https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.078

УДК 625.745.1:691

[1]**Зеленовський В. А.,** *https://orcid.org/0000-0001-5834-5456*
[1]**Копинець І. В.,** *https://orcid.org/0000-0002-0908-4795*
[2]**Онищенко А. М.,** *д-р техн. наук, професор, https://orcid.org/0000-0002-1040-4530*

[1]*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна (ДП «ДержДорНДІ»), м. Київ, Україна*
[2]*Національний транспортний університет, м. Київ, Україна*

ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ЕПОКСИАСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ НА АВТОДОРОЖНІХ МОСТАХ

Анотація

Вступ. Надано аналіз останніх досліджень щодо попередження утворення дефектів асфальтобетонних покриттів на автодорожніх мостах та подовження термінів їх експлуатаційного періоду. Визначено перспективу застосування в Україні асфальтобетонних покриттів з асфальтобетону модифікованого термореактивними полімерами. Сформульовано задачі дослідження.

Проблематика. Відсутність достатнього досвіду застосування епоксиасфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах України та невизначеність економічної доцільності його застосування.

Мета роботи. Виконати аналіз існуючого досвіду застосування асфальтобетонного покриття з асфальтобетону, модифікованого термореактивними полімерами, для підвищення його довговічності на автодорожніх мостах.

Матеріали і методи. Аналіз інформаційних джерел щодо застосування епоксиасфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах. Аналітичні дослідження асфальтобетонних сумішей, модифікованих епоксидними складовими.

Результати. Визначено перспективні напрями покращання якості покриттів на автодорожніх мостах, підвищення їх працездатності та довговічності. Проведено аналітичний огляд досвіду застосування епоксиасфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах. Вивчено питання модифікації бітумної основи асфальтобетонних сумішей епоксискладовими з метою поліпшення їх технічних характеристик. Встановлено перспективну економічну ефективність застосування епоксиасфальтобетонних сумішей в Україні. Сформульовані задачі подальшого дослідження епоксиасфальтобетонного покриття при його застосуванні на автодорожніх мостах.

Висновки. Аналіз інформаційних джерел щодо застосування епоксиасфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах показав економічну та технічну доцільність застосування цих покриттів, оскільки у порівнянні із покриттями з асфальтобетонів стандартного складу (без модифікаторів) вони мають значні переваги; введення у бітум епоксискладових від 5,0 % до 20,0 % призводить до суттєвого підвищення міцності та теплостійкості епоксиасфальтобетону за всіх температур. Впровадження епоксиасфальтобетонів дозволяє підвищити якість та довговічність покриттів на автодорожніх мостах, а також значно скоротити витрати на ремонтні роботи.

Ключові слова: епоксиасфальтобетонна суміш, асфальт, модифікація бітуму, довговічність дорожнього покриття.

Вступ

Актуальність поставленої проблеми. Транспортно-експлуатаційний стан переважної більшості автодорожніх мостів в Україні, як і в ряді інших країн східної Європи, не відповідає сучасним світовим вимогам дорожнього руху і потребує поліпшення з урахуванням соціально економічних потреб держави. На автомобільних дорогах загального користування в Україні експлуатується близько 16150 автодорожніх мостів [1]. Переважна їх більшість має залізобетонну плиту проїзної частини з асфальтобетонним покриттям. Останніми роками у зв'язку із зростанням параметрів транспортних навантажень та під дією аномально високих літніх температур асфальтобетонне покриття автодорожніх мостів досить швидко втрачає несну здатність. Значного розповсюдження набули дефекти у вигляді:

- колії (деформація поперечного профілю дорожнього полотна уздовж лінії накату);
- викришування (порушення цілісності покриття за рахунок випадання частин мінерального матеріалу);
- розкритих тріщин (лінійні пошкодження з шириною розриву більше 3 мм);
- лущення (послідовне руйнування поверхні в результаті відшаровування тонких частинок матеріалу);
- вибоїн (дефекти у формі поглиблень з різко позначеними краями);
- поодиноких тріщин або сітки тріщин (поздовжні, перетині, поперечні розриви, хаотично розташовані на поверхні покриття без будь-якої закономірності).

У результаті, необхідно виконувати відновлення покриттів на автодорожніх мостах з підвищеною періодичністю або виконувати передчасні ремонти. Це, в свою чергу, вимагає залучення додаткових вагомих витрат, а також створює значні труднощі у русі транспортних засобів під час усунення дефектів.

Одним з найважливіших факторів, що впливає на знижений терміни служби покриттів в умовах інтенсивного та вантажонапруженого руху транспорту є бітуми з недостатньо якісними властивостями. У порівнянні з іншими дорожньо-будівельними матеріалами бітуми є найбільш чутливими до дії транспортних навантажень та впливу погодно-кліматичних факторів. Бітум як термопластичний матеріал розм'якшується при підвищених температурах та стає крихкими при низьких, що призводить до утворення на покриттях мостів зазначених вище дефектів.

Аналіз останніх досліджень. Сьогодні в Україні реальні строки служби асфальтобетонного покриття на мостах становлять 6-12 років замість нормативних 15-20 років. Передчасні ремонти та відновлення цих покриттів вимагають багатомільйонних додаткових витрат, які можна було б спрямувати на будівництво нових або ремонт та реконструкцію існуючих мостів. Одним з вирішальних факторів, що впливає на терміни служби покриттів в умовах інтенсивного та вантажонапруженого транспортного руху, є властивості бітумів.

З усіх дорожньо-будівельних матеріалів бітуми є найбільш чутливими до дії транспортних навантажень та впливу погодно-кліматичних факторів. Бітум за високих літніх температур розм'якшується, що призводить до утворення колій, зсувів, напливів. За низьких зимових температур він стає крихким та жорстким, що при низькотемпературному стисканні асфальтобетонного покриття обумовлює появу поперечних тріщин. Низька міцність бітуму є причиною того, що внаслідок тривалої дії транспорту та постійних розтягувальних напружень на покриттях виникають хаотичні «втомні» тріщини. Недостатнє прилипання (адгезія) бітуму до поверхні кам'яного матеріалу призводить до появи на покриттях лущення, вибоїн та викришування [2].

Зважаючи на вищевикладене, направлена зміна властивостей бітуму є найбільш ефективним способом підвищення працездатності та довговічності дорожнього покриття на автодорожніх мостах. Найбільш ефективним напрямком підвищення довговічності

асфальтобетонного покриття є зміна поведінки бітуму шляхом модифікації різними видами добавок: полімерними, адгезійними (катіонними поверхнево-активними речовинами), восками, гумовою крихтою тощо [3].

Дорожній бітум як один із основних компонентів асфальтобетону, що виготовляється на заводах України, має низьку корозійну стійкість, що призводить до виникнення на поверхні покриття вищезазначених дефектів. Серед усіх відомих модифікаторів найменш дослідженими є термореактивні полімери, зокрема епоксидні смоли та затверджувачі до них (епоксискладові). Разом з цим, аналіз досліджень, які були проведені на сьогоднішній день, вказують на те, що епоксискладові можуть докорінно змінювати властивості бітумів та асфальтобетонів, і ефект від їх застосування може бути значно вищим ніж у інших модифікаторів [3, 4].

