УДК 625.7
UDC 625.7

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-041-050

ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ТЕПЛОГО АСФАЛЬТОБЕТОНУ

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF WARM ASPHALT CONCRETE

***Бондаренко Людмила Петрівна**, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: luda_bond@ukr.net, тел.+380442803942,*

https://orcid.org/0000-0002-8239-065X

***Крюковський Олександр Миколайович,** аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету, e-mail: kriukovsky@gmail.com, тел.+380442803942*

https://orcid.org/0009-0009-7730-0486

Анотація. Оцінка життєвого циклу (ОЖЦ) – це системна методологія, яка використовується для оцінки потенційного впливу на навколишнє середовище та пов'язана з усіма етапами виробництва продукту або системи. Основна мета ОЖЦ полягає у комплексному вивченні та документуванні екологічних аспектів і потенційного впливу продукту, процесу чи послуги на навколишнє середовище протягом усього життєвого циклу – від видобутку сировини до утилізації. Це дозволяє виявити можливості для зменшення впливу, покращити екологічний профіль продукту, підтримати екосертифікацію та прийняття обґрунтованих рішень.

У статті розглядається оцінка життєвого циклу теплого асфальтобетону як сучасної альтернативи традиційному гарячому асфальтобетону. Для об'єктивного оцінювання ефективності технологій теплого асфальтобетону проаналізовано повний життєвий цикл дорожнього покриву, що включає у себе основні його етапи: добування та транспортування сировини, виготовлення суміші, її транспортування і укладання, експлуатацію, технічне обслуговування, а також утилізацію або рециклінг матеріалу. В роботі досліджені основні процеси життєвого циклу теплого асфальтобетону та визначені переваги і недоліки на кожному етапі. Особливу увагу приділено перевагам технології теплого асфальтобетону з точки зору зниження енергоспоживання та викидів парникових газів. Наведено рівняння термодинамічної рівноваги для визначення енергоспоживання під час виготовлення асфальтобетонних сумішей. Проаналізовано вплив основних етапів життєвого циклу асфальтобетону на навколишнє середовище. Визначено чинники, що стримують широке впровадження технологій теплого асфальтобетону в Україні.Проведено порівняння існуючих технологій виготовлення асфальтобетонів, визначено основні проблеми та сформульовано рекомендації щодо впровадження

теплих асфальтобетонів у дорожньому будівництві. Оцінка за методологією життєвого циклу підтвердила, що впровадження теплого асфальтобетону дозволяє досягти суттєвого зниження загального вуглецевого сліду дорожнього покриву без втрати його експлуатаційних властивостей.

Ключові слова. Асфальтобетонна суміш, **т**еплий асфальтобетон, гарячий асфальтобетон, життєвий цикл, екологічна оцінка, енергоефективність, дорожній покрив, викиди CO_2, декарбонізація дорожнього будівництва, повторне використання матеріалів, рециклінг.

Вступ. У сучасних умовах впровадження сталого розвитку, глобального потепління та посилення екологічних вимог як на національному, так і на міжнародному рівнях, дорожнє будівництво зазнає суттєвих трансформацій. У центрі уваги опиняються не лише техніко-економічні показники дорожніх покривів, а й їхній вплив на довкілля протягом усього періоду існування — від видобування сировини до утилізації або повторного використання матеріалів. Саме тому дедалі більшої актуальності набуває впровадження нових, екологічно орієнтованих технологій, що дозволяють знизити рівень енергоспоживання, зменшити викиди парникових газів і зберегти природні ресурси.

Одним із перспективних напрямів у цій галузі є застосування теплого асфальтобетону — технології, яка передбачає зниження температури виготовлення та укладання асфальтобетонної суміші на 20–40 °С порівняно з традиційним гарячим асфальтобетоном. Такий підхід забезпечує не лише покращення умов праці дорожніх робіт і подовження будівельного сезону, а й сприяє зменшенню споживання палива, викидів CO_2 та інших шкідливих речовин в атмосферу.

Разом з тим, для об’єктивного оцінювання ефективності технологій теплого асфальтобетону недостатньо обмежуватись аналізом окремих характеристик, таких як зниження температури чи витрати енергії на виготовлення. Необхідно розглядати повний життєвий цикл дорожнього покриву — комплексну методологію, яка враховує всі етапи: добування та транспортування сировини, виготовлення суміші, її транспортування і укладання, експлуатацію, технічне обслуговування, а також утилізацію або рециклінг матеріалу.

