

А.О. Атинян, С.В. Бутнік, І.В. Говоруха

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕПОКСИАСФАЛЬТОВОГО БЕТОНУ ШЛЯХОМ ДОДАВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ДОБАВОК

Негативною властивістю епоксидасфальтового бетону є здатність набирати міцність протягом тривалого періоду експлуатації. Було запропоновано вирішення цієї проблеми шляхом розробки покращеного складу епоксидасфальтового бетону за допомогою введення у розроблений склад фібри вуглецю як армувальної та структурувальної добавки, яка прискорює термін формування покриття та зміцнює асфальтову матрицю в епоксидасфальтобетоні.

Ключові слова: епоксидасфальтовий бетон, добавка, фібра, зола виносу, продукти горіння.

Постановка проблеми

Епоксидасфальтобетон – це асфальтобетон (гарячий), у якому використовується в'язивник, модифікований затверджувачами та епоксидною смолою.

При змішуванні епоксидної смоли та затверджувача відбувається хімічна реакція з подальшим утворенням полімерної матриці (сітки) та виділенням тепла. Впродовж часу це супроводжується незворотним твердінням в'язивника (термотвердінням).

Температура середовища, у якому проходить зв'язування елементів епоксидної смоли та затверджувача, впливає на швидкість твердіння та безпосередньо визначає термін, під час якого можлива робота з реагентами та сама суміш може бути укладена в основу і буде залишатися пластичною. Чим нижча температура навколишнього середовища – тим повільніше буде йти реакція [1, 2]. З огляду на властивості бітумів та епоксидних смол вміст останніх значно перевищує вміст термопластичних полімерів і становить від 20 до 35 % від маси в'язивника [3]. Характеристики бітумно-епоксидного в'язивника після повного проходження реакції настільки відрізняються від вихідного бітуму, що можна говорити не про покращення його якості, а про радикальну зміну властивостей.

Бітумно-епоксидний в'язивник коштує набагато дорожче за звичайний бітум, і його вартість у кілька разів вища за вартість самого бітуму. Але такі технічні та експлуатаційні властивості епоксидасфальтового бетону, як межа втоми при згинанні та залишкова деформація, в 10 і більше разів перевищують відповідні показники класичного асфальтобетону. Тож збільшення терміну служби та експлуатаційних показників робить цей матеріал економічно ефективним для особливо складних умов експлуатації дороги: на ділянках автошляхів з великою інтенсивністю руху (понад 20 тис. авто/добу), перехрестях, вулицях великих

міст та місцях концентрації ДТП [4].

Тому розробка нових складів епоксидасфальтобетонів є вигідною як з економічних, так і з технологічних і експлуатаційних міркувань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Головним компонентом епоксидасфальтового бетону, який забезпечує його експлуатаційні властивості та довговічність, є модифікований бітум. Термін служби асфальтобетонних покриттів на автошляхах, мостах та аеродромах скоротився у 2–3 рази; понад 90 % матеріальних, трудових та енергетичних ресурсів, що виділяються дорожній галузі, витрачаються не на будівництво нових, а на ремонт та реконструкцію старих асфальтобетонних покриттів. Таке положення стримує розвиток мережі автомобільних доріг із твердим покриттям. Ситуація посилюється безперервним збільшенням вантажопідйомності та інтенсивності руху транспортних засобів, що призводить до значного зростання динамічних навантажень на дорожнє покриття та, як наслідок, підвищення вимог до якості бітуму [5, 6].

Сучасне будівництво автомобільних доріг вимагає використання якісних дорожньо-будівельних матеріалів, без яких забезпечення високого рівня працездатності та довговічності асфальтобетонних покриттів просто неможливе. Нафтові дорожні бітуми є найважливішими та обов'язковими складовими асфальтобетонних сумішей, і саме вони в процесі експлуатації найбільше схильні до всіх видів деформацій [7]. Після модернізації нафтопереробних заводів бітум піддається глибшій переробці й у результаті більшою мірою втрачає легкі, пластичні фракції. Недостатня міцність дорожніх бітумів, їх якість, недостатня тріщиностійкість, еластичність, адгезія є однією з головних причин передчасного руйнування дорожніх, мостових та аеродромних асфальтобетонних покриттів.

Мета статті

Метою дослідження є розробка складу епоксидно-асфальтобетону шляхом введення домішок для підвищення експлуатаційних характеристик дорожнього одягу.

Виклад основного матеріалу

На сьогодні для отримання якісних бітумів використовуються два основні способи забезпечення необхідних структурно-механічних властивостей, що залежать від етапу або стадії отримання бітуму: метод компаундування в момент виробництва бітуму та модифікація властивостей бітумних матеріалів на стадії випуску товарної продукції [7]. На рис. 1 представлені основні способи модифікації бітуму, кожен з яких має свої переваги та недоліки.



