.М. Саканський, І.Д. Сахарова, Д. Сібільській, А. Соловчук, С.Й. Солодкий, М.В. Стабніков, Н.Є. Страхова, Г.К. Сьонь, Б.Б. Телтаєв, М.І. Шейнцвіт, В.І. Шестеріков, А.А. Шкуратовський, К.В. Циркунова, Г.Ф. Фукс, В.Н. Яромко та інші дослідники. Встановлено, що асфальтобетонне покриття на автодорожніх мостах перебуває у складних умовах експлуатації. На них у процесі служби діють багато несприятливих факторів, до основних з яких відносять: атмосферні опади; коливання температури; перемінне заморожування-відтавання води в порах і ушкоджених місцях; сонячна радіація; забруднення води й повітря агресивними хімічними засобами, що були викинуті промисловістю; антижеледні реагенти; рідкі нафтопродукти й кислоти, що потрапляють на поверхню в процесі проїздів транспортних засобів; продукти згорання палива у двигунах; циклічні навантаження при русі важкого транспорту, що викликають складний несприятливий напружено-деформований стан покриття в різних конструктивних сполученнях. При цьому, негативність всіх перелічених факторів, по відношенню до асфальтобетонного покриття на мостах, посилюється їх одночасною дією. Дія цих несприятливих факторів приводить до того, що в процесі експлуатації раніше інших елементів конструкції мостів виходить із ладу, як правило, асфальтобетонне покриття [7, 11]. При цьому ушкодження асфальтобетонного покриття значною мірою приводять до погіршення роботи конструкції прогонових будов і опор через появу можливості проникнення атмосферної вологи, підвищується ступінь динамічної дії у вигляді ударів коліс через нерівність зруйнованого покриття, що може викликати перевантаження окремих елементів [12].

Зважаючи на всі вище перераховані недоліки асфальтобетонного покриття та досвід країн ЄС та США, а також сучасні світові наукові дослідження [13–17], пропонується альтернатива асфальтобетонному покриттю на автодорожніх мостах — цементобетонне покриття. Незважаючи на світовий досвід в застосуванні та вивченні такого типу покриття, в Україні ця наукова та практична проблема мало вивчена і потребує детального розгляду та дослідження, що і є метою цієї роботи. Пошук наукових статей в періодичних наукових виданнях України по темі цементобетонних покриттів на залізобетонних мостах не дав результатів. Над вирішенням наукових питань з влаштування цементобетонних доріг та жорстких покриттів на аеродромах працюють такі вітчизняні науковці Белятинский А. [13, 18], Гамеляк І. П. [19, 20], Дмитрієв М. М. [4, 21], Коваль П. М. [22], Солодкий С. Й. [23–26], Чистяков В. В. [27, 28]. Очевидно, що в Україні жорсткі типи покриття менш досліджені та розповсюджені в порівнянні з асфальтобетонним, в той час цементобетонне покриття на залізобетонних автодорожніх мостах України є маловивченою науковою проблемою.

Цементобетонне покриття має низку переваг перед асфальтобетонним, назвемо деякі з них: більш стійке к деформаціям, наприклад колієутворенню; більша довговічність; забезпечує кращий рівень дорожньої безпеки, наприклад менший гальмівний шлях, кращі світловідбиваючі властивості (**рис. 1**); менша мінімальна товщина покриття (від 6 см); більш екологічний матеріал, що краще придатний для переробки; протягом життєвого циклу потребують меншої кількості експлуатаційних втручань.



Рисунок 1 — Світловідбиваючі властивості цементобетонного (зліва) та асфальтобетонного покриття (справа)

Основною проблемою при експлуатації цементобетонного покриття на автодорожніх залізобетонних мостах є зменшення довговічності внаслідок тріщиноутворення.

Світова тенденція та напрям сучасних досліджень вказує на стрімкий розвиток будівництва доріг жорсткого типу та цементобетонного покриття на залізобетонних мостах. Тому постає нагальна необхідність у вивченні і дослідженні влаштування та експлуатації такого покриття на мостах України.

Аналіз причин та видів утворення тріщин на цементобетонному покритті

Наслідки, які може викликати природне тверднення цементобетонів, досить різноманітні та в першу чергу визначаються зовнішніми умовами [29].

Можна вважати встановленим фактом [1, 2, 3, 9, 10], що тріщини на поверхні дорожнього цементобетону виникають із трьох основних причин:

- усадка цементобетону при твердінні [1, 2];
- наявність градієнта температур між поверхнею та внутрішньою частиною цементобетону [9];
- циклічна дія механічних навантажень [10].

Як свідчать дані аналітичного огляду [23], тріщиностійкість цементобетону визначається значною кількістю чинників, трактування ролі яких різними дослідниками подекуди протилежне, що пов'язано, зокрема, із різноманітністю застосованих методик визначення характеристик тріщиностійкості та відсутністю єдиного інтегрального показника для її оцінювання, який відображав би фізичну сутність процесу руйнування цементобетону.

Слід зазначити, що на сьогодні відсутні чітко виражені залежності впливу різних чинників на усадку і утворення тріщин, а приводиться співвідношення досить складні і мають емпіричний коефіцієнти (наприклад, Лерміт Р. призводить залежність, в якій є чотири безрозмірних коефіцієнта [8]).

Мчедлов-Петросян О. П. [29] виділив кілька груп чинників, що приводять до руйнування цементобетону:

- хімічні (різні види корозії в рідких і газових середовищах);
- фізичні (температурні впливу, кристалізація солей, випаровування води тощо);
- механічні (стирання, вібрація тощо);
- електрохімічні (дія електрострумів);
- біохімічні (дію бактерій і мікроорганізмів);

– фізико-хімічні (різні корозійні процеси, що відбуваються за рахунок фізико-хімічних явищ, пов'язаних з усадкою та набуханням).

Аналіз технічної літератури та чинної нормативної документації щодо розрахунку тріщиностійкості та довговічності цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів

Огляд чинних нормативних документів у галузі будівництва, споруди транспорту, мости та труби [2, 3, 9, 30, 31, 32] показав, що з влаштування автодорожнього покриття на проїзній частині залізобетонних мостів не має чітких рекомендацій чи вимог з підбору цементної суміші, виду армування (арматурна сітка, фібра тощо), призначення товщини покриття, влаштування водовідводу тощо. Наведемо декілька вимог до конструкції без гідроізоляції (цементобетонне покриття) [9, п. 7.2.4]: «У разі застосування в якості покриття безусадкового бетону (класу міцності В40 з водонепроникністю W12 і морозостійкістю F300 товщиною не менше 50 мм) гідроізоляція під цим бетоном може бути відсутня. Але слід забезпечити водонепроникність конструкції плити в інших місцях: на тротуарах, біля бордюрів та водозливних трубок тощо.», [9, Додаток Е] «На монолітну залізобетонну плиту прогонової будови укладається поверхневий шар безусадкового бетону завтовшки не менше ніж 50 мм, класу В40 за міцністю, W12 за водонепроникністю, F300 за морозостійкістю (з випробуванням у соляному середовищі). У розрахунках на тріщиностійкість напруження розтягу в бетоні поверхневого шару мають не перевищувати вимог за тріщиностійкістю категорій 2-а і 2-б згідно з ДБН В.2.3-14 [2], залежно від типу армування залізобетонної плити. Для бетону поверхневого шару слід застосовувати модифіковані добавки, що підвищують його водонепроникність, розтяжність й опірність стиранню. Якщо при випробуваннях бетону поверхневого шару виявиться, що його розтяжність вище передбаченої для бетону класу В40, то в розрахунках допускається враховувати підвищені значення R_{bt} і $R_{bt,ser}$. При визначенні зусиль у бетоні поверхневого шару необхідно враховувати стадійність завантаження прогонової будови. Нижні 25 мм бетону поверхневого шару дозволяється включати в розрахунковий переріз залізобетонної плити прогонової будови; захисний шар верхньої арматури залізобетонної плити приймати завтовшки 30 мм».