Отже, альтернативним рішенням з покращання якості бітумів є модифікація їх відповідними термореактивними полімерами, які здатні забезпечити додаткову гнучкість при низьких температурах і додаткове зчеплення для сприйняття напружень.

В країнах західної Європи, Китаю, США та Австралії спостерігається значний інтерес до використання в ролі модифікаторів – термореактивних полімерів (зокрема епоксидних смол). Асфальтобетонні суміші різних видів, до складу яких входять епоксидні смоли, отримали назву «Епоксиасфальтобетони».

Враховуючи те, що вітчизняні дорожні бітуми суттєво відрізняються якісними характеристиками від тих, що використовуються у країнах з добре розвиненою інфраструктурою, постало питання вивчення впливу таких модифікаторів на властивості дорожніх бітумів, що застосовуються в Україні. Окрім цього в Україні відсутня чітка адаптована технологія влаштування епоксиасфальтобетонних покриттів, відсутні конкретні параметри щодо виробництва епоксиасфальтобетонних сумішей, а також недостатня кваліфікація спеціалістів, які б вільно володіли цими питаннями. Це все спонукає до проведення додаткових досліджень.

До цього часу, не зважаючи на широке застосування термореактивних полімерів у світі, в Україні такі дослідження проведені в недостатній кількості, а також враховуючи, що їх використання повинно призначатись на основі окремих фізико-механічних показників – не має можливості пересвідчитись в доцільності їх застосування [3]. Щоб наблизитись до вирішення цього питання, було проведено аналіз вітчизняного та світового досвіду застосування епоксиасфальтобетонних покриттів на автодорожніх мостах.

Вивченням епоксиасфальтобетону займаються такі провідні наукові центри, як: BASt (Німеччина), TRL (Велика Британія), LCPC (Франція), OPUS (Нова Зеландія), Turner Fairbank Highnay Research Center (США) тощо.

За їхніми даними при заміні (20-35) % бітуму епоксискладовою спостерігається значне поліпшення показників міцності асфальтобетонного покриття, особливо при підвищених температурах, в 2-3 рази збільшується його опір колієутворенню без погіршення при цьому низькотемпературної поведінки [2]. Характерно-якісною рисою епоксиасфальтобетону є здатність набирати міцність протягом тривалого періоду експлуатації. Крім того, епоксиасфальтобетон відзначається уповільненим старінням під впливом погодно-кліматичних факторів та стійкістю до дії паливно-мастильних матеріалів, що також дасть можливість значно підвищити строк служби покриттів на його основі [2].

Конструкція дорожнього одягу на залізобетонній плиті проїзної частини моста повинна визначатись проектом та включати в себе, як правило: бетонний вирівнювальний шар; гідроізоляцію; бетонний захисний шар (при необхідності); двошарове асфальтобетонне покриття. Конструкція дорожнього одягу на плиті проїзної частини з використанням епоксиасфальтобетону, враховуючи його захисні гідрофільні властивості, виключає необхідність влаштування гідроізоляції та відповідно бетонного захисного шару, що дає можливість зберегти ресурси при будівництві.

Вартість асфальтобетонних сумішей, модифікованих термореактивними полімерами, звичайно вища у порівнянні із звичайними асфальтобетонними сумішами, але, враховуючи ряд факторів, які впливають на вартість кінцевого продукту, таких як збільшений тривалий строк служби покриття або економія матеріалів при укладанні, обумовлює високу рентабельність його застосування [5].

Мета роботи. Виконати аналіз існуючого досвіду застосування асфальтобетонного покриття з асфальтобетону, модифікованого термореактивними полімерами для підвищення його довговічності на автодорожніх мостах.

Виклад основного матеріалу дослідження

Епоксидні смоли являють собою олігомери, що містять епоксидні групи, які здатні під дією затверджувачів утворювати зшиті полімери. Найбільш поширені епоксидні смоли – продукти поліконденсації епіхлоргідрину з фенолами, найчастіше – з бісфенолом А [2].

Поєднуючи різноманітні смоли і затверджувачі, можна отримати матеріали, які будуть мати різні властивості, від гумоподібних до жорстких і твердих, що перевершать навіть сталь за міцнісними характеристиками. На сьогоднішній день епоксидна смола, властивості якої перевершують характеристики всіх інших матеріалів на основі синтетичних смол, використовується в усіх галузях промисловості.

Найбільш універсальним і надійним клеєм вважається саме епоксидний. Завдяки його міцності та хорошій адгезії клейового з'єднання, він однаково добре склеює як взуття, так і деталі літаків. Епоксидна смола використовується, як просочувальний матеріал для склонитки і склотканини, для виготовлення склопластиків, які застосовують у кораблебудуванні, будівництві, літакобудуванні, виготовленні машинних деталей та ін [6].

Крім того, така смола входить до складу покриття для гідроізоляції та хімічно стійких покриттів, а також в фарби для внутрішніх і зовнішніх робіт, гідроізолювальні зміцнювальні просочення для дерева, бетону та інших пористих матеріалів. Останнім часом епоксидні смоли знаходять застосування в дорожньому будівництві [6].

В рамках реалізації міжнародного проекту Economic Evaluation of Long Pavements, що виконувався під егідою Спільного OECD/ECMT Центру транспортних досліджень, доведено економічну доцільність використання на ділянках автомобільних доріг з високою інтенсивністю руху дорожнього покриття з епоксиасфальтобетону, яке має набагато довший термін експлуатації (до 40 років) і практично не потребує витрат на ремонт та утримання.

В останні два десятиліття епоксиасфальтобетон знайшов широке застосування в якості покриття товщиною приблизно 50 мм на мостах по всьому світу, особливо в Східній Азії. Зокрема, епоксиасфальтобетон влаштовано в якості покриття на мостах Sutong (найдовший вантовий міст в Китаї), Xihoumen (висячий міст в Китаї) та Oakland Bay Bridge (висячий міст в США). При влаштуванні таких покриттів було проведено багато попередніх досліджень, вирішено ряд складних проблем влаштування такого дорожнього покриття та витрачено значні зусилля для того, щоб мати можливість скористатись унікальними властивостями епоксискладових [7].

За останні роки велика кількість дослідження і технічні документи були опубліковані з різних аспектів застосування щільних епоксиасфальтобетонних сумішей на мостах у якості покриття, що стосуються виробництва цих сумішей, механічного аналізу епоксиасфальтобетону, структурного аналізу, оцінки ефективності та методів технічного обслуговування. Інженери мають досвід успішного застосування унікальних властивостей епоксидної смоли для вирішення складних проблем дорожнього покриття на мостах. Але тим не менш питання з системного застосування цього матеріалу у мостовому будівництві ще досі потребує глибокого вивчення та вдосконалення.

Для вирішення проблем недостатніх технічних характеристик асфальтобетонних покриттів на аеродромах, які могли б забезпечити стійкість до великих навантажень, до високих температур і ерозійного впливу, перше покоління епоксиасфальтобетону було розроблено «Shell Oil Co», з торговою маркою «EPON» [5].