Рис. 1. Способи модифікації бітумів

При модифікації бітуму можна виділити такі основні способи: фізичні способи, засновані на механічному та фізичному впливі на середовище бітуму, та хімічні способи, засновані на введенні до складу бітуму різних хімічних добавок. До фізичних способів зміни властивостей та якості бітуму можна віднести: НВЧ-активацію, ультразвукову обробку, вплив магнітного, акустичного, електромагнітного полів, кавітацію та ін. [8]. При хімічному способі відбувається модифікація бітумів різними модифікаторами: адгезійними, розріджувальними, пластифікуювальними, структурувальними, стабілізуювальними [9].

Відомо, що бітумні зв'язні матеріали зазвичай є практично відходами процесу нафтопереробки [10]. Тому найважливішим завданням модифікації таких бітумів стає покращення їх фізико-механічних та хімічних властивостей. Для підвищення довговічності та якості таких матеріалів використовують введення до їх складу різноманітних добавок, що дозволяють покращити властивості бітуму та модифікувати їх у необхідному для практики напрямку. Добавки, які

вводяться в бітум поділяються за такими ознаками: речовий склад, функціональне призначення та найменування основних складових речовин, хімічних сполук та активних компонентів. За речовинним складом добавки поділяються на: мінеральні, органічні та органо-мінеральні [11, 12]. За найменуванням основних складових речовин, хімічних сполук та активних компонентів мінеральні добавки можуть бути шлакові, цементні, вапнякові, фосфоровмісні, сірковмісні і т. д.; низькомолекулярні органічні – аміні, амідні, амідно-амінні і т. д.; високомолекулярні органічні (полімерні) – поліізобутиленові, дивінілстирольні.

У час раціоналізації використання новітніх будівельних матеріалів проводяться дослідження щодо застосування волокнистих фібронанповнювачів для покращення структури бітуму. Крім того, відомо, що такі фібронанповнювачі виконують роль адсорбентів, модифікаторів хімічних реакцій, технологічних і конструкційних властивостей матеріалів, що виготовляються з їх застосуванням. Поліпшення властивостей в'язника, яке може бути досягнуто шляхом використання фібри, відбувається завдяки хімічним реакціям, що проходять на поверхні фаз, які взаємодіють.

Серед волокнистих наповнювачів особливе місце займає фібра із золи теплових електростанцій. Фібра має низку позитивних властивостей, зумовлених упорядкованою мікроструктурою частинок: хороша електропровідність та адсорбційні властивості, здатність до хімічної та термічної стабільності, велика міцність у поєднанні з високими значеннями пружної деформації. Матеріали, створені із застосуванням фібри, можуть успішно використовуватися як каркасні модулятори конструктивів. Уведення фібри із золи виносу теплових електростанцій у бітум істотно підвищує міцність і пружність одержуваного асфальтового покриття. Експериментально встановлено, що навіть незначна (масою 4–5 %) кількість добавки збільшує міцність бітуму при стисканні, що визначається за глибиною вдавлення штампів у зразки [13, 14].

Для вивчення складу бітуму з фіброю та епоксидною смолою проводився ІЧ-спектроскопічний аналіз зразків. Параметри експерименту: ІЧ-Фур'є спектрометр Nicolet, що дозволяє отримати інфрачервоний спектр проби методом багаторазового порушеного повного внутрішнього відбиття (БППВВ) інфрачервоного променю від поверхні рідких або твердих порошкоподібних зразків.

Визначення зміни твердості проводилося шляхом термостатування зразків модифікованих бітумів та подальшого визначення їхньої пенетрації методом, передбаченим ДСТУ 4044.

Енергію активації було визначено із залежності логарифма пенетрації від зворотної температури випробування.

Визначення зміни крайового кута змочування проводилося за допомогою оптичного приладу за температур 120 °С, 140 °С.

При приготуванні епоксифасфальтового бетону використовувалися:

- бітум марки БНД 60/90 виробництва компанії «Укртатнафта» (Кременчуцький НПЗ), що відповідає вимогам ДСТУ 4044:2019 та має фізико-механічні характеристики, наведені в табл. 1;
- щебінь фракції 5–10 мм українських гранітних кар'єрів, які відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-75-98 і табл. 2;

- пісок штучного дроблення (відсів), що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-176:2008;
- мінеральний порошок, який відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-121:2014;
- епоксидна смола виробництва фірми Spolchemie (Чехія) у комплекті з затверджувачем;
- епоксидна смола із затверджувачем виробництва ПАТ «Композит» (Україна);
- епоксиполіуретан із затверджувачем виробництва ПАТ «Композит» (Україна);
- фібра із вуглецю з наступними характеристиками (табл. 3).