За таких обмежених вимог, рекомендацій, браку досвіду у порівнянні з влаштуванням асфальтобетонного покриття та при відсутності альбому типових рішень постає проблема впровадження та розвитку влаштування цементобетонного покриття на залізобетонних автодорожніх мостах України.

Тріщиноутворення в цементобетонному покритті на мостах є проблемою в усіх країнах протягом багатьох років. Перші тріщини утворюються вже на початку життєвого циклу експлуатації споруди, в деяких випадках навіть до відкриття руху на мості, і часто перевищуючи допустиме розкриття тріщини, ніж 0,18 мм [33] для США та 0,02 см для країн ЄС [31], Таблиця 7.101N] та України [2, п. 3.95]: «0,020 см — в елементах прогонових будов залізничних мостів, у верхніх плитах проїзної частини автодорожніх та міських мостів при виконанні на них гідроізоляції, в стійках і палях всіх опор, які знаходяться в зоні перемінного рівня води, а також в елементах та частинах водопропускних труб». Зауважмо, що при відсутності гідроізоляції, тобто для цементобетонного покриття проїзної частини граничної ширини розкриття тріщини у [2, п. 3.95] не надається. Перевищення допустимого розкриття тріщини прискорює процес деградації та зменшує довговічність споруди, дозволяючи більш легко проникати воді, розчину солі та хімікатам в глибоку конструкцію. При відсутності ремонту тріщин покриття проїзної частини, вони поширюються з часом і досягають залізобетонної плити мосту та балок прогонової будови. Ці несні елементи ремонтувати складніше і дорожче за конструктивні (не несні), такі як автодорожнє покриття проїзної частини, а утворення тріщин в несних елементах значно скорочують термін служби та надійність, що призводить до збільшення витрат.

Методологія розрахунку оцінки довговічності цементобетонного покриття з урахуванням спільного впливу прогонової будови мосту, зміни температури та дії транспорту

Загальна модель довговічності елементів споруд

У найбільш загальній формі сучасне формулювання проблеми довговічності наведено в документі Об'єднаного комітету з безпеки споруд (Joint Committee on Structural Safety [34] — 2000 р. та в монографії Мельчерса Р. (Robert E. Melchers) [35] — 1999 р., як ймовірність досягнення граничного стану за час t . Для цього вводиться функція граничного стану, залежна від часу:

$$g(X, t) = R(X, t) - Q(X, t), \quad (1)$$

де $R(X, t)$ — узагальнений опір елемента;
 $Q(X, t)$ — узагальнений навантажувальний ефект;
 X — вектор базових змінних;
 t — змінна часу.

Сама функція надійності, як ймовірність досягнення граничного стану за час t має вид:

$$P(t) = Prob [\min g(X(\tau), \tau) < 0 \text{ для } 0 < \tau < t] \quad (2)$$

або в термінах функції граничного стану:

$$P(t) = Prob[R(X, t) - Q(X, t) < 0]. \quad (3)$$

Таким чином, залежностями (2), (3) довговічність формулюється як поняття функціонально зв'язане з надійністю. Максимальне значення t що задовольняє залежностями (2), (3) і є довговічність T .

Цей загальний підхід було викладено, в дещо іншій формі, в монографії Болотіна В. В. ще у 1971 р. [36]. Так для випадку елемента, експлуатація якого припиняється після першої відмови, середня довговічність T визначається інтегралом:

$$T = \int_0^{\infty} t \cdot p(t) dt, \quad (4)$$

де t — час;
 $p(t)$ — частота відмов, щільність часу досягнення граничного стану:

$$p(t) = \frac{-dP(t)}{dt}. \quad (5)$$

Інтегруванням (4) по частинам, з урахуванням (2), отримується інтеграл, що дає середнє значення довговічності:

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (6)$$

де t — час;

Безпосереднє обчислення інтеграла (6) обмежено складністю формулювання випадкової функції надійності $P(t)$ — тому практичного значення набули числові моделі оцінки довговічності елементів. У цьому дослідженні, дещо умовно, моделі довговічності класифікуються за двома групами:

- детерміністичні моделі (напівймовірнісні);
- стохастичні моделі.

Детерміністичні моделі — найбільш прості для прогнозування технічного стану елементів мостів. Ці моделі засновані на статистичній, як правило, нелінійній регресії аналізу даних для визначення швидкості зносу. Інший підхід розбудови детерміністичної моделі базується на фізико-механічних аспектах деградації матеріалів під дією зовнішніх навантажень та впливів оточуючого середовища.

Стохастичні моделі представляють процес погіршення технічного стану елементів моста з плином часу, як поняття функціонально зв'язане з надійністю. Максимальне значення t що задовольняє випадковій функції надійності типу (2), (3) і є довговічність T .

Детерміністичні моделі оцінки технічного стану залізобетонних елементів транспортних споруд. Моделі засновані на статистичній нелінійній регресії. Серед детерміністичних моделей оцінки рівня деградації елементів споруд найбільш поширені такі що засновані на статистичній нелінійній регресії аналізу історичних даних системи експлуатації. Наукова ідея таких моделей полягає в наближеному опису процесу деградації за допомогою детермінованих та випадкових даних історії експлуатації елементів транспортних споруд. В інших термінах розбудова такої моделі полягає у пошуку функції яка оптимально віддзеркалює натурні дані.

У будівельній механіці, з 50-х років минулого століття, панувала модель накопичення пошкоджень відома під назвою «теорія лінійного підсумовування пошкоджень Пальмгрена – Майнера», в якій використовується принцип лінійної суперпозиції [37]:

$$\sum_0^n \frac{N_t}{N(\sigma)} = D_i, \quad (7)$$

де D_i — міра пошкоджень;
 N_t — число циклів навантаження;
 $N(\sigma)$ — число циклів до руйнування при режимі напруження σ ;
 n — число ступенів змін режиму вантаження.