Покриття влаштоване з використанням цього нового в'яжучого не схильне до утворення колії, рух по ньому може бути відкритим вже через дві години і є стійким до дії агресивних середовищ. Розроблений новий вид асфальтобетону отримав назву «Shell Epoxy Asphalt» [5].

Епоксиасфальтобетон – гарячий асфальтобетон, виготовлений із застосуванням в'яжучого, що модифіковане великим вмістом епоксидної смоли та затверджувача [2]. Під час вироблення асфальтобетонної суміші епоксидна смола та затверджувач змішуються, і відбувається хімічна реакція, наслідком якої є створення жорсткої полімерної сітки. Результатом реакції є незворотне твердіння в'яжучого (термозатвердівання). При низьких температурах реакція проходить повільно, а при підвищенні температури вона значно прискорюється. Таким чином, температура навколишнього середовища визначає час, за який суміш залишається пластичною і може бути укладена в покриття.

Зважаючи на властивості бітумів та епоксидних смол, вміст останніх значно перевищує вміст термопластичних полімерів і складає від 20 % до 35 % від маси в'яжучого. Характеристики бітумно-епоксидного в'яжучого після полімеризації настільки відрізняються від вихідного бітуму, що можна говорити не про поліпшення його якості, а про радикальну зміну властивостей. За даними дослідницького центру компанії «Shell» головними особливостями отриманого бітуму є здатність не розм'якшуватись під дією тепла і не розчинятись в нафтових розчинниках [8]. Типові властивості епоксиасфальтобетону наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Ч.ч.	Найменування показника	Асфальт з епоксискладовою	Звичайний асфальтобетон
1	Стабільність по Маршаллу, кН	45	7,5
2	Текучість по Маршаллу, мм	4,0	4,0
3	Частка Маршалла	11,2	1,9
4	Модуль жорсткості, Н/м, за температури 0 °С	$2{,}0\text{-}10^{10}$	$1{,}510^{10}$
5	Модуль жорсткості, Н/м, за температури 20 °С	$1{,}2\cdot10^{10}$	$3{,}0\cdot10^{9}$
7	Модуль жорсткості, Н/м, за температури 40 °С	$3{,}3\cdot10^{9}$	$4{,}0\cdot10^{8}$
8	Модуль жорсткості, Н/м, за температури 60 °С	$19{,}5\cdot10^{8}$	—
9	Границя втоми при згині (циклів до руйнування при вмісті в'яжучого 6 %)	$1{,}0\cdot10^{6}$	$3{,}0\cdot10^{4}$
10	Границя втоми при згині (циклів до руйнування при вмісті в'яжучого, 7 %)	$> 2{,}0\cdot10^{6}$	$2{,}0\cdot10^{5}$
11	Міцність при стисканні, МН/м (початкова)	16,0	3,7
12	Міцність при стисканні, МН/м (після 7 діб витримки із зануренням в масло	17,0	3,1
13	Міцність при стисканні, МН/м (після 30 діб витримки із зануренням в масло	16,9	2,2
14	Міцність при стисканні, МН/м (після 56 діб витримки із зануренням в масло	17,2	1,8

Результати випробувань в різних країнах світу свідчать, що різниця границі втоми при згині між звичайним асфальтобетоном і епоксиасфальтобетоном є не менше ніж десятикратною. Термореактивний характер в'яжучого виключає утворення на покритті з епоксиасфальтобетону зсувів та колійності.

За економічними показниками бітумно-епоксидне в'яжуче в середньому коштує в 12 разів дорожче звичайного бітуму. Але такі технічні характеристики епоксиасфальтобетону, як межа втоми при згині та залишкова деформація в 10 і більше разів перевищують відповідні показники звичайного асфальтобетону [8]. Таким чином, збільшення строку служби епоксиасфальтобетону робить цей матеріал економічно ефективним для особливо важких умов експлуатації дороги: на автодорожніх мостах, на ділянках автодоріг з високою інтенсивністю руху, перехрестях, вулицях великих міст та місцях концентрації ДТП.

Визначено, що одним з перспективних матеріалів, який може забезпечити строк служби покриттів на мостах з підвищеною довговічністю, є епоксиасфальтобетон. З 1967 року більше 50 000 тон епоксиасфальтобетону було укладено на металеві та бетонні покриття мостів. Одним з перших випадків його застосування було влаштування в 1967 році проїзної частини на ортотропній сталевій прогоновій будові мосту в San Meteo-Hayward через протоку San Francisco. Міст до теперішнього часу знаходиться в задовільному стані. Слід однак зазначити, що внаслідок м'якого клімату (практично без морозів) протиожеледні матеріали не застосовувались [8]. В той же час покриття з епоксиасфальтобетону піддавалось значному ультрафіолетовому опромінюванню.

В результаті досліджень встановлено, що при виробництві епоксиасфальтобетону температурний інтервал нагрівання мінерального матеріалу знаходиться в межах від 143 °С до 150 °С. Нижня температурна границя початку ущільнення становить 82 °С, закінчення – 66 °С. Час транспортування залежить від температури епоксиасфальтобетонної суміші та вантажопідйомності транспорту. При температурі 116 °С допустима тривалість транспортування коливається від 42 хв. до 62 хв. При 127 °С цей інтервал зменшується до (35-43) хв [8].

Одним з наукових центрів, де виконувались дослідження епоксиасфальтобетону, є компанія «Road construction by Scott Wilson» (Нотінгем, Велика Британія). Вивчались два типи епоксиасфальтобетону: НМА – гарячий асфальтобетон та SMA – щебенево-мастиковий асфальтобетон. Епоксив'яжуче складалось з двох частин: А – епоксидна смола та В – бітум разом із затверджувачем. Вміст бітуму у вихідних асфальтобетонах становив 6 %, епоксив'яжучого – 6,3 % від маси мінерального матеріалу. SMA додатково вміщував 0,3 % стабілізаційних волокон [9].

Одразу після ущільнення зразки епоксиасфальтобетону (НМА та SMA) мали жорсткість, як і зразки стандартних асфальтобетонів. Після завершення «затвердіння» та повної стабілізації структури епоксиасфальтобетони НМА та SMA мали жорсткість за температури 20 °С в 3 рази більшу, ніж контрольні зразки.

В повністю затверділому стані епоксиасфальтобетони мали у 2-8 разів більший опір повзучості під багаторазовими навантаженнями при 40 °С та опір утворенню колії від колеса за температури 60 °С, ніж відповідні контрольні матеріали.

Випробування на опір втомі показали, що за цим показником довговічність епоксиасфальтобетону в 10 разів більша, ніж контрольних сумішей [9].

Результати випробування на вигин балки за пониженої температури показали, що епоксиасфальтобетони виявили збільшену міцність/жорсткість, але із зменшеною розтяжністю в порівнянні з контрольними зразками [9].