Проведення оцінки життєвого циклу дає змогу визначити реальні переваги або недоліки тієї чи іншої технології з урахуванням впливу на довкілля, енергозатратність, тривалість експлуатації, технічне обслуговування та інші чинники. Це особливо важливо в контексті інтеграції України у європейське інфраструктурне середовище, де подібні підходи вже стали нормою під час розроблення дорожніх проєктів.

Таким чином, проведення оцінки життєвого циклу теплого асфальтобетону є надзвичайно актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору, адже дозволяє приймати більш зважені рішення щодо впровадження нових матеріалів і технологій у дорожнє будівництво.

Постановка проблеми. Технології теплих асфальтобетонів вже стали частиною стандартної практики в США, Канаді, країнах Європейського Союзу (Німеччина, Франція, Швеція, Нідерланди)**.** У США, згідно з даними National Asphalt Pavement Association, понад 40% всіх сумішей у 2022 році виготовлялись за технологією теплого асфальтобетону [1].

В Україні застосування теплих асфальтобетонів перебуває на стадії впровадження. Використання технології відбувається переважно в рамках пілотних або демонстраційних проєктів за участю міжнародних підрядників або донорських організацій (наприклад, у проєктах реконструювання доріг за підтримки ЄБРР та Світового банку).

Дослідженню методичних засад оцінки ефективності використання теплих асфальтобетонів присвячені наукові праці таких вітчизняних вчених: Савенко В.Я., Мудриченко А.Я., Радовский Б.С, Кіщинський С.В., Кириченко Л.Ф., Копинець І. В. та ін. Науковці розглядають теплу технологію як перспективну альтернативу традиційним гарячим асфальтобетонам, які дозволять знизити енергоспоживання, скоротити викиди парникових газів та покращити умови праці під час укладання дорожнього полотна. [2-6] Але, попри значні напрацювання в частині окремих показників, таких як: температура ущільнення, щільність, тріщиностійкість або економічна доцільність впровадження, сучасні дослідження потребують системного підходу, що враховує весь життєвий цикл дорожнього

покриву: від отримання ресурсної бази, транспортування сировини та виготовлення суміші до експлуатації, ремонту та рециклінгу.

Отже, не враховуючи потенційні переваги теплих асфальтобетонів, їх широке впровадження стримується рядом чинників:

- недостатня нормативна база в Україні;
- відсутність чітких методик оцінки життєвого циклу дорожніх матеріалів;
- невеликий досвід експлуатації теплих асфальтобетонів в українських кліматичних умовах;
- висока вартість імпортних добавок для теплих асфальтобетонів.

Тому, існує потреба у дослідженні підходів до життєвого циклу теплого асфальтобетону в рамках національних стандартів та проєктування.

Мета роботи. Метою дослідження є проведення оцінки життєвого циклу теплого асфальтобетону з урахуванням екологічних, енергетичних та експлуатаційних параметрів.

Завданнями дослідження є:

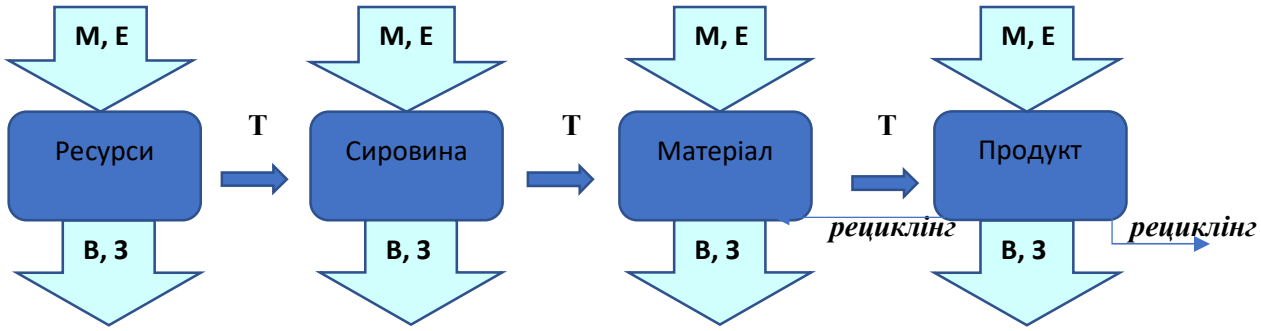
- проаналізувати етапи життєвого циклу теплого асфальтобетону;
- визначити технологічні переваги та потенційні обмеження теплих асфальтобетонів;
- розробити рекомендації щодо впровадження методології оцінки життєвого циклу.