Граничне число циклів до руйнування N_R визначається з умови $D = 1$ [38]:

$$\int_0^{N_R} \frac{dN}{N_R(\sigma)} = \sum_0^{N_R} \frac{N_i}{N_R(\sigma)} = 1. \quad (8)$$

Визначення міри пошкоженості цементобетонного покриття від розтягувальних напружень, що виникають внаслідок дії пневматичних коліс транспортних засобів

На основі вище наведених теоретичних досліджень пропонується визначати міру пошкоженості структури цементобетонного покриття від дії пневматичних коліс транспортних засобів. Як відомо із вище наведеного аналізу, що модуль пружності цементобетонного покриття змінний від часу дії навантаження, а також підтверджено, результатами теоретичних та експериментальних досліджень таких вчених як Солодкого С. Й., Левіцького Е. Ф., Чернігова В. А., Радовського Б. С., Мозгового В. В., Шейкіна А. Е. та ін. Тому від дії пневматичних коліс

транспортних засобів у цементобетонному покритті виникають розтягуючі напруження та з часом відбуваються втомні пошкодження у покритті. У зв'язку з тим, що з кожним роком збільшується навантаження великовагових транспортних засобів призводить до збільшення тиску в шині колеса, що передається на цементобетонне покриття.

Тому у нашому випадку на цементобетонне покриття, діє колісне навантаження, яке викликає розтягуючі напруження, тому міра пошкодження від зміни напружень та дії пневматичних коліс транспортних засобів приймається за виразом $M_{Tp}(t)$:

$$M_{Tp}(t) = \frac{N_{pt}}{N}, \quad (9)$$

де N_{pt} — сумарна інтенсивність руху;
 N — гранично допустима кількість розрахункового навантаження, що може витримати цементобетонне покриття при дії горизонтального розтягуючого напруження σ_p при згині.

Тому, пропонується для оцінки напружено-деформованого стану цементобетонного покриття застосувати числове моделювання. Це дозволило отримати та апроксимувати функцію для визначення горизонтальних розтягуючих напружень в цементобетонному покритті за залежністю для 4-змінних факторів:

$$\sigma_{pt}(t) = \frac{p}{p_0} \cdot (a_{cy} \cdot E(t) + 2,2804 \cdot K_M \cdot K_{умв} \cdot K_{шт} \cdot n \left(\frac{h \cdot K_t}{D} \right) - (b_{cy} \cdot E(t) + 1,0563 \cdot \ln \left(\frac{R}{l_{np}} \right)), \quad (10)$$

де p — розрахунковий тиск, що приймається згідно з табл. Б ДБН В.2.3-4, МПа [39];
 $E(t)$ — модуль пружності цементобетону, який залежить від часу дії навантаження, МПа;
 h — товщина цементобетонної плити, м;
 D — діаметр кола, рівновеликого за площею відбитку колеса, см;
 a_{cy}, b_{cy}, p_0 — параметри рівняння ($a_{cy} = 0,00003$; $b_{cy} = 0,000003$; $p_0 = 1,0$ МПа).
 K_M — коефіцієнт, що враховує вплив місця розташування навантаження: для неармованих покриттів $K_M = 1,5$; для покриттів з крайовим армуванням або майданчиків з розташуванням смуг накату не ближче ніж 0,8 м; зовнішнього поздовжнього краю покриття — $K_M = 1,0$ для поздовжнього напрямку і $K_M = 1,5$ для поперечного;
 $K_{умв}$ — коефіцієнт, що враховує умови роботи, рівний 0,66;
 $K_{шт}$ — коефіцієнт, що враховує вплив штирових з'єднань на умови контакту плит з основою: при наявності у поперечних швах штирів $K_{шт} = 1$, при відсутності штирів $K_{шт} = 1,05$;
 R — радіус відбитка колеса, см;
 l_{np} — пружна характеристика плити, см;
 K_t — коефіцієнт, що враховує вплив температурного короблення плит.

Також для оцінки пошкодженості цементобетонного покриття у відповідності нормативного документу [40] пропонується визначати напруження розтягу σ_p в разі згину для розрахунку товщини покриття за умови гарантованого повного контакту плити з основою за залежністю [40]:

$$\sigma_p = K_{мц} \cdot \sigma_{рt}, \quad (11)$$

де $K_{мц}$ — коефіцієнт міцності з урахуванням заданого рівня надійності;
 $\sigma_{рt}$ — напруження розтягу при згині, що виникають у цементобетонному покритті від дії навантаження, з урахуванням перепаду температури по товщині плити приймається за [40] або визначається за допомогою моделювання методом скінчених елементів, що наведено нижче:

$$\sigma_{рt} = \frac{Q_p \cdot K_m \cdot 60 \cdot K_{умв} \cdot K_{шт} \cdot \left(0,0592 - 0,09284 \cdot \ln\left(\frac{R}{l_{np}}\right)\right)}{h^2 \cdot K_t}, \quad (12)$$

де Q_p — розрахункове навантаження, кН, приймається згідно з табл. Б ДБН В.2.3-4 [39].

У даному випадку міра пошкодження цементобетонного покриття від зміни напружень від дії пневматичних коліс транспортних засобів з урахуванням числового моделювання визначається за такою залежністю:

$$M_{T_p}(t) = \frac{N_p \cdot n_c \cdot \frac{(q^t - 1)}{(q - 1)}}{\left(\frac{K_p \cdot B_{tb} \cdot K_M \cdot K_C \cdot K_{морз}}{K_{мц} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot (a_{cy} \cdot E(t) + 2,2804) \cdot K_M \cdot K_{умв} \cdot K_{шт} \cdot \ln\left(\frac{h \cdot K_t}{D}\right) - (b_{cy} \cdot E(t) + 1,0563 \cdot \ln\left(\frac{R}{l_{np}}\right))} \right)^m}, \quad (13)$$

де n_c — кількість днів року з позитивною температурою повітря (приймається за довідковими даними);
 q — знаменник, що описує щорічний приріст інтенсивності руху;
 t — строк служби цементобетонного покриття до капітального ремонту.

Другий варіант міри пошкоженості цементобетонного покриття від зміни напружень від дії пневматичних коліс транспортних засобів з визначається за такою залежністю:

$$M_{T_p}(t) = \frac{N_p \cdot n_c \cdot \frac{(q^t - 1)}{(q - 1)}}{\left(\frac{K_p \cdot B_{tb} \cdot K_M \cdot K_y \cdot K_{морз}}{K_{мц} \cdot \frac{Q_p \cdot K_m \cdot 60 \cdot K_{умв} \cdot K_{шт} \cdot \left(0,0592 - 0,09284 \cdot \ln\left(\frac{R}{l_{np}}\right)\right)}{h^2 \cdot K_t}} \right)^m}. \quad (14)$$

У даному випадку під пошкоженістю розуміють формальне кінетичне поняття незворотних розривів ушкоджень зв'язків у цементобетонному покритті, що накопичуються в часі при визначеному характері впливу основних факторів (в даному випадку від зниження

температури, усадки бетону та під дією пневматичних коліс транспортних засобів). Міра пошкодженості в нашому випадку — відносний параметр, що характеризує ступінь ушкодження структури цементобетону при впливі руйнівних факторів, у порівнянні з максимально можливим значенням пошкодження (в даному випадку руйнування).