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики бітуму

Назва показника	Фактичні показники	Вимоги ДСТУ 4044:2019 для бітуму БНД 60/90
Пенетрація при 25 °С, мм	61	61–90
Температура розм'якшення за КіШ, °С	47,5	від 47 до 53
Розтяжність при 25 °С, см	65	не менше 55
Розтяжність при 0 °С, см	3,5	не менше 3,0
Температура крихкості, °С	–17	не вище –12
Зчеплення зі щебенем, бали / %	2,5 / 30–40	не нормується

Таблиця 2

Фізико-механічні характеристики щебеню

Назва показника	Вимоги стандарту
Вміст зерен пластинчастої та голчастої форми, %	менше 15
Марка щебеню за міцністю при роздавлюванні в циліндрі за зносом	І-1
за морозостійкістю	МРЗ 50

Таблиця 3

Характеристики фібри

Найменування показників	Фізико-механічні властивості
	Волокно вуглецеве (фібра)
Середній діаметр волокна, мкм	160,0
Кількість неволокнистих добавок, %	2–3
Щільність, г/см ³	2,65
Температурний інтервал використання, °С	від –269 до +700
Водостійкість, %	99,6
Хімічна стійкість, %	
0,5Н NaOH	93,4
2Н NaOH	77,3
2Н H ₂ SO ₄	98,5
Гігроскопічність, %	до 1,0
Механічна міцність, МПа	4100
Модуль пружності, МПа	120
Подовження при розриві, %	3,1

Випробування проводилися за стандартними методиками відповідно до чинних нормативних документів.

Гранулометричні склади сумішей епоксифасфальту

були підібрані відповідно до ДСТУ Б В.2.7-119:2011 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний» і перебувають у межах, визначених для щільного дрібнозернистого асфальтобетону.

Найважливішою умовою міцності та довговічності асфальтобетону є зчеплення бітуму з поверхнею мінерального матеріалу. Оскільки мінеральний матеріал переважно гранітний, а адгезія бітуму до поверхні гранітних зерен недостатня, то фібра в суміші з епоксидною смолою, що має винятково високі адгезійні властивості, забезпечить міцне зчеплення бітуму з мінеральним матеріалом. Зміцнення досягається додаванням у нафтовий бітум з епоксидною смолою фібри та їхнім спільним структуруванням. Це дає змогу створити новий композитний матеріал, що

має унікальні властивості та характеристики.

Для визначення закономірностей зміни складу бітуму зі введенням епоксидної смоли і фібри використовувався метод визначення смолисто-асфальтенових речовин у бітумі. Виділення асфальтенів проводили шляхом розчинення в бензолі та промиванням гексаном. Асфальтени осідають у вигляді аморфного чорно-бурого порошку, який фільтрують, промивають на фільтрі бензином, сушать у сушильній шафі і зважують. Результати визначення вмісту асфальтенів у бітумах наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Відсотковий вміст асфальтенів у складі бітумів

Показник	БНД 90/130	БНД 90/130 при вмісті		БНД 90/130 при вмісті	
		Епоксидної смоли 2,5 %	Фібри 3,5 %	Епоксидної смоли 3,0 %	Фібри 4,0 %
Кількість виділених асфальтенів, %	40,13	60,12	71,14	54,32	64,33

*Примітка: відсоток вмісту епоксидної смоли наводиться від маси бітуму в епоксидасфальтовому бетоні, фібри – від маси мінерального матеріалу.

Аналізуючи дані табл. 5, бачимо, що при введенні та збільшенні кількості фібри спостерігається значне зростання концентрації високомолекулярних сполук асфальтенів та утворених агломератів, які складаються з епоксидної смоли, фібри та молекул асфальтенів. Для подальшого вивчення групового складу бітуму з фіброю та епоксидною смолою проводився ІЧ-спектроскопічний аналіз зразків.

Порівняння ІЧ-спектрів вихідного і модифікованого бітуму показало зміну інтенсивності в смузі поглинання 1600 см^{-1} , що відповідає валентним коливанням бензолних кілець групових елементів бітуму, збільшення площі піка в 1,7 і 1,2 разу для 0,1 мас. % ФСС і ФСМ, відповідно. Високочастотний пік у ділянці 3050 см^{-1} вихідного бітуму дає змогу віднести його до валентних коливань гідроксильних груп ОН, не асоційованих з будь-яким типом водневого зв'язку. Введення вуглецевих наномодифікаторів

призводить до ослаблення піка і зменшення відповідної йому інтенсивності ІЧ-спектрів. Ця зміна пов'язана з перебудовою в структурі водневих зв'язків бітуму із введенням модифікаторів – епоксидної смоли та фібри із золи виносу. Відомо, що в асфальтенових речовинах концентруються вільні радикали, які є одним із чинників, що визначають схильність асфальтенів до асоціації. Наявність вільних радикалів зумовлена тим, що в асфальтенах зосереджено найбільше конденсованих ароматичних структур, які створюють явище парамагнетизму. Це призводить до міжмолекулярної взаємодії, що сприяє утворенню надмолекулярних структур.