Виклад основного матеріалу дослідження і отриманих результатів. На відміну від традиційного гарячого асфальтобетону, теплий асфальтобетон виготовляється за знижених температур — зазвичай 100–140 °C, залежно від типу технології (органічні добавки, хімічні модифікатори або спінення бітуму) [7]. Таке зниження температури суттєво впливає на реологічні властивості бітумного в'яжучого, проникність суміші, ступінь ущільнення та інші фізико-механічні параметри, які впливають на довговічність дорожнього покриву [6].

У межах дослідження проаналізовано основні фази життєвого циклу теплого асфальтобетону відповідно до методології оцінки життєвого циклу, яка передбачає системний підхід щодо оцінювання впливу матеріалу на довкілля протягом усього періоду його існування — від видобутку сировини до утилізації. [8].

Основні етапи дослідження системи (дорожнього покриву) представлені на рисунку 1. Вони включають чотири фази життєвого циклу дорожнього покриву:

1) ресурси – добування, виготовлення і транспортування ресурсів для сировини;
2) сировина – виготовлення сировини та транспортування до змішувальної установки;
3) матеріал – виготовлення асфальтобетонної суміші на змішувальній установці;
4) продукт – транспортування суміші до будівельного майданчика та будування дорожнього покриву.



Умовні познаки: М — матеріальні потоки, Е — енергетичні потоки, В — відходи, З — забруднення, Т — транспорт.

Рисунок 1 — Фази життєвого циклу теплого асфальтобетону

Figure 1 — Phases of the life cycle of warm asphalt concrete

1. **Фаза добування ресурсів** (щебеню, піску, бітуму, добавок та паливно-енергетичних ресурсів) є початковим етапом життєвого циклу теплого асфальтобетону. Вона включає сукупність процесів, пов'язаних із добуванням, первинним обробленням та транспортуванням природних ресурсів, необхідних для виготовлення компонентів асфальтобетонної суміші. Ця фаза має суттєве екологічне навантаження, зокрема через споживання енергії, утворення викидів та втручання у природні ландшафти.

Однією із переваг цієї фази є не великий обсяг енергії, який компенсується на наступних фазах, а саме: не великі енергетичні витрати на етапах виготовлення й укладання суміші, які знижують загальне навантаження на ресурси; можливість оптимізації постачання ресурсів — наприклад, скорочення потреби в паливі. Наступною перевагою є можливість зменшення загального обсягу видобутих ресурсів завдяки нижчому температурному старінню бітуму, що дозволяє застосовувати повторне використання теплого асфальтобетону — це сприяє зменшенню обсягів первинного видобутку. Використання відновлених добавок є наступною перевагою теплого асфальтобетону: використання біовосків або промислових побічних продуктів (наприклад, з целюлозної або хімічної промисловості) для заміни природних ресурсів.

Недоліком даної фази є значне споживання природних ресурсів. Незважаючи на загальну екологічну ефективність теплого асфальтобетону, на фазі добування ресурсів обсяги використання щебеню, піску, бітуму та пального залишаються значними і майже подібними з гарячим асфальтобетоном. Видобуток ресурсів також супроводжується порушенням ландшафтів, деградацією ґрунтів, шумовим та пиловим забрудненням. Виробництво бітуму і багатьох хімічних добавок для теплого асфальтобетону засноване на нафтопродуктах — це поглиблює залежність від невідновлюваних джерел. Кар'єрні роботи, транспорт, подрібнення, сушка та інші операції потребують великої кількості дизельного пального або електроенергії, що зумовлює високий рівень викидів CO_2 на цьому етапі. У разі імпорту спеціалізованих добавок для теплого асфальтобетону зростають логістичні витрати, а також непрямі екологічні впливи (викиди від транспортування, упаковка, утилізація залишків).