Таким чином, можна зробити висновок, що за основними характеристиками епоксиасфальтобетони перевищують контрольні суміші в 2-3 рази, а в деяких випадках більше ніж в 10 разів. В цілому, у порівнянні з контрольними зразками із звичайними бітумами, епоксив'яжуче надає асфальтобетонам такі переваги: збільшення жорсткості (що сприяє збільшенню опору навантаженням), зростання пружності при підвищених температурах (що призводить до підвищення стійкості стосовно утворенню деформацій), а також надає більш низьку чутливість до температури та навантажень.

В Центральній лабораторії OPUS (Нова Зеландія) були проведені дослідження впливу бітуму, модифікованого епоксидною смолою, на когезійні властивості пористого асфальтобетону (OGPA).

При проведенні досліджень для виробництва OGPA використовувався епоксибітум, який є продуктом двох частин, змішаних перед безпосереднім використанням. Частина А складалась з епоксидної смоли, частина В – із затверджувача та бітуму. Вміст в'яжучого в суміші становив 4,7 %. Пористість OGPA – 20,4 % [12].

Проводились непрямі вимірювання модуля пружності (ITM) контрольних зразків асфальтобетону OGPA та епоксиасфальтобетону OGPA. ITM епоксиасфальтобетону збільшився від 570 одразу після виготовлення до 4300 після затвердівання (рис. 1), тобто більше ніж в 7 разів. Для порівняння, ITM контрольних зразків асфальтобетону – з 840 до 2500 [10].

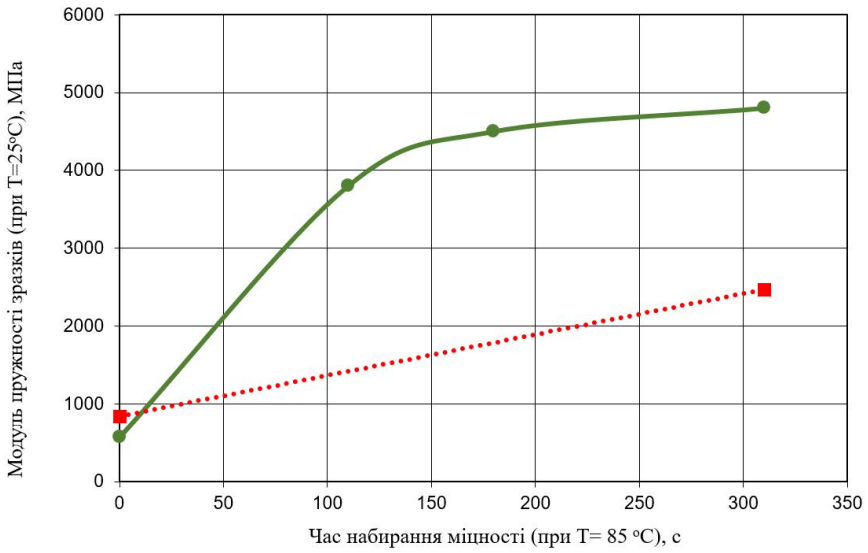

Рисунок 1 – Залежність модулю пружності від часу затвердівання

Когезія лабораторних і стендових зразків вихідного асфальтобетону OGPA та епоксиасфальтобетону OGPA визначалась за методом Cantabro. [10] Цей метод полягає у визначенні абразивного стирання матеріалу. За результат випробувань приймається втрата маси зразка (у %), віднесена до його вихідної маси. Результати випробувань за методом Cantabro (% втрати маси) незістарених зразків (у випадку епоксиасфальтобетону OGPA після витримки за температури 85 °C протягом 120 год.) та після їх старіння (витримки за температури 85 °C протягом 909 год.) наведені в таблиці 2 [10].

Таблиця 2

Назва асфальтобетону	Втрата маси, %	
	Незістарених зразків	Зістарених зразків
Епоксиасфальтобетон OGPA	14,9 ± 4,6	17,6 ± 4,6
Контрольний асфальтобетон OGPA	53,1 ± 5,2	72,1 ± 7,7

За даними таблиці втрата маси епоксиасфальтобетону набагато менша, ніж контрольного асфальтобетону: в 3,6 рази незістарених зразків та в 4,1 рази після їх старіння. Слід також зазначити, що старіння суттєво не вплинуло на втрату маси епоксиасфальтобетону (14,9 % проти 17,6 %) тоді як для контрольного асфальтобетону воно значно збільшилось (на 26 %).

Були проведені випробування дослідних ділянок епоксиасфальтобетону та контрольного асфальтобетону на колієутворення. Для цього на стендових ділянках було виконано 198 тис. проходів колеса (протягом 3 тижнів) з навантаженням еквівалентним 8,5 т на вісь. Мінімальна температура повітря при випробуваннях становила 4,2 °С, максимальна – 27,7 °С [10]. На рис. 2 представлена динаміка утворення колії в залежності від кількості проходів колеса.

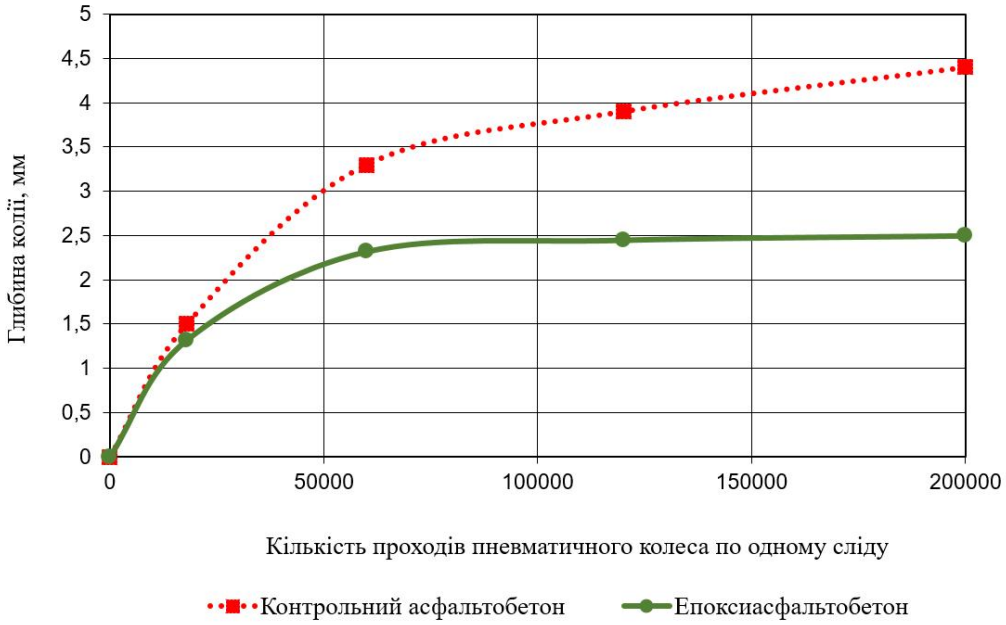

Рисунок 2 – Залежність глибини колії від кількості проходів колеса

Як видно з графіка, глибина колії на ділянці з епоксиасфальтобетоном була значно менше, ніж на контрольній ділянці (2,5 мм проти 4,2 мм). Слід зазначити, що на ділянці, де був укладений епоксиасфальтобетон, глибина колії після 60 проходів колеса стабілізувалась, тоді як колійність на контрольній ділянці постійно збільшувалась.