Зміна групового складу бітуму із введенням доводиться також результатами визначення коефіцієнтів структурно-групового аналізу модифікованих бітумів, визначених із використанням ІЧ-спектроскопії. Результати показано в табл. 5.

Таблиця 5

Інтенсивність смуг поглинання структурних елементів модифікованих бітумів

Структурні елементи	БНД 90/130 (вихідний)	Епоксидна смола, мас. %			Фібра, мас. %		
		2,0	2,5	3,5	2,0	3,0	4,0
Парафін-нафтоєні вуглеводні	127	20	29	17	30	19	36
Валентні коливання ненасичених С=C зв'язків циклічної будови	71	128	119	113	124	82	118

Також у роботі досліджувався вплив виду та кількості добавок фібри на втрати маси бітуму під час нагрівання і, відповідно, на процеси його старіння. Вивчення процесу старіння бітуму за втратою

маси проводилося згідно з методикою втрати маси бітуму. Для визначення втрати маси в тонких плівках бітуму були підготовлені зразки з різним вмістом добавок. Епоксидну смолу та фібру було розпо-

ділено в розігрітому до робочої температури бітумі шляхом механічного перемішування. Потім на висушені до постійної маси і знежирені металеві пластинки розміром 40×20 мм наносили 0,40 г компо-

зиційного бітуму. Нагрівання проводилося в печі за температури 163°C протягом 2 годин. Після прогрівання пластини з бітумом були повторно зважені (рис. 2).

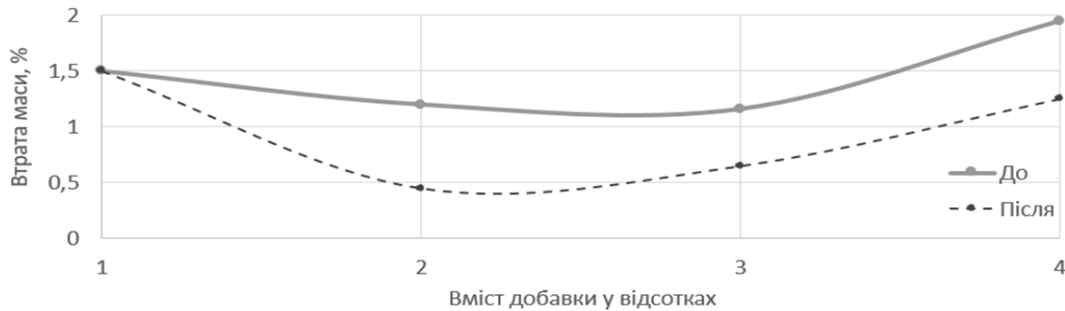


Рис. 2. Втрата маси бітумів після прогрівання

Як видно з рис. 2, при введенні до складу бітуму добавки фібри відбувається скорочення втрати маси в тонких шарах бітуму після прогрівання, тобто відбувається скорочення поверхневого випаровування наявних або утворених при старінні низькокиплячих компонентів нафтового бітуму. Це можна пояснити тим, що при введенні добавок відбувається виникнення нових структурних зв'язків, зокрема і в низькокиплячих фракціях нафтового бітуму, що сприяє збільшенню кількості асфальтенів і смол за рахунок зменшення маслянистої складової.

Отже, можна зробити висновок, що активні групи, які входять до складу комплексного модифікатора – епоксидної смоли та фібри, здатні сповільнювати процеси термоокислювальної деструкції, які відбуваються під час експлуатації бітуму, що представляє їхнє використання як інгібіторів окислювальних процесів.

Аналіз представлених результатів свідчить про зміну не тільки складу модифікованого бітуму, але і його просторової структури. Встановлено, що введення епоксидної смоли та фібри різної кількості призводить до зменшення складової частини парафінових часток. При порівнянні результатів очевидно, що більш ефективно на зміну групового складу бітуму впливає кількість добавок: епоксидної смоли – 2,5 % і фібри – 4,0 %. Для встановлення процесів, що приводять систему композита до стану рівноваги, та визначення зміни структури бітуму було визначено зміну його твердості з різним вмістом добавок в інтервалі температур від 0°C до 30°C та встановлювалися закономірності зміни властивостей композитів. Термостатування проводили на водяній бані, з підтриманням заданої температури протягом 1 години. Згідно з цим, енергію активації бітумів наведено на рис. 3.