Визначення міри пошкодженості цементобетонного покриття автомобільних доріг від усадки бетону при твердінні

Тріщини в цементовмісних матеріалах можуть виникати через різні фактори [41]: різниця коефіцієнтів лінійного термічного розширення; тепловиділення цементу; внутрішні напруження в структурі цементного каменю чи в зоні контакту «цементний камінь – заповнювач»; не належний догляд за влаштованим шаром; постійний тепло і масообмін (водяний пар, рідка фаза води), що викликає нерівномірний розподіл температури і вологості по товщині; усадка під дією фізико-хімічних процесів при твердінні цементного каменю; деформації від транспортних навантажень.

Для розрахунку цементобетонних шарів дорожнього одягу на тріщиностійкість або як записано в ГБН В.2.3-37641918-557:2016 «Дорожній одяг жорсткий» – «6.1.3 Розрахунок монолітного цементобетонного покриття», необхідно знати величину напружень від дії вище перерахованих факторів. Визначити напруження в цементобетонних шарах від транспортних навантажень і перепаду температур можна за ГБН В.2.3-37641918-557 [40] при цьому розрахунок напружень від усадки в момент тужавіння та твердіння не враховується взагалі, що може свідчити про відсутність такого розрахунку. Однак, як показує практика дуже часто напруження від усадки в цементобетонних та інших цементовмісних шарах дорожнього одягу з кристалізаційною структурою досягають величини напруження від дії транспорту і перепаду температур. Саме тому виникла потреба у визначенні напружень в цементовмісних матеріалах з кристалізаційною структурою на стадії тужавіння до досягнення «традиційних» 28 діб.

Для детального процесу дослідження усадки цементовмісних матеріалів з кристалізаційною структурою величину усадки ділять на частину, що обумовлена випаровуванням вологи і частину обумовлену процесами твердіння [41]. Для спрощення розрахунків об'єднаємо ці процеси в один.

При нерівномірному розподілі вологи $W(z, t)$ по товщині h цементовмісного матеріалу з кристалізаційною структурою в ньому виникають пружні напруги $\sigma_w(z, W)$, що описуються формулою:

$$\sigma_w(y, W) = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \mu} \cdot \left[W(y, t) - \frac{1}{h} \cdot \int_0^h W(y, t) dz - \frac{12 \cdot (1 - C_x) \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right)}{h^3} \cdot \int_0^h W(y, t) \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) dy \right], \quad (15)$$

- де $\sigma_w(y, W)$ — напруження в цементобетонні від усадки, МПа;
 y — поточна координата по товщині шару, м;
 t — час догляду, год;
 h — товщина шару, м;
 C_x — коефіцієнт міри жолоблення;
 α — коефіцієнт усадки, який характеризує зменшення лінійного розміру зразка при видаленні з нього 1 % вологи;
 E — модуль пружності, МПа;
 μ — коефіцієнт Пуассона;
 $W(y, t)$ — функція розподілу вологи по товщині шару цементобетону.

Формула (15) аналогічна формулі академіка Тимошенко С. П. [41] для визначення температурних напружень в цементобетонних покриттях, тільки замість розрахункової функції розподілення температури по товщині покриття або шару дорожнього одягу використовується функція розподілу вологи.

Поле вологості цементобетонного покриття або шару дорожнього одягу з кристалізаційною структурою формується під дією випаровування води за рахунок температури і вітру, фізико-хімічних процесів гідратації і гідролізу води з цементом, а також можливою втратою води з цементобетонної суміші через нижче розташований шар або ґрунт земляного полотна [41]:

$$W(y, t) = \frac{y \cdot t \cdot (m - m_1)}{h} - m \cdot t + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2h^2}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \left\{ \left[m - m_1 \cdot (-1)^n \right] \cdot \left[1 - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right] \sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} \right\} + W_n, \quad (16)$$

- де m — коефіцієнт інтенсивності зміни вологи на верхній поверхні шару цементобетону від температури та швидкості вітру, %/год;
 m_1 — коефіцієнт інтенсивності зміни вологи на нижній поверхні шару цементобетону, %/год;
 a_1 — коефіцієнт вологопровідності, м²/год;
 W_n — початкова вологість, %.

Для виразу (16) граничними умовами слугують такі рівняння:

$$W(y, 0) = W_n = \text{const}; W(0, t) = W_n - m \cdot t; W(h, t) = W_n - m_1 \cdot t. \quad (17)$$

Підставляючи рівняння (16) до рівняння (15), функція розподілу вологи по товщині шару цементобетону стає підінтегральним виразом. Для другої складової виразу у квадратних дужках рівняння (15) функція розподілу вологи по товщині шару прийме вигляд:

$$\int_0^h W(z, t) dz = \frac{t \cdot (m - m_1)}{h} \cdot \int_0^h z dz - m \cdot t \cdot \int_0^h dz + W_n \cdot \int_0^h dz + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \times \left\{ m \int_0^h \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} dz - m \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \int_0^h \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} dz - m_1 \cdot (-1)^n \cdot \int_0^h \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} dz + m_1 \cdot (-1)^n \times e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \int_0^h \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} dz \right\}. \quad (18)$$

Підінтегральна функція синуса матиме вигляд:

$$\int_0^h \sin \left(\frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} \right) dy = - \frac{h \cdot \cos \left(\frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} \right)}{\pi \cdot n} \Bigg|_0^h = - \frac{h \cdot \cos(\pi \cdot n)}{\pi \cdot n} + \frac{h}{\pi \cdot n} = \frac{h - h \cdot \cos(\pi \cdot n)}{\pi \cdot n}. \quad (19)$$

Для третьої складової виразу у квадратних дужках рівняння (15) функція розподілу вологи по товщині шару прийме вигляд:

$$\int_0^h W(y,t) \cdot \frac{h}{2} dy = \frac{h^2 \cdot t \cdot (m - m_1)}{4} - \frac{h^2 \cdot m \cdot t}{2} + \frac{h^2 \cdot W \cdot n}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{h^3}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \times$$

$$\times \left\{ \frac{m \cdot (h - h \cdot \cos(\pi \cdot n))}{\pi \cdot n} - m \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \frac{h - h \cdot \cos(\pi \cdot n)}{\pi \cdot n} - m_1 \cdot (-1)^n \times \right.$$

$$\left. \times \frac{h - h \cdot \cos(\pi \cdot n)}{\pi \cdot n} + m_1 \cdot (-1)^n \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \frac{h - h \cdot \cos(\pi \cdot n)}{\pi \cdot n} \right\}. \quad (20)$$

$$-1 \cdot \int_0^h W(y,t) \cdot y dy = -\frac{h^2 \cdot t \cdot (m - m_1)}{3} + \frac{m \cdot t \cdot h^2}{2} - \frac{W_n \cdot h^2}{2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \times$$

$$\times \left\{ \frac{m \cdot h \cdot (h \cdot \sin(n \cdot \pi) - n \cdot \pi \cdot h \cdot \cos(\pi \cdot n))}{n^2 \cdot \pi^2} - m \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \times \right.$$

$$\times \frac{h \cdot (h \cdot \sin(n \cdot \pi) - n \cdot \pi \cdot h \cdot \cos(\pi \cdot n))}{n^2 \cdot \pi^2} - m_1 \cdot (-1)^n \cdot \frac{h \cdot (h \cdot \sin(\pi \cdot n) - n \cdot \pi \cdot h \cdot \cos(\pi \cdot n))}{n^2 \cdot \pi^2} +$$

$$\left. + m_1 \cdot (-1)^n \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \frac{h \cdot (h \cdot \sin(\pi \cdot n) - n \cdot \pi \cdot h \cdot \cos(\pi \cdot n))}{n^2 \cdot \pi^2} \right\}. \quad (21)$$

Враховуючи тільки першу і другу складові виразу у квадратних дужках рівняння (15) можна визначити напруження для вільного краю середини плити, яка не може коробитися. При врахуванні всіх трьох складових виразу у квадратних дужках рівняння (15) можна визначити напруження для вільного краю середини плити, яка може коробитися.