Проведені в OPUS дослідження показали, що когезійна міцність епоксиасфальтобетону OGPA значно більша, ніж контрольного асфальтобетону OGPA на чистому бітумі (випробування за методом Cantabro). Метод Cantabro також засвідчив більший опір епоксиасфальтобетону окисленню, тобто підвищену довговічність. Так, стандартний OGPA, окислений до стану,

еквівалентному приблизно 7 рокам служби, показав майже подвійне збільшення втрати маси в порівнянні з незістареним OGPA. В той же час штучне старіння не вплинуло на втрату маси епоксиасфальтобетону. Випробування на колійність показали набагато більшу стійкість епоксиасфальтобетону до дії транспорту, ніж стандартного асфальтобетону [10].

Yang Kang виконував дослідження з порівняння реологічних властивостей епоксибітумного в'яжучого, бітуму контрольних зразків і бітуму модифікованого полімером типу СБС. Зазначається, що епоксибітумне в'яжуче суттєво відрізняється від інших модифікованих бітумних в'яжучих.

Результати випробувань на динамічному реометрі зсуву показали, що деформації повзучості епоксибітуму від 10^{-7} до 10^{-2} рази більше ніж у бітумі контрольних зразків і від 10^{-6} до 10^{-2} рази більше, ніж в бітумі модифікованому полімером типу СБС [11].

Дослідження з повзучості та відновлення показали, що епоксибітум повністю еластичний після 100 циклів завантаження-розвантаження, це означає, що епоксибітум відзначається високою стійкістю до утворення колії.

В дослідженнях Peiliang Cong щодо впливу співвідношення затверджувача до епоксидної смоли на міцність при розтягуванні затвердженої епоксидної смоли та бітумного в'яжучого з епоксидною смолою використовувався бітум, комплексно модифікований полімером та епоксидною смолою (рис. 3). Вплив співвідношення затверджувача до епоксидної смоли на границю міцності при розриві епоксидної смоли і епоксибітуму, що містить епоксидну смолу: (*a*) 10 %, (*b*) 20 %, (*e*) 30 %, (*d*) 40 %, (*c*) 50 % [12].

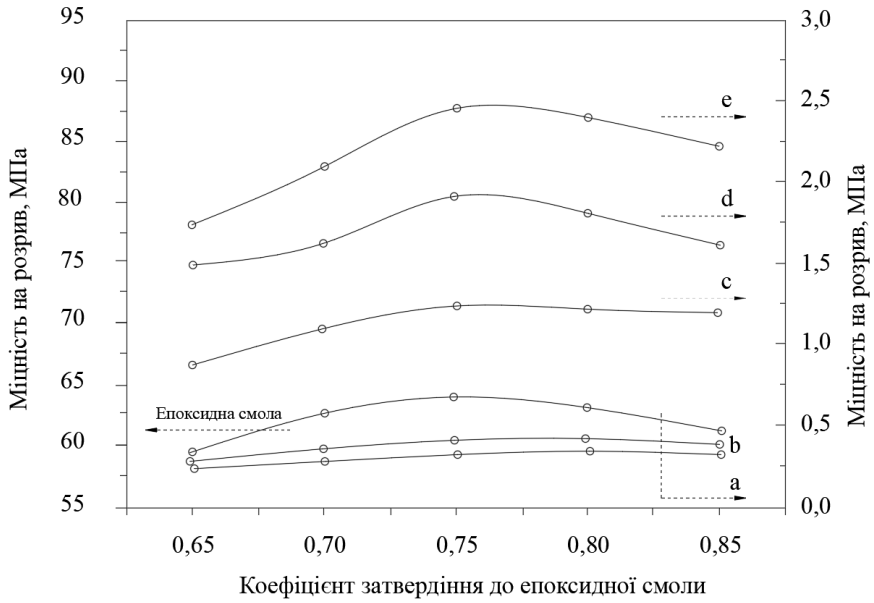

Рисунок 3 – Залежність міцності та розрив від кількості епоксидної смоли та співвідношення компонентів

Границя міцності при розтягуванні підвищується із збільшенням відсоткового вмісту затверджувача. При відношенні затверджувача до епоксидної смоли (0,75), міцність на розрив переходить через максимум і становить 64,1 МПа. Із збільшенням відношення міцність починає знижуватись [12]. Саме відношення затверджувача до епоксидної смоли (0,75) може вважатися оптимальним, оскільки забезпечується найбільша міцність затверділої смоли.

Залежність міцності епоксибітуму, що вміщує різну кількість епоксискладових є аналогічною, що свідчить про незначний вплив бітумного середовища на затвердівання епоксидної смоли.

Границю міцності при розтягуванні і відносне подовження при розриві для епоксибітумів наведено на рис. 4. Границя міцності при розтягуванні епоксибітуму збільшується зі збільшенням вмісту епоксидних складових [12]. Границя міцності при розтягуванні епоксибітуму повільно збільшується при вмісті епоксискладових до 20 %, і є більшою ніж у вихідного модифікованого бітуму. Границя міцності при розтягуванні помітно збільшується, коли вміст епоксискладових перевищує 20 % за масою. Так, границя міцності при розтягуванні епоксибітуму з 10 %, 20 % і 30 % епоксискладових становила 0,32, 0,41 і 1,24 МПа, відповідно.

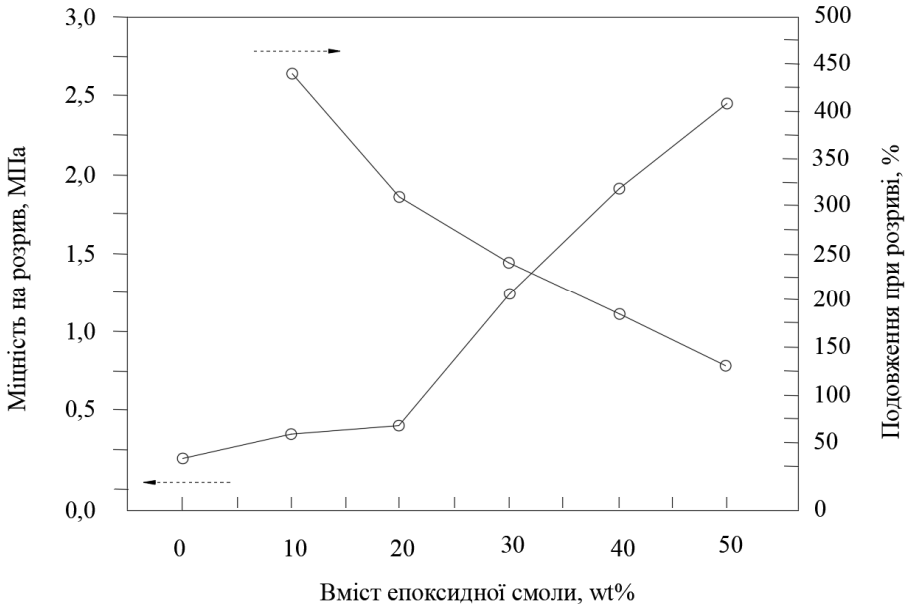

Рисунок 4 – Вплив вмісту епоксидної смоли на міцність та подовження

Відносне подовження при розриві, є одним з ключових показників прогнозування пластичності матеріалів на основі епоксискладових [12]. Відносне подовження при розриві епоксибітуму з 10 % епоксискладових становило 440 %, а при 50 % епоксискладових – тільки 130 %, тобто відносне подовження при розриві зменшується із вмістом епоксискладових в епоксибітумі.