2. Фаза сировина життєвого циклу теплого асфальтобетону характеризується технологічним процесом транспортування компонентів, що значно впливає на якість кінцевого дорожнього покриву. У цій частині дослідження розглянуто основні переваги та недоліки транспортування. Основною перевагою є зниження температурного режиму транспортування за температур 100–140 °C, що на 30–50 °C нижче, порівняно з гарячим асфальтом. Це сприяє зменшенню енерговитрат на підігрів і скорочує теплові втрати під час перевезення. Знижена температура транспортування зменшує ризики термічного ураження працівників, а також знижує інтенсивність випаровування шкідливих речовин (парів бітуму), покращуючи екологічну безпеку. Менша температура зменшує ступінь налипання суміші на металеві поверхні кузовів, що полегшує вивантаження і знижує втрати матеріалу. Завдяки використанню модифікуючих добавок, тепла асфальтобетонна суміш зберігає пластичність довше, що дозволяє перевозити її на відстані до 100 км без суттєвої втрати якості. Загальне зниження температур на всіх етапах виробничо-технологічного циклу сприяє зменшенню викидів парникових газів (CO_2, NO_x) під час транспортування.

Головний недолік під час транспортування теплої асфальтобетонної суміші у прохолодну погоду або за сильного вітру — швидка втрата тепла, що може призвести до зниження її технологічної придатності вже на етапі транспортування. Забезпечення стабільності властивостей суміші потребує використання дорогих хімічних або органічних добавок, що ускладнює логістику постачання та підвищує загальні витрати. В Україні та ряді країн відсутні чіткі ДСТУ або інструкції з транспортування бітуму з теплоактивними добавками, що може ускладнювати логістику та контроль якості. Для збереження температури рекомендується використовувати термоізольовані самоскиди, що не завжди є доступними, особливо у віддалених регіонах. Навіть незначні відхилення від заданих температур можуть негативно вплинути на реологічні властивості суміші, тому під час транспортування необхідне використання термодатчиків або GPS-моніторингу.

3. Фаза матеріал. Тепла асфальтобетонна суміш є композитним будівельним матеріалом, до складу якого входять: мінеральні заповнювачі (щебінь, пісок, мінеральний порошок); бітумне в'яжуче (дорожній бітум, за необхідності модифікований полімером, або використаний у спіненій формі); модифікуючі добавки (органічні воски (наприклад, Sasobit), поверхнево-активні речовини (ПАР), біодобавки). Фізико-хімічна взаємодія між зазначеними компонентами дозволяє забезпечити укладання суміші за знижених температур (100–140 °C), зберігаючи, або навіть покращуючи експлуатаційні характеристики дорожнього покриву. Виробництво теплих асфальтобетонних сумішей здійснюється на асфальтозмішувальних установках аналогічно до традиційних гарячих сумішей, але з дотриманням нижчих температурних режимів.

Переваги. Зниження температури змішування до 100–140 °C дозволяє: зменшити енергоспоживання на заводі (до 30%); знизити викиди CO_2, NO_x та летких органічних сполук; зменшити зношення обладнання шляхом зменшення теплового навантаження (табл. 1). Можливість використання вторинних матеріалів у більшій кількості без втрати якості. Поліпшення умов праці персоналу через зниження рівня температури, шуму та шкідливих парів.

Недоліки. Необхідність адаптації обладнання (наприклад, введення модифікуючих добавок у бітум або змішувач). Вища чутливість щодо дозування добавок — неправильне введення може порушити технологію. Потреба у додатковому контролі температурного режиму, оскільки перевищення або зниження температур може зруйнувати структуру суміші.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика гарячої та теплої асфальтобетонної суміші за основними техніко-екологічними показниками

Table 1 – Comparative characteristics of hot and warm asphalt concrete mix according to the main technical and environmental indicators

Показник	Асфальтобетонна суміш	
	гаряча	тепла
Температура укладання, °C	140–180	100–140
Енергоспоживання, МДж/тонну	~250	~180
Викиди CO_2, кг/тонну	35–40	20–28
Довговічність покриву, років	10–15	12–17
Можливість повторного використання	Обмежена	Вища

Використання теплої асфальтобетонної суміші є перспективним технологічним напрямом, що забезпечує значні переваги в енергозбереженні, екологічності та безпеці виробничих процесів. Однак, для реалізації її потенціалу необхідне забезпечення точного контролю на кожному етапі — від фазового складу та температур змішування до умов транспортування. Переваги теплих асфальтобетонів на етапах виготовлення і транспортування здатні компенсувати потенційні технологічні обмеження за умови дотримання регламентованих температурних та логістичних параметрів.

