

М. О. Сіробаба, аспірант, П. В. Карножицький, канд. техн. наук, доцент

ВПЛИВ ПРИСАДОК НА ВЛАСТИВОСТІ НАФТОВИХ БІТУМІВ: ОГЛЯД СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Національний Технічний Університет «Харківський Політехнічний Інститут», Харків

Ключові слова: бітуми, присадки, полімерні модифікатори, поверхнево-активні речовини, антиоксиданти, пластифікатори, наноматеріали, біополімери, вторинна сировина, асфальтобетон, довговічність покриття.

Вступ. Бітум є незамінним в'язучим матеріалом у дорожньому будівництві завдяки своїй здатності забезпечувати водостійкість, адгезію до мінеральних заповнювачів і пластичність у широкому діапазоні температур. Однак із підвищенням вимог до довговічності покриттів, експлуатаційної надійності та екологічності дорожніх матеріалів, звичайні бітуми дедалі частіше не задовольняють сучасні нормативи.

Одним із найперспективніших напрямів удосконалення властивостей бітуму є використання різноманітних присадок – органічних, неорганічних, полімерних або комплексних – які дозволяють регулювати реологічні, термічні та адгезійні характеристики в'язучого. Залежно від складу та механізму дії, присадки можуть покращувати стійкість бітуму до старіння, підвищувати його еластичність, знижувати температуру укладання, а також сприяти кращому зчепленню з мінеральним скелетом асфальтобетону.

Класифікація присадок до бітуму. Полімерні присадки. Серед полімерних модифікаторів бітуму особливе місце посідають еластомери типу СБС (стирол-бутадієн-стирол), які формують нове покоління модифікованих в'язучих для асфальтобетонних сумішей. Завдяки унікальній структурі, СБС-полімери значно покращують експлуатаційні характеристики бітуму, підвищуючи його температуру розм'якшення, зсувостійкість, опір утворенню колії, а також тріщиностійкість і здатність до відновлення деформацій під дією вагових навантажень. Важливо, що СБС-модифікований бітум зберігає технологічну сумісність із стандартними процесами приготування гарячих асфальтобетонних сумішей, не потребуючи змін температурного режиму. Крім того, такі модифікатори покращують адгезію до мінеральних заповнювачів, сприяють підвищенню загальної міцності покриття, розширюють інтервал пластичності, забезпечують стабільність при зберіганні та мають зручну форму подачі – як у вигляді гранул, так і шляхом безпосереднього дозування в асфальтозмішувальну установку. Середня рекомендована концентрація СБС-присадки становить 7–15 % від маси бітуму, що дозволяє досягти оптимального балансу між покращенням властивостей і економічною доцільністю. У підсумку, СБС-модифікатори відіграють ключову роль у підвищенні довговічності дорожнього покриття та стійкості до кліматичних і механічних навантажень.

Ще одним поширеним типом полімерних присадок до бітуму є етиленвінілацетатні сополімери (ЕВА, EVA – Ethylene Vinyl Acetate). Ці термопластичні матеріали поєднують властивості еластомерів та пластиків, що дозволяє ефективно покращувати термічну стабільність і технологічність асфальтобетонних в'язучих. ЕВА-

модифікатори значно підвищують температуру розм'якшення, покращують стійкість до утворення колій, а також збільшують гнучкість покриття при низьких температурах. Їхнє використання особливо доцільне у регіонах із континентальним кліматом, де асфальтобетон зазнає значних температурних коливань. Важливою перевагою ЕВА є сумісність з нафтовим бітумом без потреби використання дорогих активаторів або додаткових стабілізаторів. Завдяки гарній оброблюваності, ЕВА може легко вводитися як безпосередньо в асфальтозмішувальну установку, так і попередньо змішуватися із бітумом у процесі модифікації на виробництві.

Поверхнево-активні речовини (ПАР). Серед поверхнево-активних речовин (ПАР), які застосовуються як модифікатори бітуму, особливу увагу привертають катіонні добавки, що покращують адгезію між бітумом і мінеральними матеріалами. Згідно з проведеними дослідженнями [1], ПАР-добавки типу АДБІТ-Р та УДОМ-4 у концентрації 0,2–0,4 % сприяють значному підвищенню зчеплення бітуму з інертними заповнювачами. Зокрема, адгезійна здатність з щебенем зросла на 2–5 балів, а зі склом – до 100 % покриття поверхні. Крім того, зазначені ПАР підвищували динамічну в'язкість і уповільнювали процес старіння бітуму: за результатами випробувань після RTFOT-старіння спостерігалось збільшення залишкової penetрації та зниження зміни температури розм'якшення.