В 70-80 роках в Ленінградській філії «СоюздорНИИ» проводились дослідження полімербетону, в якому у ролі в'яжучого використовувались епоксидні смоли та суміші епоксидних смол з рідким бітумом марки МГ 70/130 у співвідношенні 100 до 50. Вміст епоксив'яжучих складав 5-7 % від маси мінерального матеріалу.

Дослідження показали, що міцність на стиск полімерасфальтобетону на епоксидній смолі протягом усього періоду витримки зростає (особливо інтенсивно протягом 1 місяця). Після 3 років зберігання міцність зразків полімербетону збільшилась в 1,5-1,8 разів у порівнянні з добовою міцністю [2].

Міцність полімербетону після 4320 циклів заморожування/відтавання підвищилась в 1,3-1,5 рази у порівнянні з добовою міцністю зразків, що були піддані 4 циклам заморожування.

Полімербетон на епоксидній смолі відзначається дуже високою морозостійкістю. Він витримав 4320 циклів заморожування-відтавання у прісній воді без зниження міцності більше ніж на 15 %.

Зносостійкість матеріалу визначали на спеціальному приладі, в якому на зразок діяв абразив протягом 700 обертів під навантаженням на зразок 2 кг. Після цього визначали втрати за масою та середню висоту стирання. Знос зразків полімерасфальтобетону після витримки в морозильній камері до 1500 циклів не збільшився, а після 2 000-4 320 циклів збільшився на 5-8 % в порівнянні зі зносом зразків при зберіганні на повітрі в еквівалентному віці.

Як свідчать результати випробувань полімербетону на епоксидній смолі на хімічну стійкість за витримкою в різних середовищах, полімербетони на епоксидних смолах мають високу хімічну стійкість до бензину, керосину, дизельного палива та автолу. Коефіцієнт втрати міцності полімербетону в усіх випадках був не менше 0,8 при витримуванні 40 діб в агресивному середовищі [2].

Таким чином, дослідження, що були проведені в «СоюздорНИИ», засвідчили здатність полімербетону на епоксидній смолі протягом тривалого періоду зберігати високу механічну міцність та хімічну стійкість. Це дало можливість припустити довготривалу роботу цього матеріалу в дорожньому покритті без руйнування.

В Україні у ДП «ДерждорНДІ» також виконувались пошукові дослідження епоксиасфальтобетонів. При проведенні досліджень використовувались:

- бітум марки БНД 60/90 виробництва, що відповідали вимогам ДСТУ 4044;
- щебінь фракції (5-10) мм, що задовольняли вимоги ДСТУ Б В.2.7-75;
- пісок штучного подрібнення (відсів), що відповідав вимогам ДСТУ Б В.2.7-76;
- мінеральний порошок виробництва, що відповідав вимогам ДСТУ Б В.2.7-121;
- епоксидна смола в комплексі із звтверджувачем.

Підібрані склади вихідних асфальтобетонів та епоксиасфальтів відповідали вимогам ДСТУ Б В.2.7-119.

Процес виробництва епоксиасфальтобетону складався з таких технологічних операцій:

- дозування та перемішування щебеню, піску та мінерального порошку відповідно до підібраного складу;
- нагрівання мінерального матеріалу до потрібної температури;
- введення затверджувача в нагрітий до відповідної температури бітум з наступним перемішуванням протягом 5-10 хв;
- введення бітуму разом із затверджувачем в мінеральну суміш з наступним перемішуванням;
- введення в суміш епоксидної смоли або епоксиполіуретану з наступним перемішуванням.

Виробництво та випробування зразків асфальтобетону та епоксиасфальтобетону виконувались за традиційною технологією згідно з ДСТУ Б В.2.7-89.

З метою дослідження змін властивостей епоксиасфальтобетону в залежності від ступеня формування структури матеріалу під дією термоокислювальних процесів в епоксискладових зразки епоксиасфальтобетону витримували протягом 1, 14 та 28 діб за температури 20 °С [6].

Міцність на стиск зразків епоксиасфальтобетону, які були щойно заформовані при 20 °С та 50 °С дещо нижче, ніж у вихідного асфальтобетону (відповідно на 0,5 МПа та 0,2 МПа). Із збільшенням терміну витримки міцність зразків епоксиасфальтобетону зростає. Особливо інтенсивне збільшення міцності спостерігається з 7 до 14 діб витримки. Через 28 діб міцність епоксиасфальтобетону за температури 20 °С складає 5,4 МПа проти 3 МПа у вихідного асфальтобетону, а за температури 50 °С відповідно 2,9 МПа проти 1,4 МПа. Таким чином, міцність за температури 20 °С збільшилась на 64 %, а за температури 50 °С – в 2 рази [6].

Важливою властивістю асфальтобетонів є їх здатність зберігати міцність при підвищенні температури, яку можна характеризувати коефіцієнтом температурної чутливості. Коефіцієнт температурної чутливості вихідних асфальтобетонів становить 0,42-0,43. При введенні епоксискладових він зростає до 0,53-0,54 або на 23-28 % [6].

Для епоксиасфальтобетонів та вихідних асфальтобетонів визначався коефіцієнт внутрішнього тертя асфальтобетону tgφ і лабораторний показник зчеплення при зсуві $C_л$. Проведені випробування показали, що при введенні у асфальтобетонну суміш епоксискладових tgφ практично не змінюється, а $C_л$ зростає відповідно на 12 % та 35 % [6].

Зважаючи на те, що введення епоксискладової підвищує міцність та теплостійкість асфальтобетонів, були проведені дослідження її впливу на опір покриття колієутворенню в умовах високих літніх температур.

Як свідчать дані випробувань, після 14 діб витримки зразків епоксиасфальту інтенсивність колієутворення на ньому практично така ж, як і на вихідному асфальтобетоні (після 30000 проходів глибина колій на обох покриттях становить 4,6 мм) [6].

Після витримки 28 і більше діб інтенсивність колієутворення на покриттях епоксиасфальтобетону значно зменшується. Якщо глибина колії у вихідного асфальтобетону після 1000 проходів становила 1,7 мм, а після 30000 проходів – 4,6 мм, то у епоксиасфальтобетону після 42 діб витримки відповідно 0,3 мм та 1,7 мм. Таким чином, з протіканням процесів формування структури епоксиасфальтобетону збільшується опір покриттів колієутворенню. Після 42 діб він зростає майже в 3 рази [6].