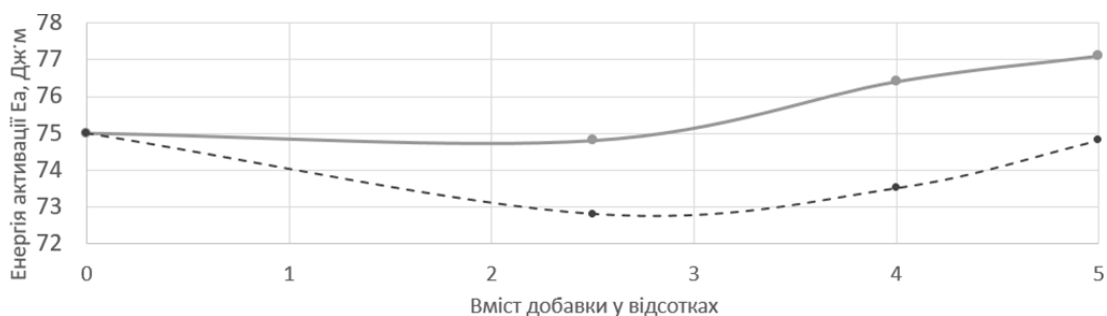


Рис. 3. Енергія активації E_a бітуму (класичного) і модифікованого бітуму епоксидною смолою та фіброю

Спостережуване зменшення енергії активації при введенні 2,0 % епоксидної смоли та фібри могло статися при розриві міжмолекулярних водневих або π -зв'язків у молекулярній підсистемі асфальтенів. Відповідно, загальне зниження енергії активації після введення модифікаторів можна пов'язати з необоротним розривом цих нековалентних зв'язків у складі модифікованого бітуму.

Аналізуючи дані, наведені на рис. 3, можемо побачити, що комплексний в'язівник дає змогу розширити інтервал робочих температур бітуму, знижуючи температуру його крихкості та підвищуючи температуру його розм'якшення. На рис. 4 видно, що введення 2,0 мас. % епоксидної смоли і 2,0 мас. % фібри дає змогу збільшити інтервал робочих температур на 7–10 %, відповідно. Відомо, що змочування

бітумом мінерального матеріалу є необхідною умовою їх адгезійної взаємодії. Гарне змочування поверхні щебеню сполучною речовиною – одна з необхідних

умов отримання міцного композиційного матеріалу з високими фізико-хімічними властивостями та дозволило запроєктувати склад епоксиального бетону.

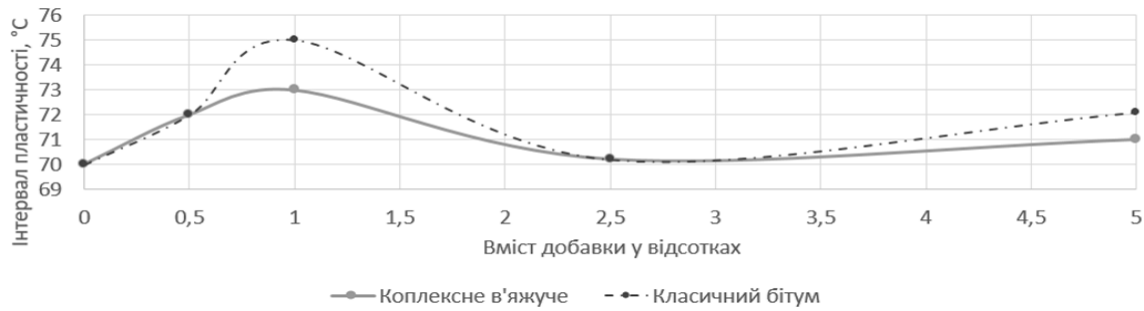


Рис. 4. Вплив виду та кількості добавки на зміну інтервалу пластичності бітуму

Гранулометричні склади сумішей епоксиасфальту були підібрані відповідно до ДСТУ Б В.2.7-119:2011 і знаходяться в межах, визначених для щільного

дрібнозернистого асфальтобетону.

Підібрані склади асфальтобетонних сумішей наведено в табл. 6.

Таблиця 6

Підібрані склади асфальтобетонних сумішей

Компоненти суміші	Кількість, %				
	Базовий асфальтобетон 1	Епоксиасфальт з CHS-Ероху 525	Базовий асфальтобетон 2	Епоксиасфальт з ЕРОХУ «Композит»	Асфальтобетон з епоксиполіуретаном
Щебінь 5-10, %	34	34	40	40	40
Штучний пісок 0-5, %	54	50	47	53	53
Мінеральний порошок, %	6	6	7	7	7
Бітум, %	6	5,25	6	4,71	4,8
Епоксидна смола, %		1,4		1,16	
Епоксиполіуретан, %					0,8
Затверджувач, %		0,35		0,13	0,4
Фібра, %		3,0		3,0	3,0

Склад з епоксиполіуретаном наведено для можливості розширення асортименту застосування епоксидних смол і полімерних речовин на їхній основі для приготування асфальтового бетону.