Водночас встановлено, що ефективність катіонних присадок може знижуватись під дією високих технологічних температур, особливо після багаторазового нагрівання. Проте застосування вищих концентрацій ПАР дозволяє зменшити цей негативний вплив, зберігаючи позитивний ефект на адгезійні характеристики модифікованого в'язучого. Таким чином, ПАР-присадки є перспективними для створення бітумів із покращеними зчипними властивостями та підвищеною експлуатаційною надійністю.

Антиоксиданти. Одним із ефективних підходів до підвищення стійкості бітуму до старіння є застосування антиоксидантних присадок, які уповільнюють процеси термоокислювальної деградації. Як зазначається в статті, опублікованій у *Advances in Materials Science and Engineering* (2015) [2], включення до бітуму полімерів, посилені антиоксидантами, дозволяє покращити його експлуатаційні характеристики як до, так і після штучного старіння.

Результати дослідження показали, що модифіковані зразки мали *нижчу критичну температуру жорсткості ($G/\sin\delta$)** після RTFOT-старіння – на 3–5 °C менше порівняно з контрольними зразками без присадки, що свідчить про меншу крихкість і більшу тріщиностійкість в умовах низьких температур. Крім того, показник в'язкості при 60 °C для модифікованого бітуму залишався в допустимих межах, що зберігало його технологічність.

У ході випробувань асфальтобетонних сумішей було встановлено, що опір колієутворенню (rutting resistance) покращився на 15–20 %, а відношення міцності до розтягу після впливу води (TSR) зросло з 71 % до 86 %, що вказує на зниження чутливості до вологи. Також було зафіксовано помірне подовження втомного ресурсу, що свідчить про підвищену довговічність покриття при дії циклічних навантажень. Таким чином, автори дослідження підкреслюють доцільність використання антиоксидантів у якості модифікаторів бітуму, особливо для підвищення експлуатаційної надійності покриттів у складних кліматичних умовах.

Пластифікатори. Одним із напрямів регулювання реологічних властивостей дорожнього бітуму є застосування пластифікаторів, які забезпечують зниження в'язкості, покращення оброблюваності та збереження еластичності в'язучого при низьких температурах. До найпоширеніших типів пластифікуючих добавок належать важкі нафтові залишки (такі як вакуумний газойль, екстракти селективного очищення – ТСО), технічні масла та рецикльовані матеріали, зокрема відпрацьовані мастила або залишки полімерної продукції.

З огляду на доступність та економічну доцільність, пластифікатори часто застосовуються не лише як самостійні модифікатори, але й у композиціях з полімерними або поверхнево-активними добавками, де виконують роль носія, стабілізатора або активатора взаємодії між фазами. Таким чином, пластифікатори відіграють важливу роль у формуванні потрібного балансу між технологічністю асфальтобетонної суміші та її довговічністю в умовах експлуатації.

Антипінні та антифрикційні добавки. Антипінні добавки використовуються для запобігання надмірному утворенню піни в бітумі під час його нагрівання, перемішування та транспортування. Піна може утворюватися внаслідок наявності вологи, газів або певних поверхнево-активних домішок, що призводить до нерівномірного розподілу бітуму, зниження якості зчеплення з мінеральним заповнювачем та ускладнення технологічних процесів. Найчастіше як антипінні агенти застосовують силіконові емульсії, поліалкілсилоксани, а також мінеральні та синтетичні масла, які знижують поверхневий натяг і сприяють швидкому руйнуванню бульбашок повітря.

Антифрикційні добавки призначені для зменшення тертя між частинками суміші під час укладання та ущільнення асфальтобетону, що дозволяє знизити енерговитрати та підвищити однорідність шару. У ролі антифрикційних присадок часто використовують органічні модифікатори на основі жирних кислот, восків (наприклад, Fischer-Tropsch восків), а також спеціальних полімерів, які утворюють тонку плівку на поверхні зерен заповнювача. Такі добавки можуть одночасно виконувати функцію пластифікаторів, покращуючи оброблюваність бітуму та знижуючи температуру його укладання.

Застосування антипінних та антифрикційних добавок є доцільним переважно на етапах виробництва та транспортування гарячих асфальтобетонних сумішей, а також при впровадженні технологій теплового асфальту (WMA), де зниження температури приготування і укладання вимагає додаткового контролю реологічних та поверхневих властивостей в'язучого.

Механізм дії присадок. Фізична модифікація структури колоїдної системи. Бітум є складною колоїдною системою, у якій асфальтени перебувають у дисперсному стані, стабілізовані в олійно-смолистій матриці (малтенах). Додавання модифікуючих присадок може змінювати фізичну організацію цієї системи без прямої хімічної реакції з її компонентами. Така модифікація відбувається, коли присадка розчиняється або рівномірно диспергується у бітумі, впливаючи на просторову структуру та взаємне розташування асфальтенових агрегатів.