4. Фаза продукт. Переваги теплого асфальтобетону особливо помітні на етапі укладання. Зниження температури на 20–40 °C призводить до зменшення викидів шкідливих речовин на робочому майданчику, що сприяє покращенню умов праці. Крім того, нижча температура сприяє енергоощадному ущільненню суміші та дозволяє продовжити сезон дорожніх робіт у холодніші періоди. У результаті знижується експлуатаційний тиск на дорожні організації. Теплий асфальтобетон демонструє схожі, або покращені показники довговічності та стійкості до утворення тріщин порівняно з гарячим асфальтобетоном. Наявність добавок забезпечує кращу адгезію між мінеральним скелетом і бітумом, а також знижує ризик відшарування при дії води. Це дозволяє зменшити частоту ремонтів і подовжити міжремонтні інтервали, що позитивно впливає на загальний екологічний баланс. З огляду на кращі адгезійні властивості теплого асфальтобетону, покриви з його використанням легше

піддається рециклінгу. Знижені температури в процесі первинного виготовлення зменшують термічне старіння бітуму, що полегшує його повторне використання. Це зменшує потребу у новій сировині та забезпечує циркулярність у дорожньому будівництві. Наприкінці життєвого циклу матеріал може бути або утилізований, або повторно використаний. Завдяки нижчим ступеням окиснення та старіння, асфальтобетон, виготовлений за технологією теплого асфальтобетону краще піддається вторинній переробці. Це сприяє зниженню кількості будівельних відходів та зменшенню загального впливу на навколишнє середовище.

Таким чином, на кожному із етапів життєвого циклу теплого асфальтобетону ця технологія має як певні переваги, так і недоліки, які проаналізовано та наведено у таблиці (табл.2).

Таблиця 2 – Система життєвого циклу теплого асфальтобетону
Table 2 – Life Cycle System of Warm Asphalt Concrete

Фаза	Процес	Переваги	Недоліки
Ресурси	Добування і виробництво ресурсів для сировини	- менший обсяг енергії, що компенсується на наступних фазах; - можливість зменшення загального обсягу видобутих ресурсів; - інтенсифікація використання відновлюваних/відходних добавок.	- високе споживання природних ресурсів; - залежність від нафтохімічної сировини; - енергомісткість видобутку; - вартість та складність логістики добавок.
Сировина	Транспорту-вання компонентів для суміші асфальто-бетонної	- зниження температурного режиму транспортування; - підвищення безпеки та поліпшення умов праці; - зменшення налипання суміші на транспортні засоби; - можливість транспортування на більші відстані; - екологічна ефективність.	- температурна чутливість до умов довкілля; - висока залежність від модифікуючих добавок; - необхідність спеціального транспорту; - потреба в постійному контролі температурного режиму.
Матеріал	Виробництво асфальто-бетонної суміші Транспорту-вання готової суміші	- зниження температури змішування до 110–140 °C; - можливість використання вторинних матеріалів (РАП); - поліпшення умов праці персоналу.	- вартість добавок; складність контролю їх дозування; - необхідність адаптації обладнання; чутливість до технологічних відхилень; - температурна чутливість; потреба в термоізоляції; - обмежений час укладання.
Продукт	Укладання та ущільнення покриву Експлуатація покриву Ремонт та рециклінг покриву	- енергозбереження; - зменшення викидів забруднюючих речовин; - покращення умов праці; - підвищення гнучкості укладання; - розширення температурного діапазону застосування; - можливість підвищення частки вторинних матеріалів.	- вартість добавок; - висока чутливість до технологічного режиму; - необхідність адаптації обладнання; - обмеження щодо несумісності матеріалів; - залежність від кліматичних умов; - відсутність уніфікованих стандартів.