Підібрані склади вихідних асфальтобетонів та епоксиасфальтів відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-119:2011.

Процес приготування епоксиасфальту складається з таких технологічних операцій:

- дозування і перемішування щебеню, піску і мінерального порошку відповідно до підбраного складу;
- нагрівання мінерального матеріалу до необхідної температури;
- введення в нагрітий до відповідної температури бітум затверджувача з подальшим перемішуванням протягом 5–10 хв;
- введення бітуму разом із затверджувачем у мінеральну суміш із подальшим перемішуванням;
- введення в суміш епоксидної смоли або

епоксиполіуретану з подальшим перемішуванням.

Приготування вихідного асфальтобетону відбувалося за традиційною технологією.

При приготуванні епоксифіброасфальтобетону необхідно чітко дотримуватися температурного режиму нагріву мінеральної суміші та бітуму. Перевищення температури вище за необхідну призводить до швидкого протікання реакції між епоксидною смолою і фіброю і, як наслідок, твердіння суміші та втрати її пластичності (після повторного розпушування суміші епокс-зв'язки руйнуються, і втрачається ефект модифікації).

Висновки

Під час аналізу наукових досягнень у сфері застосування волокнистих наповнювачів у суміші зі смолами, зокрема епоксидними, в асфальтобетонах виявлено недостатнє їхнє вивчення та застосування, що свідчить про необхідність проведення розширених експериментальних робіт із підвищення властивостей

асфальтобетонних сумішей для автомобільних доріг і робить актуальним цей напрямок досліджень.

Особливий інтерес становить введення фібри, отриманої із продуктів горіння вуглеводнів, що має комплексний вплив на властивості дорожнього одягу, а саме: показники міцності, стійкості до пластичних деформацій, водо- та морозостійкості. Під час аналізу літературних джерел розроблено наукову гіпотезу про підвищення якості бітуму та поліпшення властивостей асфальтобетону з використанням епоксидної смоли та фібри із золи виносу теплових електростанцій, введення якої дасть змогу одержати довговічний асфальтобетон. Проведено пошук і досліджено різні комбінації комплексного в'язівника – епоксидної смоли та вуглецевої фібри. Встановлено, що для приготування епоксифіброасфальтобетону потрібен затверджувач, який забезпечує тривалий термін реакції з епоксидною смолою. Наукова гіпотеза підтверджена дослідженнями. Вивчено зміни групового складу бітумів при введенні епоксидної смоли та фібри із отриманої із продуктів горіння вуглеводнів. Уведення та збільшення концентрації цих добавок призводить до зміни групового складу бітуму. Відбувається утворення надмолекулярних елементів дисперсної фази бітуму шляхом агломерації активних груп епоксидної смоли та частинок пилу-вуглецю з асфальтенами з утворенням хімічних зв'язків. Використання вуглецевої фібри у суміші з епоксидною смолою для модифікації бітуму спричиняє скорочення кількості парафінів у бітумі за рахунок перерозподілу водневих зв'язків і звільнення бензолних кілець структурних елементів. Це призводить до збільшення структурованості та термостабільності бітуму. Розрахунок енергії активації показав, що при введенні епоксидної смоли та фібри понад 2,0 та 3,0 мас. %, відповідно, у складі бітуму утворюються протяжні надмолекулярні структури, утворені шляхом агрегації цих добавок.

Більш високі характеристики міцності та деформаційні характеристики епоксифіброасфальтобетону забезпечують значне (у 2–4 рази) підвищення термінів служби дорожніх покриттів і, як результат, істотне зниження витрат на ремонтні роботи. З огляду на те, що вартість не підвищуватиметься, оскільки використовується фібра з продуктів горіння вуглеводнів, його застосування необхідно розширити.