Наприклад, полімерні модифікатори (СБС, ЕВА, поліетилен) формують у бітумі додаткову тривимірну сітку, яка обмежує рух малтенів і підвищує еластичність матеріалу. Пластифікатори зменшують міжмолекулярні взаємодії, збільшуючи рухливість дисперсної фази та знижуючи в'язкість. ПАР-добавки змінюють міжфазну напругу, спри-

яючи кращому змочуванню мінеральних заповнювачів та рівномірному розподілу бітуму по їх поверхні.

Фізична модифікація структури колоїдної системи, на відміну від хімічної, є зворотним процесом — при видаленні присадки або зміні температури структура може частково повертатися до початкового стану. Саме тому вибір типу і концентрації присадки має бути оптимізованим, щоб забезпечити довготривале збереження бажаних властивостей бітуму під час експлуатації дорожнього покриття.

Хімічна взаємодія з асфальтенами та мальтенами. На відміну від фізичної модифікації, хімічна взаємодія присадок з компонентами бітуму передбачає утворення нових хімічних зв'язків або перебудову існуючих молекулярних структур у колоїдній системі. Асфальтени – це високомолекулярні поліциклічні сполуки з великою кількістю ароматичних кілець і полярних функціональних груп, тоді як малтени складаються переважно з насичених і ароматичних вуглеводнів, смол та масел. Деякі присадки здатні вступати у реакції з цими компонентами, змінюючи їхню молекулярну масу, полярність і здатність до агрегації.

Наприклад, антиоксиданти можуть реагувати з вільними радикалами, що утворюються під час окиснення малтенів, запобігаючи утворенню нових полярних смол та асфальтенів, які підвищують жорсткість бітуму. ПАР-добавки з активними функціональними групами (аміни, аміди, органофосфати) здатні формувати міцні зв'язки з полярними ділянками асфальтенів, стабілізуючи дисперсну фазу та покращуючи адгезію до мінеральних поверхонь. У випадку полімерних модифікаторів можливі реакції зшивання між макромолекулами полімеру та функціональними групами смолисто-асфальтенової фази, що призводить до утворення більш стійкої та еластичної структури.

Хімічна взаємодія забезпечує більш тривалий і стабільний ефект модифікації, оскільки утворені зв'язки не руйнуються при зміні температури або в процесі механічного впливу. Проте цей підхід вимагає ретельного підбору присадки, щоб уникнути небажаних побічних реакцій, які можуть знизити довговічність бітуму або погіршити його сумісність з іншими компонентами асфальтобетонної суміші.

Методи оцінки ефективності присадок. Вплив модифікуючих присадок на властивості бітуму та асфальтобетонних сумішей оцінюють за допомогою комплексу стандартних і спеціалізованих випробувань, спрямованих на визначення змін консистенції, теплостійкості, реологічних характеристик та механічної міцності.

Одним із базових параметрів є пенетрація – глибина проникнення стандартної голки в бітум під дією постійного навантаження при температурі +25 °С. Цей показник характеризує консистенцію матеріалу, а його зміна після введення присадки свідчить про зміну твердості та пластичності в'язучого. Іншим важливим показником є температура розм'якшення, що визначається методом КіК (кільце й куля) та відображає теплостійкість бітуму: підвищення цього значення зазвичай вказує на покращення деформаційної стійкості при високих температурах.

З графіку на рисунку 1 показано, як температура розм'якшення значно зростає зі збільшенням вмісту СБС-модифікатора, підтверджуючи фізичну модифікацію структури в'язкої матриці бітуму. Як видно на графіку, температура розм'якшення зростає зі збільшенням вмісту СБС, особливо в межах 5–12 % модифікатора [3–5].