Висновки

Аналізом інформаційних джерел щодо застосування епоксиасфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах встановлено, що використання термореактивних полімерів у якості модифікаторів бітуму дозволяє значно покращити його властивості, а отже і властивості асфальтобетонів на його основі. Засвідчено перспективність використання епоксиасфальтобетону, який у порівнянні із звичайним асфальтобетоном відзначається вищими міцнісними характеристиками, більшим опором колієутворенню, уповільненим старінням під дією природно-кліматичних факторів та стійкістю до дії паливно-мастильних матеріалів.

Визначено, що введення у бітум епоксискладових від 5,0 % до 20,0 % призводить до суттєвого підвищення міцності та теплостійкості епоксиасфальтобетону за всіх температур. Разом з цим низькотемпературні характеристики отриманих епоксив'яжучих не є гіршими (а у ряді випадків – кращими), ніж у немодифікованих бітумів такої ж в'язкості. При цьому, чим більший вміст термореактивних модифікаторів, тим більш значною є якісна зміна властивостей бітумів. Середня густина епоксиасфальтобетону знижується при одночасному зростанні його водонасичення, коефіцієнт водостійкості не залежить від вмісту епоксискладових.

Впровадження епоксиасфальтобетонів дозволить підвищити якість та довговічність покриття на автодорожніх мостах, а також значно скоротити витрати на ремонтні роботи. Питання щодо використання зазначених матеріалів для мостових покриттів є дуже актуальним але водночас досить невизначеним, а отже поставлено задачі щодо подальшого проведення досліджень.

Список літератури

1. Онищенко А. М. Наукові основи підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах: дисертація на здобуття наукового ступеня док. тех. наук. Київ, 2017. 37 с. URL: http://diser.ntu.edu.ua/Onyschenko_dis.pdf (дата звернення: 02.02.2019).

2. Доронина Н. Д. Исследование долговечности полимербетона на эпоксидной смоле. *Труды СоюздорНИИ.* Москва, 1977. Вып. 89. С. 26-32.

3. Онищенко А. М. Підвищення довговічності асфальтобетонних шарів за рахунок використання полімерних латексів: автореферат дис. … канд. тех. наук. Київ, 2008. 21 с.

4. Невінгловський В. Ф. Методи розрахунку залишкового ресурсу асфальтобетонного покриття на транспортних спорудах: автореферат дис. … канд. тех. наук. Київ, 2015. 20 с.

5. Peijun Xu, Peiliang Cong, Huan Ye, Shuanfa Chen. Modification of Epoxy Asphalt by Hyperbranched Polyester (Модифікація епоксидного асфальту гіперрозгалуженим поліестером). *Materials Science and Technology II*. Xi'an. 2013. Vol. 716. P. 379-382. URL: https://u.to/h9ktFg (дата звернення: 11.02.2019).

6. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Звіт про науково-дослідну роботу «Провести дослідження та розробити енерго та ресурсозберігаючі технології влаштування довговічних дорожніх покриттів з використанням термореактивних модифікаторів асфальтобетону з епоксискладовою». Київ, 2018. 122 с.

7. Alabaster D., Herrington P. R., Waters J. Ultra long life low noise porous asphalt. (Влаштування асфальтобетонних покриттів з низьким рівнем шуму). *The Journal of the Acoustical Society of America*. Hong Kong. 2012. Vol. 131, Issue 4. 131(4): 3225. URL: https://u.to/7-EtFg (дата звернення: 15.02.2019).

8. Haiyan Yin, Yuge Zhang, Yifan Sun, Wei Xu, Dier Yu, Hongfeng Xie. Performance of hot mix epoxy asphalt binder and its concrete (Дослідження гарячої суміші епоксидного асфальтового в'яжучого і його міцність). *Materials and Structures*. Nanjing, 2015. Vol. 48. N 11. P. 3825-3835. URL: https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.springer-doi-10_1617-S11527-014-0442-0 (дата звернення: 11.02.2019).

9. Widyamoko R., Elliott C., Planning and testing of durable layers of road surface wear (Планування та випробування зносостійких шарів дорожнього покриття). Scott Wilson Nottingham Central Laboratories. Notingham, 2006. 12 p.

10. Xinxing Zhou, Shaopeng Wu, Gang Liu, Pan Pan. Molecular simulations and experimental evaluation on the curing of epoxy bitumen (Молекулярне моделювання та експериментальна оцінка затвердіння епоксидного бітуму). *Materials and Structures*. Nanjing. 2016. Vol. 49. Issue 1-2. P. 241-247. URL: https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-014-0491-4 (дата звернення: 11.02.2019).

11. Yang Kang, Mingyu Song, Liang Pu, Tingfu Liu. Rheological behaviors of epoxy asphalt binder in comparison of base asphalt binder and SBS modified asphalt binder (Реологічна поведінка епоксидного асфальтового в'яжучого у порівнянні із звичайним асфальтовим в'яжучим та модифікованим асфальтовим в'яжучим SBS*). Construction and Building Materials.* Shaanxi, 2015. Vol. 76 P. 343-350. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.020.

12. Jianying Yu, Peiliang Cong, Shaopeng Wu. Laboratory investigation of the properties of asphalt modified with epoxy resin (Лабораторне визначення властивостей асфальтобетону модифікованого епоксидною смолою). *Journal of Applied Polymer Science*. Wuhan. 2009. Vol. 13. Issue 6. P. 3557-3563. DOI: https://doi.org/10.1002/app.30324.

13. Mohammad Shafaghat Lonbar, Seyyed Masoud Nasrazadani, Ali Shafaghat. Investigation of aggregate and binder types effects on the micro surfacing rutting properties (Дослідження впливу агрегатних та в'яжучих типів на мікроповерхневі властивості). International Conference on Civil Engineering Architecture and urban infrastructure. Tabriz. 2015. P. 29-30. URL: https://u.to/2EkhFg (дата звернення: 20.02.2019).

14. ДСТУ 4044-2001 Бітуми нафтові дорожні в'язкі. Технічні умови. Київ, 2001. 15 с. (Інформація та документація).

15. ДСТУ Б В.2.7-119:2011 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови. Київ, 2012. 59 с. (Інформація та документація).

16. ДСТУ Б В.2.7-319:2016 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань. Київ, 2016. 64 с. (Інформація та документація).

17. СОУ 45.2-00018112-057:2010 Асфальтобетонні суміші та асфальтобетон на основі модифікованих полімерами бітумів. Київ, 2010. 15 с. (Інформація та документація).

REFERENCES

1. Onishchenko A. N. Scientific foundations for increasing resistance of asphalt-concrete pavement to rut *formation* on road bridges: dissertation for a scientific degree Doctor of Engineering Sciences. Kyiv, 2017. 394 p. URL: http://diser.ntu.edu.ua/Onyschenko_dis.pdf (Last accessed: 02.02.2019). [in Ukrainian]. (2017).

2. Doronina N. D. Issledovaniye dolgovechnosti polimerbetona na epoksidnoy smole. *Trudy SoyuzdorNII*. Moscow, 1977. 89. P. 26-32. [in Russian].