Таким чином, аналіз життєвого циклу теплого асфальтобетону демонструє, що ключові екологічні та енергетичні переваги зосереджені на етапах виготовлення, транспортування, укладання та рециклінгу. Оцінка за методологією життєвого циклу підтверджує, що впровадження теплого асфальтобетону дозволяє досягти суттєвого зниження загального вуглецевого сліду дорожнього покриву без втрати експлуатаційних властивостей. Урахування цих чинників є критично важливим для переходу до сталої інфраструктури. Загальна сума вуглецевого сліду асфальтобетонного покриву виражається в рівнянні (1) наступним чином:

$$\sum_{i=1}^{n}(CO_2e)i = \sum_{i=1}^{n}(AD_i \cdot x \cdot EF_i \cdot x \cdot G\omega p_i) \quad (1)$$

де CO_2e — викиди вуглецевого еквівалента в результаті однієї процедури асфальтобетонного покриву;
AD _ дані про діяльність;
EF — коефіцієнт викидів вуглецю;
$G\omega\ p$ — потенціал глобального потепління.

Споживання енергії під час виготовлення асфальтобетонної суміші в основному включає споживання палива та електроенергії. Для теплої асфальтобетонної суміші енергоспоживання розраховується з використанням рівнянням термодинамічної рівноваги:

$$M \cdot q \cdot \lambda \cdot \eta = \sum_i c_i m_i \cdot \left(T_f - T_i\right) + c_W m_W \cdot (T_W - T_i) + L_W m_W \quad (2)$$

де M – вага палива (кг); q – теплотворна здатність палива (Дж/кг);
λ – коефіцієнт згоряння; η – коефіцієнт теплообміну обладнання;
n – загальна кількість типів агрегатів; c_i – питома теплоємність i -го агрегату (Дж·кг $^{-1}$ °C);
m_i – вага i -го агрегату (кг);
T_i , T_f – відповідно початкова та кінцева температура агрегату (°C);
c_w – питома теплоємність води (4190 Дж·кг $^{-1}$ °C); m_w – вага води (кг);
T_w – температура кипіння води, 100°C; а L_w – прихована теплота пароутворення (2256 кДж/кг).

Паливо витрачається на нагрівання бітуму та сушіння заповнювача, тоді як будівельна техніка споживає електроенергію. Під час процесу сушіння та нагрівання заповнювача, утворюється велика кількість пилу, тоді як спалювання викопного палива призводить до викидів CO_2 . Крім того, під час змішування компонентів асфальтобетонної суміші виділяється багато шкідливих газів. У таблиці (табл.3) наведено порівняння загального споживання ресурсів під час виготовлення асфальтобетонних сумішей за різними технологіями. Бачимо, що споживання ресурсів для виготовлення теплих асфальтобетонних сумішей на 23,6% менше, ніж під час виготовлення гарячих сумішей.

Таблиця 3 – Індекси життєвого циклу виготовлення 1000 м³ гарячої та теплої асфальтобетонних сумішей.

Table 3 – Life cycle indices for the production of 1000 m³ of hot mix and warm mix asphalt concrete.

Тип споживання/викидів	**Асфальтобетонна суміш**	
	гаряча	**тепла**
Важке мазутне паливо (кг)	12955,44	9900,55
Електрика (кВт·год)	7988,77	6105.02
Дизельне паливо (кг)	291,33	222,63
CO_2 (кг)	45510	18204
NO_X (кг)	147,6	40,44
SO_2 (кг)	108,24	26,84
$PM_{2,5}$ (кг)	10.33	5.38

Отже, теплі асфальтобетонні суміші демонструють значний потенціал для зниження енерговитрат, підвищення екологічної безпеки та покращення умов праці в галузі дорожнього будівництва. Однак для повноцінного впровадження цієї технології необхідне подолання ряду технологічних та економічних бар'єрів, зокрема удосконалення нормативної бази, стандартизація добавок, а також модернізація обладнання.

Висновки і рекомендації. Результати проведеного дослідження підтверджують доцільність та перспективність застосування технології теплого асфальтобетону в умовах України. Зниження температури виготовлення та укладання на 20–40 °С порівняно з традиційними гарячими асфальтобетонними сумішами забезпечує істотне зменшення енергоспоживання та рівня викидів шкідливих речовин, зокрема парникових газів (CO_2, NO_x, SO_2), що має важливе значення в контексті боротьби зі зміною клімату та підвищенням екологічної безпеки. Застосування методології оцінки життєвого циклу дозволяє інтегрувати екологічні аспекти у процес ухвалення інженерних рішень, забезпечуючи комплексне порівняння традиційних і інноваційних дорожньо-будівельних технологій. Аналіз життєвого циклу дозволяє враховувати вплив на довкілля на всіх етапах життєвого циклу: від видобутку сировини до утилізації або повторного використання матеріалів.