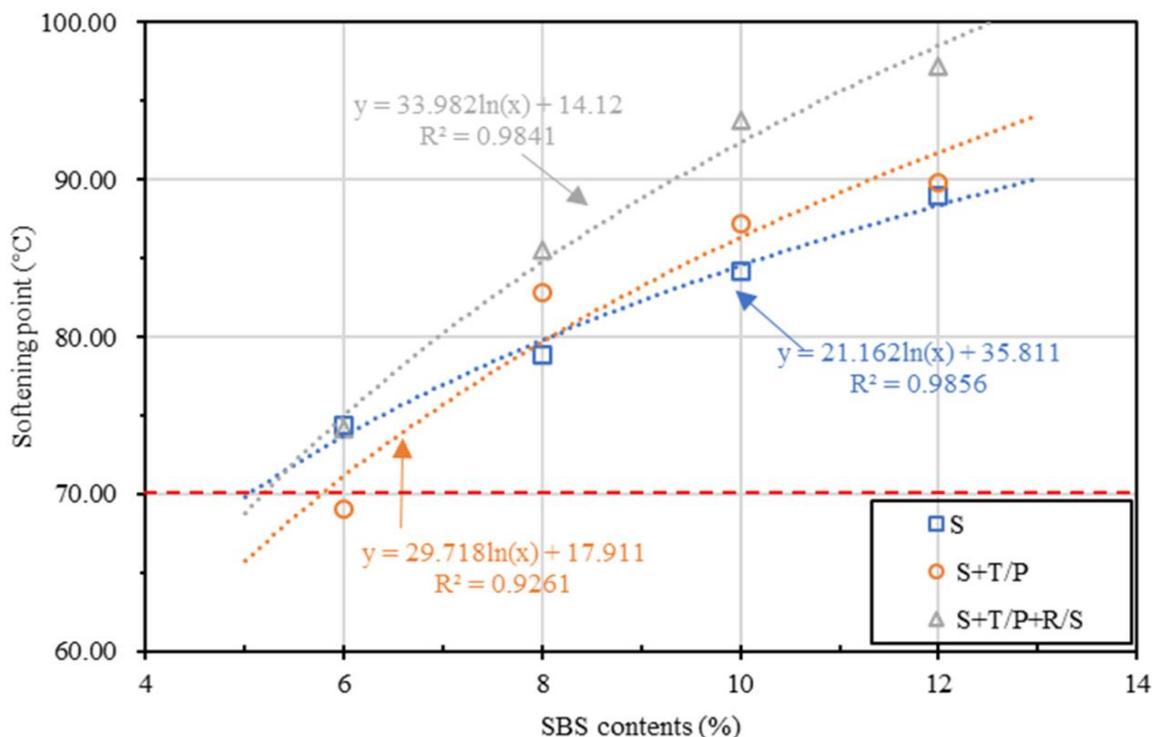


Рисунок 1 – Графік залежності температури розм'якшення від вмісту СБС-модифікатора

Для оцінки довговічності та стійкості до старіння застосовують методи RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) та PAV (Pressure Aging Vessel). RTFOT моделює короткострокове старіння, яке відбувається під час приготування та укладання асфальтобетонної суміші, тоді як PAV імітує довготривале старіння під впливом кліматичних факторів протягом декількох років експлуатації. Порівняння властивостей бітуму до та після цих тестів дозволяє оцінити ефективність присадок у запобіганні окисненню та втраті еластичності.

Реологічні властивості бітуму визначають шляхом вимірювання в'язкості. Використання ротаційних віскозиметрів типу Brookfield дозволяє оцінити технологічність в'язучого при робочих температурах, тоді як динамічний зсувний реометр (DSR) дає можливість аналізувати комплексний модуль (G^*) і фазовий кут (δ) у широкому діапазоні температур і частот, що особливо важливо для оцінки опору колієутворенню та втомним руйнуванням.

Для перевірки впливу присадок безпосередньо на асфальтобетонну суміш застосовують тест Маршалла, який визначає стабільність і пластичність зразків, та випробування на непряме розтягування (Indirect Tensile Strength, ITS), яке характеризує водостійкість і міцність при низьких температурах. У деяких випадках додатково проводять випробування на опір колієутворенню (Hamburg Wheel Tracking Test) та втомну витривалість (Four Point Bending Beam Test).

Комплексне використання цих методів дозволяє не лише кількісно оцінити вплив присадок на властивості бітуму, але й визначити оптимальні концентрації модифікаторів та їхню ефективність у конкретних кліматичних та експлуатаційних умовах.

Сучасні тренди. Розвиток дорожнього будівництва та зростання вимог до довговічності, екологічності та економічної ефективності дорожніх покриттів стимулюють активний пошук нових рішень у сфері модифікації бітумів. Традиційні присадки, що

використовуються десятиліттями, поступово доповнюються інноваційними матеріалами та технологіями, здатними забезпечити кращу адаптацію в'язучого до екстремальних кліматичних умов, інтенсивного транспортного навантаження та вимог сталого розвитку.

У таблиці 1 нижче наведено узагальнення сучасних трендів модифікування бітумів.