Підставляючи формули (18–21) в (15), без врахування третьої складової виразу у квадратних дужках, можемо визначити напруження від усадки в цементобетонних покриттях при тужавінні та твердінні без можливості коробитися:

$$\sigma_w(y,W) = \frac{\alpha \cdot E \cdot t \cdot (m - m_1)}{1 - \mu} \cdot \left(\frac{y}{h} - 0,5 \right) + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m + m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \times$$

$$\times \left\{ \sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - \frac{2}{\pi \cdot n} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1}{\pi \cdot n} \right\} +$$

$$+ \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m - m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left(\sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right). \quad (22)$$

Підставляючи формули (18–21) в (15) можемо визначити напруження від усадки в цементобетонному покритті при тужавінні та твердінні з можливістю коробитися:

$$\begin{aligned} \sigma_w(y, W) = & \frac{\alpha \cdot E \cdot t \cdot (m - m_1)}{1 - \mu} \cdot \left(\frac{y}{h} - 0,5 \right) + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m + m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \times \\ & \times \left\{ \sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - \frac{2}{\pi \cdot n} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1}{\pi \cdot n} \right\} + \\ & + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m - m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left(\sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right) - \frac{12 \cdot (1 - C_x) \cdot \left(\frac{h}{2} - z \right) \cdot \alpha \cdot E}{(1 - \mu)} \times \\ & \left[-\frac{h^2 \cdot t \cdot (m - m_1)}{12} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{h^4}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \left\{ \frac{m}{\pi \cdot n} \right\} + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{h^4}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \times \right. \\ & \left. \times \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} - \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} - \frac{2 \cdot m_1 \cdot (-1)^n}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1 \cdot (-1)^n}{\pi \cdot n} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

Якщо в формулі (23) C_x дорівнює одиниці, то це означає відсутність короблення в цементобетонному або іншому цементовмісному шарі дорожнього одягу і формула (23) автоматично перетворюється в формулу (22).

На основі теоретичного рішення можна розраховувати напруження від усадки, що виникають в цементобетонному покритті автомобільних доріг з кристалізаційною структурою при тужавінні та твердінні. Рішення базується на теорії пружності і враховує наступні параметри: масообмін (водяний пар, рідка фаза води), який формується під впливом втрат вологи на межах шару і викликає нерівномірний розподіл вологості по товщині шару; коефіцієнт вологопровідності, модуль пружності, коефіцієнт усадки, які відображають структуру і характеристики матеріалу; а також час догляду і міру жолоблення. Отримані залежності (22, 23) дозволяють розрахувати напруження від усадки на будь-якій глибині шару і в будь-який момент часу догляду за цим шаром, а в подальшому дозволять уточнити розрахунки довговічності цементобетонного покриття.

Міра пошкоженості цементобетонного покриття від усадки бетону при тужавінні та твердінні без можливості коробитися з урахуванням залежності:

$$M_{yca0}(t) = \int_0^{t_p} \frac{\sigma_{yca0}(t, y, W)^{b_{yca0}}}{B_{yca0}} dt, \quad (24)$$

де b_{yca0}, B_{yca0} — параметри функції довговічності цементобетону після усадки бетону;
 $\sigma_{yca0}(t, y, W)$ — напруження в цементобетонні від усадки бетону при тужавінні, в залежності від вологості (W) часу (t) спостереження та початкової товщини шару (y) МПа;

буде мати такий вид (25):

$$M_{\text{усад}}(t) = \int_0^{t_p} \left[\frac{\alpha \cdot E \cdot t \cdot (m - m_1)}{1 - \mu} \cdot \left(\frac{y}{h} - 0,5 \right) + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m + m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \times \right. \\ \left. \times \left\{ \sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - \frac{2}{\pi \cdot n} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \times \right. \\ \left. \times e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1}{\pi \cdot n} \right\} + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m - m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left(\sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right) \right] dt. \quad (25)$$

Міра пошкодженості цементобетонного покриття від усадки цементобетону при тужавінні та твердінні із можливістю коробитися з урахуванням залежності (24) буде мати такий вид:

$$M_{\text{усад}}(t) = \int_0^{t_p} \left[\frac{\alpha \cdot E \cdot t \cdot (m - m_1)}{1 - \mu} \cdot \left(\frac{y}{h} - 0,5 \right) + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m + m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \times \right. \\ \left. \times \left\{ \sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - \frac{2}{\pi \cdot n} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \times \right. \\ \left. \times \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1}{\pi \cdot n} \right\} + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m - m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left(\sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right) - \right. \\ \left. \frac{12 \cdot (1 - C_x) \cdot \left(\frac{h}{2} - z \right) \cdot \alpha \cdot E}{(1 - \mu)} \cdot \left[-\frac{h^2 \cdot t \cdot (m - m_1)}{12} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{h^4}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \left\{ \frac{m}{\pi \cdot n} \right\} + \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{h^4}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} - \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} - \frac{2 \cdot m_1 \cdot (-1)^n}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1 \cdot (-1)^n}{\pi \cdot n} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} \right] \right] dt. \quad (26)$$

Висновки

У зв'язку зі збільшенням інтенсивності руху на автомагістралях і кількості важких автомобілів в транспортному потоці пред'являються підвищені вимоги до міцності і довговічності покриттів, безпеки руху транспортних засобів і їх мінімального впливу на навколишнє середовище. Найбільшою мірою цим вимогам відповідають цементобетонні покриття.

Огляд чинних нормативних документів у галузі будівництва, споруди транспорту, мости та труби показав, що з влаштування автодорожнього покриття на проїзній частині залізобетонних мостів не має чітких рекомендацій чи вимог з підбору цементної суміші, виду армування (арматурна сітка, фібра тощо), призначення товщини покриття, влаштування водовідводу тощо.

На сьогоднішній день відсутні рекомендації з проектування та влаштування цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів, а

також альбом типових рішень таких конструкцій. Тому, розроблення методичних рекомендації з проектування і влаштування цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів та альбом типових рішень таких конструкцій є актуальним та необхідним питанням.