3. Onyshchenko A. N. Increase of longevity of asphalt - concrete's layers for an account the use of polymeric latexes: PhD (Eng.). Kyiv, 2008. 21 p. URL: https://u.to/xEIhFg (Last accessed: 05.02.2019). [in Ukrainian].

4. Nevinhlovs′kyy V. F. Metody rozrakhunku zalyshkovoho resursu asfal′tobetonnoho pokryttya na transportnykh sporudakh (Methods of calculation of residual resource of asphalt concrete cover on transport structures): dissertation for a scientific degree Candidate Engineering Sciences (Ph.D). Kyiv, 2015. 20 p. [in Ukrainian].

5. Peijun Xu, Peiliang Cong, Huan Ye, Shuanfa Chen. Modification of Epoxy Asphalt by Hyperbranched Polyester. *Materials Science and Technology II*. Xi'an. 2013. Vol. 716. P. 379-382. URL: https://u.to/h9ktFg (Last accessed: 11.02.2019). [in English].

6. Kishchinsky S. V., Kopinets I. V. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu «Provesty doslidzhennya ta rozrobyty enerho ta resursozberihayuchi tekhnolohiyi vlashtuvannya dovhovichnykh dorozhnikh pokryttiv z vykorystannyam termoreaktyvnykh modyfikatoriv asfal′tobetonu z epoksyskladovoyu» (Research report «Conduct research and develop energy and resource-saving technologies for the construction of durable pavements using thermosetting epoxy concrete asphalt concrete modifiers»). Kyiv, 2018. [in Ukrainian].

7. Alabaster D., Herrington P. R., Waters J. Ultra long life low noise porous asphalt. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Hong Kong. 2012. Vol. 131, Issue 4. 131(4): 3225. URL: https://u.to/7-EtFg (Last accessed: 15.02.2019). [in English].

8. Haiyan Yin, Yuge Zhang, Yifan Sun, Wei Xu, Dier Yu, Hongfeng Xie. Performance of hot mix epoxy asphalt binder and its concrete. *Materials and Structures*. Nanjing. 2015. Vol. 48. N 11. P. 3825-3835. URL: https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.springer-doi-10_1617-S11527-014-0442-0 (Last accessed: 11.02.2019) [in English].

9. Widyamoko R., Elliott C., Planning and testing of durable layers of road surface wear. Scott Wilson Nottingham Central Laboratories. Notingham, 2006. 12 p. [in English].

10. Xinxing Zhou, Shaopeng Wu, Gang Liu, Pan Pan. Molecular simulations and experimental evaluation on the curing of epoxy bitumen. Materials and Structures. Nanjing. 2016. Vol. 49. Issue 1-2. P. 241-247. URL: https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-014-0491-4 (Last accessed: 11.02.2019). [in English].

11. Yang Kang, Mingyu Song, Liang Pu, Tingfu Liu. Rheological behaviors of epoxy asphalt binder in comparison of base asphalt binder and SBS modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*. Shaanxi, 2015. Vol. 76 P. 343-350. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.020 (Last accessed: 15.02.2019). [in English].

12. Jianying Yu, Peiliang Cong, Shaopeng Wu. Laboratory investigation of the properties of asphalt modified with epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science*. Wuhan. 2009. Vol. 13. Issue 6. P. 3557-3563. DOI: https://doi.org/10.1002/app.30324 (Last accessed: 11.02.2019). [in English].

13. Mohammad Shafaghat Lonbar, Seyyed Masoud Nasrazadani, Ali Shafaghat. Investigation of aggregate and binder types effects on the micro surfacing rutting properties. International Conference on Civil Engineering Architecture and urban infrastructure. Tabriz. 2015. P. 29-30. URL: https://u.to/2EkhFg (Last accessed: 20.02.2019). [in English].

14. State Standard of Ukraine (DSTU 4044-2001) Bitumy naftovi dorozhni v″yazki. Tekhnichni umovy (Bitumens are oil road bindings. Specifications). Kyiv, 2001. 15 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

15. State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-119:2011) Sumishi asfal′tobetonni i asfal′tobeton dorozhniy ta aerodromnyy. Tekhnichni umovy (Mixtures of asphalt and asphalt road and airfield. Specifications). Kyiv, 2012. 59 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

16. State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-319:2016) Sumishi asfal′tobetonni i asfal′tobeton dorozhniy ta aerodromnyy. Metody vyprobuvan′ (Mixtures of asphalt and asphalt road and airfield. Test methods). Kyiv, 2016. 64 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

17. Standard of organization of Ukraine (SOU 45.2-00018112-057:2010) Asfal′tobetonni sumishi ta asfal′tobeton na osnovi modyfikovanykh polimeramy bitumiv (Asphalt mixes and asphalt concrete based on polymer modified bitumen). Kyiv, 2010. 15 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

[1]**Arthur Onishchenko**, *D.Sc., Professor, https://orcid.org/0000-0002-1040-4530*
[2]**Ivan Kopinets**, *https://orcid.org/0000-0002-0908-4795*
[2] **Vladimir Zelenovsky**, *https://orcid.org/0000-0001-5834-5456*
[1]*National Transport University, Kyiv, Ukraine*
[2]*M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise (DerzhdorNDI SE), Kyiv, Ukraine*

EXPERIENCE OF APPLICATION OF EPOXH ASPHALT CONCRETE PAVEMENT ON ROAD BRIDGES

Abstract

Introduction. The analysis of recent research on prevention of formation of defects of asphalt pavements on road bridges and extension of terms of their operating period is given. The perspective of application in Ukraine of asphalt pavements modified with thermosetting polymers is determined. The research tasks are formulated.

Problem statement. Lack of sufficient experience in the use of epoxy asphalt pavement on the Ukrainian road bridges and uncertainty of economic feasibility of its application.

Objective. Perform an analysis of the existing experience of using asphalt pavement modified with thermosetting polymers to increase its durability on the road bridges.

Materials and methods. Analysis of information sources on the use of epoxy asphalt pavement on the road bridges. Analytical studies of asphalt mixtures modified with epoxy constituents.

Results. The perspective directions concerning improvement of quality of pavement on the road bridges, increase of their performance and durability are determined. An analytical review of the experience of using epoxy asphalt pavement on the road bridges has been conducted. The questions of modification of the bituminous base of asphalt mixtures with epoxy composites with the aim of improving their technical characteristics have been studied. The promising economic efficiency of the use of epoxy asphalt mixes in Ukraine has been established. The tasks concerning further investigation of epoxy asphalt pavement when applied on the road bridges have been formulated.

Conclusions. An analysis of information sources on the application of epoxy asphalt pavement on the road bridges showed the following: the economic and technical feasibility of the use of these pavements, since they have significant advantages compared with the asphalt pavement of the standard composition (without modifiers); the introduction into the bitumen of epoxy constituents from 5.0 % to 20.0 % leads to a significant increase in the strength and heat resistance of epoxy asphalt concrete at all temperatures. The introduction of epoxy asphalt concrete allows improving the quality and durability of road pavement, as well as significantly reducing the cost of repairs.

Key words: epoxy asphalt mix, asphalt, modification of bitumen, durability of pavement, research.