Література

1. Apostolidis, P., Liu, X., Erkens, S. & Scarpas, T. (2020). Oxidative aging of epoxy asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*. Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10298436.2020.1806278>
2. Beranger, J., Rivoir, J., Samano, J. & Vaniscot, J. (1992). *Practical guide to road construction: modified road binders*. Technical Manual TR 9.12 (R). London.: Shell Chemicals, 21.
3. Cong, P., Luo, W., Xu, P., & Zhang, Y. (2019). *Chemical and physical properties of hot-mix epoxy asphalt binders*. *Construction and building materials*, 198, 1-9.
4. Downes, J.W. (1986). *1. Modified binders to the year*

2000. In *6th International Asphalt Conference* (Australia, January 1986) (pp. 35-39). Australia: Sydney.

5. Євдокимов І. Н., Єлісеєв Д. Ю., Єлісеєв Н. Ю. (2002). & Єлісеєв Н. Ю. (2002). *Негативна аномалія в'язкості рідких нафтопродуктів після термічної обробки*. *Хімія і технологія палив і масел*, 3, 26-29.
6. Gong, J., Liu, Y., Wang, Q., Xi, Z., Cai, J., Ding, G., & Xie, H. (2019). *Performance evaluation of warm asphalt mix modified with epoxy asphalt rubbers*. *Construction and Building Materials*, 204, 288-295.
7. Грудніков І.Б. (2001). *Комбіновані дорожні бітуми підвищеної якості*. *Нафтопереробка та нафтохімія*, 4, 34-36.
8. Atynian A., Trykoz, L., Borodin D. *PROTECTION OF RAILWAY INFRASTRUCTURE OBJECTS AGAINST ELECTRICAL CORROSION*. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2021 10c <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ACMM-05-2021-2483/full/html>
9. А.О. Атинян, О.Ю. Сунрун, А.А. Жугло, С.В. Шаповал. *МОДИФІКУВАННЯ НАНОМАТЕРІАЛАМИ НЕОРГАНІЧНИХ В'ЯЗУЧИХ ТА БЕТОННИХ СУМІШЕЙ НА ЇХ ОСНОВІ* *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті. Тези доповідей 9 Міжнародної науково-технічної конференції. с 195-197. Харків 2021. https://eprints.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/13824/1/T_heses_2021_with_title_10.11%20осн.pdf*
10. Herrington, P., Cook, S., Reilly, S., Alabaster, D. & Fussell, A. (2006). *Effect of epoxy-modified bitumen on the cohesive properties of porous asphalt concrete*. Wellington: Central Laboratory of Opus international Consultants Limited, 17 p.
11. Атинян А.О. Прокина К. *Використання новітніх матеріалів при ремонті мостів*. *Матеріали XV всеукраїнської студентської науково-технічної конференції «сталій розвиток міст»*. 23-25с. Харків 2021 <https://eprints.kname.edu.ua>
12. Huang, M. (2019). *Study of the production process of epoxy-emulsified asphalt*. *Digital Manufacturing Transforming Industry Towards Sustainable Growth*, 30, 380-387.
13. Yu, X., Dong, F., Ding, G., Liu, S., & Shen, S. (2016). *Реологічні та мікроструктурні властивості спіненого епоксидного асфальту*. *Будівництво та будівельні матеріали*, 114, 215-222.
14. Маціпура П. А. *Інтенсифікація процесу модифікації бітумів епоксидними сполуками : дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії : 161 – хімічні технології та інженерія (05.17.07 «Технологія палива та паливно-мастильних матеріалів») / Павло Анатолійович Маціпура; Міністерство освіти і науки України, Національний університет “Львівська політехніка”*. – Львів, 2021. – 138 с.

References

1. Apostolidis, P., Liu, X., Erkens, S. & Scarpas, T. (2020). Oxidative aging of epoxy asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*. Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10298436.2020.1806278>
2. Beranger, J., Rivoir, J., Samano, J. & Vaniscot, J. (1992). *Practical guide to road construction: modified road binders*. Technical Manual TR 9.12 (R). London.: Shell Chemicals, 21.
3. Cong, P., Luo, W., Xu, P., & Zhang, Y. (2019). *Chemical and physical properties of hot-mix epoxy asphalt binders*. *Construction and building materials*, 198, 1-9.
4. Downes, J.W. (1986). *1. Modified binders to the year 2000*. In *6th International Asphalt Conference* (Australia, January 1986) (pp. 35-39). Australia: Sydney.
5. Yevdokymov I. N., Yeliseiev D. Yu., Yeliseiev N. Yu. (2002). & Yeliseiev N. Yu. (2002). *Nehatyvna anomaliiha*