З метою забезпечення широкого впровадження теплого асфальтобетону в Україні доцільно реалізувати такі рекомендації:

- розробити та впровадити національні нормативно-технічні документи, що регламентують застосування теплих асфальтобетонів з урахуванням місцевих кліматичних, транспортних та екологічних особливостей. До складу нормативів необхідно включити вимоги щодо енергоспоживання, екологічних характеристик та довговічності покривів;
- ініціювати пілотні проєкти та системні польові випробування з метою оцінки ефективності різних типів добавок і технологічних схем виготовлення теплих асфальтобетонів у реальних умовах експлуатації. Такі дослідження сприятимуть адаптації світового досвіду до українського контексту;
- сформувати національну базу даних параметрів для досліджень життєвого циклу дорожньо-будівельних матеріалів, яка міститиме дані про сировину, енергетичні витрати, викиди, відходи, логістичні ланцюги тощо. Це забезпечить наукову обґрунтованість проєктних рішень та дозволить проводити порівняльний аналіз альтернатив.
- сприяти розвитку внутрішнього ринку добавок для теплих асфалтобетонів, у тому числі шляхом стимулювання імпорту, локалізації виробництва або створення спільних підприємств із провідними світовими виробниками. Це дозволить знизити собівартість технології та підвищити її доступність для дорожньо-будівельних підприємств;
- розгорнути інформаційно-освітні програми для фахівців галузі, спрямовані на поширення знань щодо переваг та особливостей впровадження теплих асфальтобетонів. Така діяльність сприятиме формуванню попиту на екологічно доцільні технології та підвищенню загальної культури управління інфраструктурними проєктами.

Узагальнюючи зазначене, можна стверджувати, що перехід до використання технології теплого асфальтобетону в Україні відповідає сучасним викликам сталого розвитку та інтегрує країну у глобальні тенденції з декарбонізації дорожнього будівництва. Реалізація запропонованих заходів дозволить підвищити екологічну ефективність дорожніх проєктів, зменшити залежність від викопних ресурсів та оптимізувати витрати на експлуатацію дорожньої інфраструктури в середньо- та довгостроковій перспективі.

Подальші наукові дослідження теплих асфальтобетонів повинні бути спрямовані на:оптимізацію складу сумішей під різні кліматичні умови; дослідження довговічності покривів; розробку адаптивних технологічних карт для широкого впровадження теплих асфальтобетонів в практику.

Перелік посилань

1. National Asphalt Pavement Association (NAPA). *Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2022*. DOI:10.13140/RG.2.2.22994.1632

2. С. Кіщинський, Л. Кириченко, І. Волошина, Н. Любченко, Н. Бондар, Е. Гнатюк. Висновок про властивості теплого асфальтобетону McAsphaltEvotherm з добавкою «Evotherm-3G», Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П.Шульгіна, Київ 2009.

3. Мудриченко А.Я., Савенко В.Я Удосконалення технології будівництва асфальтобетонних шарів з використання теплих сумішей. Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». К.: НТУ, 2018. – Вип. 103, С. 075 – 083.

4. Копинець І. В., Соколова О. Б., Соколов О. В., Юнак А. Л. Вплив добавок на основі синтетичних восків на експлуатаційні та технологічні властивості бітумів // Дороги і мости. – 2019. – Вип. 19-20. – С. 107-116.

5. Савенко В.Я., Мудриченко А.Я, Стасюк Т.О. Техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування теплих асфальтобетонних сумішей для улаштування шарів дорожнього одягу Вісник Національного транспортного університету. Випуск 55. Київ, 2023. С. 240 – 246. URL: https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-1-55-240-246

6. Радовський Б.С. Технологія нового теплого асфальтобетону у США, Дорожня техніка, 2008 р.

7. Giani, M.I., et al. *Comparative LCA of warm and hot mix asphalt*. Journal of Cleaner Production, 2015.

8. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.