Таблиця 1 – Сучасні тренди модифікації бітумів різними присадками

№	Тип присадки / підхід	Основні результати
1	Полімерні модифікатори, дослідження старіння	Використано FTIR-аналіз і реологічні випробування для оцінки змін у полімер-модифікованому бітумі при RTFOT/PAV старінні. Показано зростання кількості карбонільних груп після окиснення, що корелює зі зменшенням еластичності. Запропонована методика дозволяє кількісно прогнозувати втрату властивостей протягом експлуатації.
2	Окислений графен (GO) + поліуретан (PU)	При додаванні 0,5–1,0 % GO до PU-модифікованого бітуму відзначено покращення високотемпературної стійкості (зростання $G^*/\sin \delta$ на 25–30 %), зниження накопиченої деформації в Hamburg Wheel Tracking Test на 40 % і підвищення опору старінню (менше зниження пенетрації після PAV).
3	SBS + порошок кісток + відпрацьована олія	Додавання 3–5 % порошку кісток та 5 % відпрацьованої олії у поєднанні з 4 % SBS призвело до зростання показників PG (з PG 64-22 до PG 70-28). Такі зразки показали збільшення втомної витривалості (на ~35 %) та покращену еластичність при низьких температурах.
4	Графенові нанопластики (різні розміри)	При концентрації 0,3–0,7 % GNP реєстрували значне підвищення комплексу G^* на високих температурах. Великі нанопластики (5–10 μm) дали приріст стійкості до колієутворення на 20–25 % порівняно з дрібними. Встановлено, що форма і розмір нанопластин прямо впливають на дисперсію та ефективність.
5	SBR + графенові матеріали	Композиція SBR (4 %) з графеном (0,5 %) підвищила rutting factor ($G^*/\sin \delta$) у середньому на 45 %. Водночас стабільність при зберіганні залишалася в межах стандартів, а низькотемпературні показники (ΔT_c) не погіршилися. Такі системи показали баланс між високотемпературною стійкістю й еластичністю.

Наноприсадки. Сучасні дослідницькі тренди у сфері модифікації бітуму активно звертаються до нанотехнологічних добавок, які завдяки своїй дуже малій розмірності та великій питомій поверхні здатні суттєво поліпшувати механічні, реологічні та довговічні характеристики дорожніх покриттів. Такі наноприсадки, як наноглина або графен-набери, демонструють багатофункціональну ефективність завдяки фізичній взаємодії з бітумною матрицею, що відкриває перспективи для створення високоміцних, стійких до старіння і самовідновних асфальтобетонних матеріалів.

Дослідження показують, що наноглина суттєво покращує жорсткість бітуму, знижує вразливість до деформацій і покращує опір старінню завдяки утворенню в структурі тонких, добре розподілених шарів, які підсилюють колоїдну систему бітуму [6]. Водночас графенові нанопластили (GNP) (рисунок 2) у концентрації близько 0,5 % (від маси бітуму) продемонстрували значне підвищення жорсткого модуля при температурі +5 °С, +25 °С та +40 °С – на 15 %, 36 % та 54 % відповідно, а довговічність (fatigue life) асфальтобетону збільшилась на 55 % у порівнянні з традиційними сумішами. До того ж показник міцності при розтягу (ITS) зріс на 23 % у сухому стані й на 38 % – у вологому, що свідчить про зниження чутливості до вологи [7].

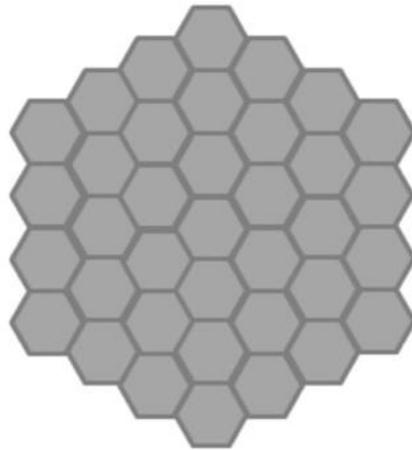


Рисунок 2 – Графенова нанопластили (GNP)

Біополімери та вторинна сировина. Використання біополімерів і вторинної сировини у модифікації бітумів є одним із сучасних напрямів розвитку дорожнього будівництва, що поєднує підвищення експлуатаційних властивостей покриття з екологічною доцільністю. Біополімери, такі як лігнін, крохмаль, целюлозні волокна або природні смоли, здатні частково замінювати традиційні нафтохімічні полімери. Вони покращують адгезію, знижують температуру укладання та підвищують стійкість покриття до утворення тріщин при низьких температурах.

Вторинна сировина, наприклад, подрібнені поліетиленові відходи, поліпропілен, гумова крихта з відпрацьованих шин, або навіть відпрацьовані мастила, широко застосовується як пластифікуючий чи зміцнювальний компонент. Такі модифікатори дозволяють зменшити собівартість асфальтобетонних сумішей і водночас частково вирішують проблему утилізації відходів. Дослідження показують, що додавання гумової крихти у кількості 10–20 % від маси бітуму здатне суттєво підвищити опір колієутворенню та довговічність покриття, тоді як поліетиленові чи поліпропіленові відходи сприяють збільшенню теплостійкості та зниженню водочутливості асфальтобетону [8].

Висновки. Огляд літератури та сучасних досліджень свідчить, що присадки до бітуму відіграють ключову роль у підвищенні довговічності та експлуатаційних властивостей дорожніх покриттів. Кожен клас модифікаторів має власний механізм дії, основні переваги, недоліки та сфери найбільшої ефективності. Характеристику кожного класу присадок, які було розглянуто, наведено, у таблиці 2 нижче.