- viazkosti ridkykh naftoproduktiv pislia termichnoi obrobky. Khimiia i tekhnolohiia palyv i masel, 3, 26-29.
6. Gong, J., Liu, Y., Wang, Q., Xi, Z., Cai, J., Ding, G., & Xie, H. (2019). Performance evaluation of warm asphalt mix modified with epoxy asphalt rubbers. *Construction and Building Materials*, 204, 288-295.
7. Hrudnikov I.B. (2001). Kombinovani dorozhni bitumy pidvyshchenoi yakosti. *Naftoprerobka ta naftokhimiia*, 4, 34-36.
8. Atynian A., Trykoz, L., Borodin D. PROTECTION OF RAILWAY INFRASTRUCTURE OBJECTS AGAINST ELECTRICAL CORROSION. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2021 10c <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ACMM-05-2021-2483/full/html>
9. A.O. Atynian, O.Iu. Suprun, A.A. Zhyhlo, S.V. Shapoval. MODYFIKUVANNIA NANOMATERIALAMY NEORHANICHNYKh VIAZhUCHYKh TA BETONYKh SUMISHEI NA YiKh OSNOVI Problemy nadiinosti ta dovhovichnosti inzhenernykh sporud i budivel na zaliznychnomu transporti. Tezy dopovidei 9 Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii. s 195-197. Kharkiv 2021. https://eprints.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/13824/1/T_heses_2021_with_title_10.11%20осн.pdf.
10. Herrington, P., Cook, S., Reilly, S., Alabaster, D. & Fussell, A. (2006). Effect of epoxy-modified bitumen on the cohesive properties of porous asphalt concrete. Wellington: Central Laboratory of Opus international Consultants Limited, 17 p.
11. Atynian A.O. Prokyna K. Vykorystannia novitnikh materialiv pry remonti mostiv. Materialy KhV vseukrainskoi studentskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «stalyi rozvytok mist». 23-25s. Kharkiv 2021 <https://eprints.kname.edu.ua>
12. Huang, M. (2019). Study of the production process of epoxy-emulsified asphalt. *Digital Manufacturing Transforming Industry Towards Sustainable Growth*, 30, 380-387.
13. Yu, X., Dong, F., Ding, G., Liu, S., & Shen, S. (2016). Реологічні та мікроструктурні властивості спіненого епоксидного асфальту. *Будівництво та будівельні матеріали*, 114, 215-222.
14. Matsipura P. A. Intensyfikatsiia protsesu modyfikatsii

bitumiv epoksydnymy spolukamy : dysertatsiia na zdobuttia naukovoho stupenia doktora filosofii: 161 – khimichni tekhnolohii ta inzheneriia (05.17.07 «Tekhnolohiia palyva ta palyvno-mastylnykh materialiv») / Pavlo Anatoliiovych Matsipura ; Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, Natsionalnyi universytet "Lvivska politekhnika". – Lviv, 2021. – 138 s. – Bibliohrafiia: s. 114–127.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.М. Шабанова, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.

Автор: АТИНЯН Армен Овікович
кандидат технічних наук, доцент кафедри технології та організації будівельного виробництва
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – armen.atynyan@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6667-6869>

Автор: БУТНИК Світлана Володимирівна
кандидат технічних наук, доцент кафедри технології та організації будівельного виробництва
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – svitlana.butnik@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9737-9421>

Автор: ГОВОРУХА Інна Вікторівна
кандидат технічних наук, доцент кафедри технології та організації будівельного виробництва
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – inna.hovorukha@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0329-2702>

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF PRODUCTION OF EPOXY ASPHALT CONCRETE BY ADDING CARBON ADDITIVES

A. Atynian, S. Butnik, I. Hovorukha

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

Epoxy asphalt concrete is a durable, high-quality material consisting of epoxy resins, hardeners, and the mineral part itself. Accordingly, slow-hardening epoxy asphalt concrete has high physical properties and low sensitivity to temperature changes, which makes it usable as a rigid pavement and applicable even on metal and concrete bridge decks. However, a downside of epoxy asphalt concrete is its ability to gain strength over a long period of operation (up to 1 year). It is a disadvantage when using such coatings in the upper layer of the road surface. In addition, a long period of strength gain during intensive use of the road pavement leads to critical destruction of the pavement itself, plastic deformation, and a reduction in the service life (which may differ much from the standard). Using metal fibre substantially increases the strength and keeps the area from collapsing. The use of metal elements can significantly reduce the performance of the tires of vehicles that will drive on the road and even create a hazard in the event of destruction of the epoxy asphalt concrete area. Using epoxy binders notably increases the strength characteristics of road materials, especially at high temperatures, and boosts their ability to resist rutting. At the same time, the characteristics of epoxy concrete do not decrease during operation and at low temperatures, which indicates the versatility of such a material. The only drawback that cancels out all the positive features of epoxy asphalt concrete is its long strength gain. This disadvantage not only led to the problems mentioned above but also delayed the opening of traffic, which, especially on roads of higher categories, caused traffic disruption and inconvenience to the movement of vehicles. The authors proposed a solution to this problem by developing an improved epoxy asphalt concrete composition by introducing fibre ash into the developed composition as a reinforcing and structuring additive that accelerates the pavement formation time and strengthens the asphalt matrix in epoxy asphalt concrete.

Keywords: epoxy asphalt concrete, additive, fibre, fly ash, combustion products.