Список літератури

1. Давиденко О. О. Моделювання життєвого циклу автодорожніх мостів: дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2017. 170 с.
2. ДБН В.2.3-14:2006. Мости і труби. Правила проектування. Київ, 2006. 217 с. (Інформація та документація).
3. ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012. Споруди транспорту. Настапова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ, 2012. 116 с. (Інформація та документація).
4. Дмитрієв М. М. Авіаційне будівельне матеріалознавство: навч. посіб. Київ : НТУ, 2016. 258 с.
5. Лучко Й. Й., Коваль П. М., Корнієв М. М., Лантух-Лященко А. І., Хархаліс М. Р. Мости: конструкції та надійність. Львів : Каменяр, 2005. 989 с.
6. Онищенко А. М., Кузьмінець М. П., Невінгловський В. Ф., Гаркуша М. В. Теоретичні та практичні дослідження ресурсу асфальтобетонного покриття на залізобетонних транспортних спорудах : монографія. Київ. НТУ, 2015. 323 с.
7. Онищенко А. Н. Причины образования колеи на асфальтобетонном покрытии автодорожных мостов и способы повышения колеестойкости. *Дорожная техника*. 2013. С. 134–144.
8. Онищенко А. М. Наукові основи підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах: дис. ... д-ра техн. наук. Київ, 2017. 394 с.
9. ДБН В.2.3-22:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування. Київ, 2009. 42 с. (Інформація та документація).
10. Руфферт Г. Дефекты бетонных конструкций. Москва : Стройиздат, 1987. 111 с.
11. Коваль П. М. Характеристика технічного стану існуючих мостів України. *Дороги і мости*. 2003. Вип. 1. С. 15–22.
12. Руденко Ю. Д. Разработать и внедрить ремонтные конструкции городских мостов УССР и методы их эксплуатационной оценки с учетом остаточного ресурса. *Отчет о НИР КАДИ*. Киев, 1988. 137 с.
13. Юйлинь Хэ, Цзиньхань Лю, О. В. Чемакина, А. А. Белятинский, В. Н. Першаков, И. А. Мартыненко. Исследование факторов влияния механических свойств цементного раствора с резиновым порошком на основе текучести. *Проблеми розвитку міського середовища*. 2018. Вип. 2. С. 157–178. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Prms_2018_2_19 (дата звернення: 02.02.2021).
14. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. 1993. 624 p. (Інформація та документація).
15. Energy conservation potential in the cement industry. Washington. 1975. 309 p.
16. Slansky B. (2010). Contribution to durability extension and safety improvement of bridges by using of cement concrete pavement (Unpublished Doctoral dissertation). Technical University Ostrava. Ostrava. Czechia.
17. Wiss Janney (2017). Investigation of Bridge Decks. *Final report*. Montana department of transportation. Montana.
18. Bieliatynskiy A., Krayushkina E., Skrypchenko A. Modern Technologies and Materials for Cement Concrete Pavement's Repair. *9th International Scientific Conference Transbaltica 2015 (May 7–8, 2015)*. Vilnius. 2016. P. 344-347. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.017> (дата звернення: 02.02.2021).
19. Гамеляк І. П., Дмитриченко А. М. Математична модель оцінки ефективності використання високоміцного цементобетону для дорожніх та аеродромних покриттів. *Автошляховик України*. 2015. № 1-2. С. 75-80. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2015_1-2_23 (дата звернення: 02.02.2021).
20. Гамеляк І. П. Про ефективність використання високоміцного цементобетону для будівництва жорстких покриттів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2011. Вип. 81. С. 30-39. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/adidb_2011_81_8 (дата звернення: 02.02.2021).
21. Дмитриченко М. Ф., Дмитрієв М. М., Папченко О. М., Павлюк Д. О., Рутковська І. А. Проектування аеропортів : підручник. Київ, 2010. 244 с.
22. Коваль, П. М., Колесник, Д. Ю., Фаль, А. Е., Шашук, П. М. Вплив захисних олігоорганосилоксанових покриттів на сульфатостійкість цементобетонів. *Дороги і мости*. Київ, с. 270-276.

23. Солодкий С. Й., Думич І. Ю. Вплив типу основи на витривалість монолітних цементобетонних дорожніх покриттів. *Автошляховик України*. 2014. № 2. С. 23–26. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2014_2_8 (дата звернення: 02.02.2021).
24. Солодкий С. Й., Думич І. Ю. Деякі аспекти конструювання монолітних цементобетонних дорожніх покриттів за критерієм динамічної стійкості. *Автошляховик України*. 2015. № 1-2. С. 81–83. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2015_1-2_24 (дата звернення: 02.02.2021).
25. Солодкий С. Й., Томачев С. М. Зміна тріщиностійкості дорожнього бетону в експлуатаційній стадії. *Вісник ОДАБА*. Одеса, 2014. № 55. С. 230–235.
26. Солодкий С.Й., Русин Р.М. Модифіковані бетони на композиційних цементах для влаштування жорстких дорожніх одягів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ, 2004. Вип.72. С.89–94.
27. Чистяков В. В., Шургая А. Г., Дорошенко Ю. М., Чиженко Н. П., Кабусь А. В., Коваль Л. П. *Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка*. 2012. Вип. 43. С. 212–216. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/bmvs_2012_43_38 (дата звернення: 02.02.2021).
28. Чистяков В. В., Шургая А. Г., Дорошенко Ю. М., Чиженко Н. П. Цементобетони для покриття доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2012. Вип. 85. С. 48–55. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/adidb_2012_85_9 (дата звернення: 02.02.2021).
29. Солодкий С. Й. Наукові засади підвищення тріщиностійкості дорожнього цементного бетону: дис. ... д-ра техн. Наук. Львів, 2009. 327 с.
30. ДСТУ-Н Б EN 1990:2008. Єврокод. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT). Київ, 2012. 116 с. (Інформація та документація).
31. ДСТУ-Н Б EN 1992-2:2012. Частина 2. Залізобетонні мости. Правила проектування (EN 1992-2:2005, IDT). Київ, 2012. 140 с. (Інформація та документація).
32. ДБН В.2.3-6:2009. Мости та труби. Обстеження і випробування. Київ, 2006. 63 с. (Інформація та документація).
33. Control of cracking in concrete structures. *ACI Committee 224 (1990)*. Detroit. ACI 224 R-90.
34. Probabilistic Model Code. 12-th draft. *Joint Committee on Structural Safety. PART I. BASIS OF DESIGN*. Zurich. JCSS-OSTI/DIA/VROC–10.11.2000, ETH . 64 p.
35. Melchers R.E. *Structural Reliability Analyses and Prediction*. New York: John Wiley & Sons, 1999. 437 p.
36. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. Москва: Стройиздат, 1971. 255 с.
37. Miner M.A. Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics*. 1945. Vol. 12. No. 3. P. 159–164.
38. Чирков В.П. Вероятностные методы расчета мостовых железобетонных конструкций. Москва: Транспорт, 1980. 133 с.
39. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ, 2016. 104 с. (Інформація та документація).
40. ГБН В.2.3-37641918-557:2016 Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування. Київ, 2016. 75 с. (Інформація та документація).
41. Онищенко А.М., Лапченко А.С., Чиженко Н.П. Оцінка напружень від усадки в цементобетонному покритті автомобільних доріг. *Вісник НУЛП, серія «Теорія та практика будівництва»*. 2019. № 912. С.132–138.