Таблиця 2 – Характеристики різних типів присадок

Клас присадок	Основні переваги	Обмеження / недоліки	Сфера найбільшої ефективності
Полімерні (СБС, ЕВА, ПЕ)	Підвищують еластичність і тріщиностійкість Збільшують інтервал пластичності Покращують стійкість до колієутворення	Висока вартість Потреба в ретельному дозуванні	Інтенсивний рух, холодні та спекотні кліматичні умови
ПАР (катионні, аміни, фосфати)	Покращують адгезію з мінеральним матеріалом Знижують водочутливість	Обмежена ефективність при високих температурах Можливість зниження ефекту з часом	Регіони з високою вологістю, покриття з гранітними заповнювачами
Антиоксиданти (феноли, аміни)	Уповільнюють окиснення Підвищують довговічність покриття Зменшують крихкість при низьких температурах	Вартість Можливість часткової втрати ефективності при тривалому старінні	Асфальти у кліматичних зонах з різкими перепадами температур
Пластифікатори (ТСО, масла, відпрацьовані мастила)	Знижують в'язкість Зменшують температуру укладання Покращують технологічність	Ризик несумісності Можливість розшарування	Виробництво теплового асфальту, економічно обмежені проекти
Антипінні та антифрикційні добавки	Запобігають утворенню піни Зменшують тертя при ущільненні Підвищують однорідність суміші	Використання здебільшого обмежене технологічним етапом виробництва	Гарячі та теплі асфальтобетонні суміші, заводські процеси
Наноматеріали (наноглина, графен)	Покращують жорсткість і міцність Підвищують опір старінню та волозі Дозволяють зменшити кількість традиційних полімерів	Висока вартість Потреба у спеціальних технологіях диспергування	Високонавантажені автомагістралі, інноваційні проекти
Біополімери та вторинна сировина	Екологічність Зменшення собівартості Переробка відходів	Варіативність якості вторинних матеріалів Потреба у стандартизації	Проекти із фокусом на сталість і «зелені» технології

Література

1. Ковальчук В. І., Поліщук Ю. О. Вплив поверхнево-активних речовин на адгезійні властивості дорожніх бітумів. *Автошляховик України*. 2018. № 2. С. 28–33. URL: [https://nidi.org.ua/files/upload/Автошляховик%20%20України%20_2018%20№%](https://nidi.org.ua/files/upload/Автошляховик%20%20України%20_2018%20№%20).
2. Dessouky S., Pias M., Park D.W., Kim I. T. Influence of antioxidant-enhanced polymers in bitumen rheology and bituminous concrete mixtures mechanical performance. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2015. Iss.1. ID статті 214585. 9 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/214585>.
3. Al-Hadidy A. I., Yi-Qiu T., Al-Mashakbeh A. Effects of used lubricating oil and crumb rubber on properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*. 2017. No. 152. P. 891–902.
4. Галкін А. В., Пиріг Я. І. Огляд бітумних в'язучих, що використовуються в Україні. *Дороги і мости*. 2021. №. 23. С. 60–75.
5. Li Y., Jiang G., Yan S., Feng J., Li D. Performance and mechanism of high-viscosity and high-elasticity bitumen (HVE-MB) modified with five additives. *Sustainability*. 2023. No. 15(19), P. 14089.
6. Arabani M., Mirabdolazimi S. M., Hamed G. H. Sustainable asphalt pavements with nanoclay: Laboratory evaluation of fatigue and rutting performance. *Sustainability*. 2020. No. 12(19). P. 8044.
7. Yusoff N. I. M., Bakar W. A., Hainin M. R., Airey G. D. Evaluation of the effects of graphene-nanoplatelets on the rutting, fatigue performance, and moisture sensitivity of hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*. 2023. No. 392. P. 131918.
8. Pérez I., Pasandín A. R., Pais J. C., Pereira P. A. A. Use of lignin biopolymer from industrial waste as bitumen extender for asphalt mixtures. 2019.
9. Saady M., Guirguis M., Saeed A., Elshenawy A., Elkaramany F., Dawoud N., Darwish M., AbouZeid M. Crumb rubber (CR) and low-density polyethylene (LDPE)-modified asphalt pavement assessment: A mechanical, environmental, and life cycle cost analysis study. *Sustainability*. 2025. No. 17(13). P. 5785.
10. Werkovits C., Pahnke M., Mirwald J., Schirp C. Chemical changes in polymer-modified bitumen during natural and laboratory ageing: A combined analytical study. *Fuel*. 2025. No. 380. P. 127466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.127466>.
11. Guo Y., Li H., Wang L., Zhang J. Synergistic effect of graphene oxide and polyurethane on the rheological properties and aging resistance of asphalt binder. *Scientific Reports*. 2025. No. 15. P. 4567. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86078-9>.
12. Almusawi A. A., Mohammed A. H., Hameed A. A., Kadhim A. Multi-component modification of asphalt binders using SBS, animal bone powder and waste cooking oil. *Buildings*. 2025. No. 15(3). P. 306. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15030306>.
13. Almashaqbeh H. A., Qasem R., Al-Mistarehi A. H. Effect of graphene nanoplatelet size on high-temperature performance of asphalt binder. *Materials and Structures*. 2024. No. 57. P. 302. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02302-4>.
14. Wang Y., Liu Z., Chen H., Zhang P. Storage stability and rutting resistance of SBR/graphene modified asphalt binders. *International Journal of Pavement Engineering*. 2025. Advance online publication. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2025.2523397>.