9. ДСТУ Б В.2.7-119:2011 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови

10. ДСТУ EN 13108-1:2018 Бітумомінеральні суміші. Технічні умови. Частина 1. Асфальтобетон (EN 13108-1:2016, IDT)

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF WARM ASPHALT CONCRETE

Bondarenko Liudmyla P., PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor, National Transport University, Professor of Department of Transport Construction and Property Management, luda_bond@ukr.net, тел.+380442803942, https://orcid.org/0000-0002-8239-065X

Kriukovsky Oleksandr M., postgraduate student of the Department of Transport Construction and Property Management of the National Transport University, e-mail: kriukovsky@gmail.com ,
tel.+380442803942, https://orcid.org/0009-0009-7730-0486

Summary. Life cycle assessment (LCA) is a systematic methodology used to assess the potential environmental impact associated with all stages of the production of a product or system. The main purpose of LCA is to comprehensively study and document the environmental aspects and potential impact of a product, process, or service on the environment throughout its life cycle, from raw material extraction to disposal. This allows opportunities for reducing impact to be identified, the environmental profile of the product to be improved, eco-certification to be supported, and informed decisions to be made.

The article considers the assessment of the life cycle of warm asphalt concrete as a modern alternative to traditional hot asphalt concrete. To objectively evaluate the effectiveness of warm asphalt concrete technologies, the entire life cycle of road pavement is analyzed, including its main stages: extraction and transportation of raw materials, mixture production, transportation and laying, operation, maintenance, and disposal or recycling of the material. The paper examines the main processes of the warm asphalt concrete life cycle and identifies the advantages and disadvantages at each stage. Particular attention is paid to the advantages of warm asphalt concrete technology in terms of reducing energy consumption and greenhouse gas emissions. Thermodynamic equilibrium equations are presented to determine energy consumption during the production of asphalt concrete mixtures. The impact of the main stages of the asphalt concrete life cycle on the environment has been analyzed. Factors hindering the widespread introduction of warm asphalt concrete technologies in Ukraine have been identified. A comparison of existing asphalt concrete manufacturing technologies has been carried out, the main problems have been identified, and recommendations for the introduction of warm asphalt concrete in road construction have been formulated. The life cycle assessment

confirmed that the introduction of warm asphalt concrete allows for a significant reduction in the overall carbon footprint of road pavement without losing its operational properties.

Keywords: Asphalt concrete mix, warm asphalt concrete, hot asphalt concrete, life cycle, environmental assessment, energy efficiency, road pavement, CO_2 emissions, decarbonization of road construction, reuse of materials, recycling.

References

1. National Asphalt Pavement Association (NAPA). Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2022. DOI:10.13140/RG.2.2.22994.1632

2. S. Kishchinsky, L. Kyrychenko, I. Voloshyna, N. Lyubchenko, N. Bondar, E. Hnatyuk. Conclusion on the properties of warm asphalt concrete McAsphaltEvotherm with the additive "Evotherm-3G", State Road Research Institute named after M.P. Shulgin, Kyiv 2009.

3. Mudrychenko A.Ya., Savenko V.Ya. Improvement of the technology of construction of asphalt concrete layers using warm mixtures. Scientific and technical collection “Highways and road construction”. K.: NTU, 2018. – Issue 103, pp. 075 – 083.

4. Kopynets I. V., Sokolova O. B., Sokolov O. V., Yunak A. L. The influence of additives based on synthetic waxes on the operational and technological properties of bitumen // Roads and Bridges. – 2019. – Issue 19-20. – P. 107-116.

5. Savenko V.Ya., Mudrychenko A.Ya., Stasyuk T.O. Feasibility study of the feasibility of using warm asphalt concrete mixtures for arranging road pavement layers Bulletin of the National Transport University. Issue 55. Kyiv, 2023. P. 240 – 246. URL: https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-1-55-240-246

6. Radovsky V.S. Technology of new warm asphalt concrete in the USA, Dorozhnaya tekhnika, 2008.

7. Giani, M.I., et al. Comparative LCA of warm and hot mix asphalt. Journal of Cleaner Production, 2015.

8. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.

9. DSTU B V.2.7-119:2011 Sumishi asfal′tobetonni i asfal′tobeton dorozhniy ta aerodromnyy. Tekhnichni umovy

10. DSTU EN 13108-1:2018 Bituminous mixtures. Technical conditions. Part 1. Asphalt concrete (EN 13108-1:2016, IDT)