References

1. Davydenko O. O. Modelyuvannya zhyttyevoho tsykladu avtodorozhnikh mostiv [Modeling of the life cycle of road bridges] : thesis (PhD). Kyiv, 2017. 170 p. [in Ukrainian].
2. DBN V.2.3-14:2006 Mosti i truby. Pravylya proektuvannya [State Building Norms (DBN V.2.3-14:2006) Bridges and pipes. Design rules]. Kyiv, 2006. 217 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
3. DSTU-N B.V.2.3-23:2012 Sporudy transportu. Nastanova z otsinky ta prohnovuvannya tekhnichnoho stanu avtodorozhnikh mostiv [State Standard of Ukraine (DSTU-N B.V.2.3-23:2012) Transport facilities. Guidelines for assessing and forecasting the technical condition of road bridges]. Kyiv, 2012. 116 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

4. Dmytriiev M. M. *Aviatsiynе budivel'ne materialoznavstvo* [Aviation construction materials science]: textbook. way. Kyiv: NTU, 2016. 258 p. [in Ukrainian].
5. Luchko Y. Y., Koval P. M., Korniyev M. M., Lantukh-Lyashchenko A. I., Kharkhalis M. R. *Mosty: konstruktsiyi ta nadiynist'* [Bridges: structures and reliability]. Lviv: Kamenyar, 2005. 989 p. [in Ukrainian].
6. Onyshchenko A. M., Kuzminets M. P., Nevinhlovskyy V. F., Harkusha M. V. *Teoretychni ta praktychni doslidzhennya resursu asfaltobetonnoho pokryttya na zalizobetonnykh transportnykh sporudakh* [Theoretical and practical research of the resource of asphalt concrete coating on reinforced concrete transport structures]: monograph. Kyiv. NTU, 2015. 323 p. [in Ukrainian].
7. Onyshchenko A. N. *Prychyny osvity koleyi na asfaltobetonnomu pokrytti avtodorozhnykh mostiv ta sposoby pidvyshchennya rivnyia koleyestiykosti* [The reasons for the formation of track on the asphalt pavement of road bridges and ways to increase track resistance]. *Road equipment*. 2013. P. 34–144 [in Russian].
8. Onyshchenko A. M. *Naukovi osnovy pidvyshchennya stiykosti asfal'tobetonnoho pokryttya do utvorennia kolyi na avtodorozhnykh mostakh* [Scientific bases of increase of stability of an asphalt concrete covering to formation of a track on highway bridges] : thesis (D.Sc.). Kyiv, 2017. 394 p. [in Ukrainian].
9. *DBN B.2.3-22:2009 Sporudy transportu. Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannya* [State Building Norms (DBN V.2.3-22:2009) Transport facilities. Bridges and pipes. Basic design requirements]. Kyiv, 2009. 42 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
10. Ruffert H. *Defekty betonnykh konstruktsiy* [Defects of concrete structures]. Moscow: Stroyizdat, 1987. 111 p. [in Russian].
11. Koval P. M. *Kharakterystyka tekhnichnoho stanu isnuuyuchykh mostiv Ukrayiny* [Characteristics of the technical mill of the existing bridges of Ukraine]. *Roads and bridges*. 2003. Iss. 1. P. 15–22 [in Ukrainian].
12. Rudenko Yu. D. *Rozrobyty ta vprovadyty remontni konstruktsiyi miskykh mostiv URSR ta metody yikh ekspluatatsiyanoi otsinky z uchtom zalyskovoho resursu (Otchet o NYR)* [To develop and introduce repair structures for city bridges of the Ukrainian SSR and methods of their operational assessment, taking into account the residual resource]. R&D report CADI. Kyiv, 1988. 137 p. [in Russian].
13. Khe Yuylyn, Liu Jinhan, Chemakina O.V., Belyatinsky A.A., Pershakov V.N., Martynenko I.A. *Doslidzhennya faktoriv vplyvu mekhanichnykh vlastyvostry tsementnoho rozchynu z rezynovym poroshkom na osnovi potochnykh perevirok* [Investigation of factors of influence of mechanical properties of cement mortar with rubber powder based on fluidity]. *Problems of urban environment development*. 2018. Iss. 2. P. 157–178. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Prms_2018_2_19 (Last accessed: 02.02.2021) [in Russian].
14. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. 1993. 624 p. (Information and documentation) [in English].
15. *Energy conservation potential in the cement industry*. Washington. 1975. 309 p. [in English].
16. Slansky B. (2010). *Contribution to durability extension and safety improvement of bridges by using of cement concrete pavement* (Unpublished Doctoral dissertation). Technical University Ostrava. Ostrava. Czechia [in English].
17. *Wiss Janney (2017). Investigation of Bridge Decks. Final report*. Montana department of transportation. Montana [in English].
18. Bieliatynskiy A., Krayushkina E., Skrypchenko A. *Modern Technologies and Materials for Cement Concrete Pavement's Repair. 9th International Scientific Conference Transbaltica 2015* (May 7–8, 2015. Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania). Vilnius. 2016. P. 344–347. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.017> [in English].
19. Hamelyak I. P., Dmytrychenko A. M. *Matematychna model otsinky efektyvnosti vykorystannya vysokomitsnoho tsementobetonu dlya dorozhnykh ta aerodromnykh pokryttiv* [Mathematical model for evaluating the effectiveness of high-strength cement concrete for road and airfield coatings]. *Motorway of Ukraine*. 2015. № 1-2. P. 75–80. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2015_1-2_23 (Last accessed: 02.02.2021) [in Ukrainian].
20. Hamelyak I. P. *Pro efektyvnist vykorystannya vysokomitsnoho tsementobetonu dlya budivnytstva zhorstkykh pokryttiv* [About efficiency of use of high-strength cement concrete for construction of rigid coverings]. *Automobile roads and road construction*. 2011. 81. P. 30–39. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/adidb_2011_81_8 (Last accessed: 02.02.2021) [in Ukrainian].
21. Dmytrychenko M. F., Dmytriiev M. M., Papchenko O. M., Pavlyuk D. O., Rutkovska I. A. *Proektuvannya aerortiv* [Design of airports]: a textbook. Kyiv, 2010. P. 244. [in Ukrainian].
22. Koval P. M.; Kolesnyk D. Yu.; Fal A. E.; Stashuk P. M. *Vplyv zakhysnykh olihoorhanizoloksanovykh*

pokryttiv na sul'fatostiykist' tsementobetoniv [Influence of protective oligoorganosiloxane coatings on sulphate resistance of cement concrete]. *Roads and bridges*. Kyiv, P. 270–276. [in Ukrainian].

23. Solodkyy S. Y., Dumych I. Yu. Vplyv typu osnovy na vytryvalist monolitnykh tsementobetonnykh dorozhnikh pokryttiv [Influence of the base type on the durability of monolithic cement-concrete pavements]. *Motorway of Ukraine*. 2014. № 2. P. 23–26. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2014_2_8 (Last accessed: 02.02.2021) [in Ukrainian].