Bibliography (transliterated)

1. Kovalchuk V. I., Polishchuk Yu. O. Vplyv poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn na adheziini vlastyvoli dorozhnykh bitumiv. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*. 2018. № 2. P. 28–33. URL: https://nidi.org.ua/files/upload/Avtoshliakhovyk%20%20Ukrainy%20_2018%20№%20.
2. Dessouky S., Ilias M., Park D.W., Kim I. T. Influence of antioxidant-enhanced polymers in bitumen rheology and bituminous concrete mixtures mechanical performance. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2015. Iss.1. ID статті 214585. 9 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/214585>.
3. Al-Hadidy A. I., Yi-Qiu T., Al-Mashakbeh A. Effects of used lubricating oil and crumb rubber on properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*. 2017. No. 152. P. 891–902.
4. Halkin A. V., Pyrih Ya. I. Ohliad bitumnykh viazhuchykh, shcho vykorystovuiutsia v Ukraini. *Dorohy i mosty*. 2021. № 23. P. 60–75.
5. Li Y., Jiang G., Yan S., Feng J., Li D. Performance and mechanism of high-viscosity and high-elasticity bitumen (HVE-MB) modified with five additives. *Sustainability*. 2023. No. 15(19), P. 14089.
6. Arabani M., Mirabdolazimi S. M., Hamed G. H. Sustainable asphalt pavements with nanoclay: Laboratory evaluation of fatigue and rutting performance. *Sustainability*. 2020. No. 12(19). P. 8044.
7. Yusoff N. I. M., Bakar W. A., Hainin M. R., Airey G. D. Evaluation of the effects of graphene-nanoplatelets on the rutting, fatigue performance, and moisture sensitivity of hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*. 2023. No. 392. P. 131918.
8. Pérez I., Pasandín A. R., Pais J. C., Pereira P. A. A. Use of lignin biopolymer from industrial waste as bitumen extender for asphalt mixtures. 2019.
9. Saady M., Guirguis M., Saeed A., Elshenawy A., Elkaramany F., Dawoud N., Darwish M., AbouZeid M. Crumb rubber (CR) and low-density polyethylene (LDPE)-modified asphalt pavement assessment: A mechanical, environmental, and life cycle cost analysis study. *Sustainability*. 2025. No. 17(13). P. 5785.
10. Werkovits C., Pahnke M., Mirwald J., Schirp C. Chemical changes in polymer-modified bitumen during natural and laboratory ageing: A combined analytical study. *Fuel*. 2025. No. 380. P. 127466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.127466>.
11. Guo Y., Li H., Wang L., Zhang J. Synergistic effect of graphene oxide and polyurethane on the rheological properties and aging resistance of asphalt binder. *Scientific Reports*. 2025. No. 15. P. 4567. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86078-9>.
12. Almusawi A. A., Mohammed A. H., Hameed A. A., Kadhim A. Multi-component modification of asphalt binders using SBS, animal bone powder and waste cooking oil. *Buildings*. 2025. No. 15(3). P. 306. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15030306>.
13. Almashaqbeh H. A., Qasem R., Al-Mistarehi A. H. Effect of graphene nanoplatelet size on high-temperature performance of asphalt binder. *Materials and Structures*. 2024. No. 57. P. 302. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02302-4>.
14. Wang Y., Liu Z., Chen H., Zhang P. Storage stability and rutting resistance of SBR/graphene modified asphalt binders. *International Journal of Pavement Engineering*. 2025. Advance online publication. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2025.2523397>.

УДК 665.775:66.095.26

М. О. Сіробаба, аспірант, П. В. Карножицький, канд. техн. наук, доцент

**ВПЛИВ ПРИСАДОК НА ВЛАСТИВОСТІ НАФТОВИХ БІТУМІВ:
ОГЛЯД СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Стаття присвячена систематичному огляду сучасних підходів до модифікації нафтових бітумів різними класами присадок з метою підвищення довговічності та надійності дорожніх покриттів (УДК 665.775:66.095.26). Розглянуто класифікацію та функціональне призначення основних груп добавок: полімерні модифікатори (СБС, ЕВА, ПЕ), поверхнево-активні речовини (ПАР), антиоксиданти, пластифікатори, а також технологічні антипінні та антифрикційні агенти. Окрему увагу приділено інноваційним трендам — наноматеріалам (наноглина, графен) та використанню біополімерів і вторинної сировини.

Показано, що полімерні присадки формують у в'язучому просторову сітку, яка одночасно підвищує температурну стійкість, еластичність і тріщиностійкість без істотних змін стандартних температурних режимів приготування сумішей. Для ПАР наведено експериментальні дані про зростання адгезії бітум–мінеральний матеріал за малих дозувань (0,2–0,4 %), стабілізацію в'язкості та стримування термоокиснювального старіння. Антиоксиданти продемонстрували зниження критичної температури жорсткості після RTFOT/PAV, покращення параметрів опору колієутворенню та водочутливості (зростання TSR), що підтверджує їхню ефективність у зниженні швидкості деградації в'язучого. Пластифікатори (ТСО, вакуумний газойль, технічні масла та рецикляти) забезпечують зменшення в'язкості та зниження температур укладання (на 10–15 °С за дозувань 5–15 %), за умови сумісності з колоїдною структурою бітуму.

Розділ про механізми дії зіставляє фізичну модифікацію (розподіл, диспергування, зниження міжфазної напруги) з хімічними взаємодіями (зв'язування радикалів антиоксидантами, утворення міцних зв'язків ПАР з полярними фрагментами асфальтенів, можливе часткове зшивання полімерів). Методичний блок охоплює ключові випробування: penetрацію, температуру розм'якшення (кільце–куля), в'язкість (Brookfield, DSR), старіння (RTFOT/PAV), а також тести сумішей (Marshall, ITS, Hamburg), і містить приклад графічної залежності «вміст СБС — температура розм'якшення».

У блоці «Сучасні тренди» узагальнено результати новітніх досліджень щодо наноглини та графенових нанопластин (підвищення G^* , опір колієутворенню, покращення втомної витривалості), а також застосування біополімерів і вторинної сировини як шляху до зменшення вуглецевого сліду та вартості матеріалів. Завершальні висновки підкреслюють доцільність багатокомпонентної модифікації та необхідність стандартизації сумісності інноваційних присадок із рециклованими компонентами.

Ключові слова: бітуми, присадки, полімерні модифікатори, поверхнево-активні речовини, антиоксиданти, пластифікатори, наноматеріали, біополімери, вторинна сировина, асфальтобетон, довговічність покриття.

M. O. Sirobaba, P. V. Karnozhytskyi

INFLUENCE OF ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF PETROLEUM BITUMENS: A REVIEW OF CURRENT RESEARCH

This article presents a systematic review of contemporary approaches to modifying petroleum bitumens with various classes of additives in order to enhance the durability and reliability of road pavements (UDC 665.775:66.095.26). The classification and functional roles of the main groups of additives are considered: polymer modifiers (SBS, EVA, PE), surface-active agents (surfactants), antioxidants, plasticizers, as well as process-oriented antifoaming and antifriction agents. Particular attention is paid to innovative trends – nanomaterials (nanoclay, graphene) and the use of biopolymers and recycled raw materials.

It is shown that polymer additives form a spatial network within the binder that simultaneously increases thermal stability, elasticity, and crack resistance without significant changes to standard hot-mix production temperatures. For surfactants, experimental data demonstrate increased adhesion at the bitumen–mineral interface at low dosages (0.2–0.4 %), viscosity stabilization, and suppression of thermo-oxidative aging. Antioxidants reduce the critical stiffness temperature after RTFOT/PAV, improve rutting resistance and moisture susceptibility (higher TSR), confirming their effectiveness in slowing binder degradation. Plasticizers (selective extraction oils – TSO, vacuum gas oil, technical oils, and recyclates) reduce viscosity and lower laying temperatures (by 10–15 °C at 5–15 % dosages), provided compatibility with the bitumen’s colloidal structure is ensured.

The mechanisms section contrasts physical modification (dispersion, distribution, reduction of interfacial tension) with chemical interactions (radical scavenging by antioxidants, formation of strong bonds between surfactants and polar asphaltene fragments, and potential partial crosslinking of polymers). The methodological block covers key tests: penetration, softening point (ring-and-ball), viscosity (Brookfield, DSR), aging (RTFOT/PAV), as well as mixture tests (Marshall, ITS, Hamburg), and includes an example of a graphical dependence “SBS content vs. softening point.”

The “Modern Trends” section summarizes recent findings on nanoclay and graphene nanoplatelets (increases in G^* , improved rutting resistance, enhanced fatigue performance), as well as on biopolymers and secondary raw materials as a pathway to reducing carbon footprint and material costs. The concluding remarks emphasize the advisability of multicomponent modification and the need to standardize compatibility of innovative additives with recycled constituents.

Keywords: bitumen, additives, polymer modifiers, surface-active agents, antioxidants, plasticizers, nanomaterials, biopolymers, secondary raw materials, asphalt concrete, pavement durability.