24. Solodkyy S. Y., Dumych I. Yu. Deyaki aspekty konstruyuvannya monolitnykh tsementobetonnykh dorozhnikh pokryttiv dlya kryteriyem dynamichnoyi stiykosti [Some aspects of construction of monolithic cement-concrete road coverings by the criterion of dynamic stability]. *Avtoshlyakhovyk Ukrainy*. 2015. № 1-2. P. 81–83. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2015_1-2_24 (Last accessed: 02.02.2021) [in Ukrainian].

25. Solodkyy S. Y., Tomachev S. Y. Zmina tryvozhnosti dorozhn'oho betonu v sluzhbovii stadii [Change of crack resistance of road concrete in the operational stage]. *Bulletin of ODABA*. Odesa, 2014. № 55. P. 230–235 [in Ukrainian].

26. Solodkyy S. Y., Rusyn R. M. Modyfikovani betony na kompozytsiynykh tsementakh dlya rehulyuvannya zhorstkykh dorozhnikh odyahiv [Modified concretes on composite cements for the device of rigid pavements]. *Motor roads and road construction*. Kyiv, 2004. Issue 72. P. 89–94 [in Ukrainian].

27. Chystyakov V. V., Shurgaya A. G., Doroshenko Yu. M., Chizhenko N. P., Kabus A. V., Koval L. B. Modyfikovani tsementobetonny dlya pokryttya dorih [Modified cement concrete for road surface]. *Building materials, products and sanitary ware*. 2012. 43. P. 212–216. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/bmvs_2012_43_38 (Last accessed: 02.02.2021) [in Ukrainian].

28. Chystyakov V. V., Shurgaya A. G., Doroshenko Yu. M., Chizhenko N. P. Tsementobetonni dlya pokryttya dorih [Cement concrete for road coverings]. *Motor roads and road construction*. 2012. (85). P. 48–55. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/adidb_2012_85_9 (Last accessed: 02.02.2021) [in Ukrainian].

29. Solodkyy S. Y. Naukovi zasady pidvyshchennya tryvalosti dorozhn'oho tsementnoho betonu [Scientific principles of increasing the crack resistance of road cement concrete]: thesis (D.Sc.). Lviv, 2009. 327 p. [in Ukrainian].

30. DSTU-N B EN 1990:2008 Yevrokod. Osnovy proektuvannya konstruksiy (EN 1990:2002, IDT) [State Standard of Ukraine (DSTU-N B EN 1990:2008) Eurocode. Fundamentals of structural design (EN 1990:2002, IDT)]. Kyiv, 2012. 116 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

31. DSTU-N B EN 1992-2:2012 Chastyna 2. Zalizobetonni mosty. Pravyla proektuvannya (EN 1992-2: 2005, IDT) [State Standard of Ukraine (DSTU-N B EN 1992-2:2012) Part 2. Reinforced concrete bridges. Design rules (EN 1992-2: 2005, IDT)]. Kyiv, 2012. 140 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

32. DBN B.2.3-6:2009 Mosty ta truby. Obstezhennya ta vyprobuvannya [State Building Norms (DBN B.2.3-6: 2009) Bridges and pipes. Examinations and tests] Kyiv, 2006. 63 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

33. ACI Committee 224 (1990). Control of cracking in concrete structures. ACI 224 R-90, American Concrete Institute, Detroit [in English].

34. Probabilistic Model Code. 12-th draft. Joint Committee on Structural Safety. PART I. BASIS OF DESIGN. JCSS-OSTI/DIA/VROC–10.11.2000, ETH Zurich, 64 p. [in English].

35. Melchers R. E. Structural Reliability Analyses and Prediction. New York: John Wiley & Sons, 1999. 437 p. [in English].

36. Bolotin V. V. Pryminennya metodiv teorii virohidnosti ta teorii nadiynosti v rozsylkakh sooruzhen [Application of methods of probability theory and reliability theory in the calculations of structures]. Moscow: Stroyizdat, 1971. 255 p. [in Russian].

37. Miner M. A. Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics*. 1945. Vol. 12. No. 3. P. 159–164 [in English].

38. Chyrkov V. P. Veroyatnostnye metody rascheta mostovykh zhelezobetonnykh konstruksiy [Probabilistic methods of calculation of bridge reinforced concrete structures]. Moscow: Transport, 1980. 133 p. [in Russian].

39. DBN V.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannya. Chastyna II. Budivnytstvo [State Building Norms (DBN V.2.3-4:2015) Highways. Part I. Design. Part II. Building]. Kyiv, 2016. 104 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

40. HBN V.2.3-37641918-557:2016 Avtomobilni dorohy. Dorozhniy odyah zhorstkyy. Proektuvannya.

[Industry Building Norms (GBN V.2.3-37641918-557:2016) Roads. Road clothes are hard. Designing] Kyiv, 2016. 75 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

41. Onyshchenko A.M., Lapchenko A.S., Chyzenko N.P. Otsinka napruzheniya vid usadok u tsementobetonnomu pokrytti avtomobilnykh dorih [Estimation of shrinkage stresses in cement-concrete pavement of highways]. *Bulletin of NULP, series "Theory and Practice of Construction"*. 2019 (912). P. 132–138. [in Ukrainian].

Artur Onyshchenko¹, D.Sc., Associate Prof., <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

Mykola Harkusha¹, Ph.D., Associate Prof., <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>

Oleksandr Davydenko¹, Ph.D., Associate Prof., <https://orcid.org/0000-0003-0176-3256>

Sergii Tsepelev¹, <https://orcid.org/0000-0001-7232-4651>

Oleg Fedorenko², <https://orcid.org/0000-0003-3628-4298>

¹ National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

² State Agency of Motor Roads of Ukraine (Ukravtodor), Kyiv, Ukraine

PROSPECTS OF APPLICATION OF CEMENT CONCRETE COATING ON TRANSPORT BUILDINGS

Abstract

Introduction. Road bridges are an integral part of the road network of transport infrastructure of Ukraine. The technical condition of the vast majority of road bridges does not meet modern requirements for road safety and structural reliability of structural elements.

Problems. There are no recommendations for the design and installation of cement-concrete pavement on the reinforced concrete slab of the carriageway of road bridges, as well as an album of standard solutions of such structures.

Goal. Analysis of the causes and types of cracking on cement concrete pavement, technical literature and current regulations on the calculation of crack resistance and durability of cement concrete pavement on the reinforced concrete slab of the carriageway of road bridges.

Results. The analysis of application of a cement concrete covering on transport constructions is carried out. The causes and types of crack formation on cement-concrete pavement are established. The analysis of technical literature and current normative documentation on calculation of crack resistance and durability of cement concrete pavement on the reinforced concrete slab of road bridges is carried out.

Conclusions. The analysis of prospects of application of a cement concrete covering on transport constructions is carried out in work.

Keywords: road bridge, durability, reinforced concrete slab, crack formation, carriageway, crack resistance, cement concrete pavement