

УДК 625.7/.8
UDC 625.7/.8

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-165-183

**СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВТЕПЛИХ СУМІШЕЙ З ВИСОКИМ ВМІСТОМ
АСФАЛЬТОБЕТОННОЇ КРИХТИ**

CURRENT RESEARCH ON HIGH RAP HALF-WARM MIX ASPHALT



Баран Сергій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: baran_serg@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0002-3591-9880>



Андрієвський Ігор Петрович, аспірант, кафедра дорожньо-будівельних матеріалів і хімії Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: kusto2000@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-0444-5954>

Анотація: У статті наведено сучасні дослідження напівтеплих сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти, що свідчить про перспективність застосування напівтеплих сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти, та дає можливість створювати довговічні і ресурсоефективні матеріали. Використання асфальтобетонної крихти крім економить матеріальні та вирішує питання її утилізації і одночасно дозволяє економити енергетичні ресурси та зменшувати шкідливі викиди у навколишнє середовище за рахунок нижчих технологічних температур приготування та влаштування напівтеплих сумішей. Разом з тим, дана технологія ще недостатньо досліджена, особливо у вітчизняній практиці, та потребує лабораторних та натурних експериментальних досліджень з подальшою оптимізацією рецептурних та технологічних параметрів а також отримання математичних моделей залежностей фізико-механічних характеристик напівтеплих сумішей від складових матеріалу та параметрів технології. Актуальними також є дослідження в лабораторних та польових умовах довгострокових якісних характеристик (розрахункові характеристики, стійкість до утворення колійності та атмосферних впливів) сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти.

Ключові слова: напівтеплі асфальтобетонні суміші з високим вмістом асфальтобетонної крихти, регенероване асфальтове покриття, спінений бітум, стійкість до колії, фізико-механічні характеристики.

Вступ. Важливим завданням дорожньої галузі є зниження витрат, у тому числі на матеріали і компоненти асфальтобетонних сумішей, забезпечуючи при цьому необхідні характеристики матеріалів. Одним із способів вирішення такої задачі є використання напівтепліх асфальтобетонних сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти «High Rap Half-Warm Mix Asphalt» (HWMA) це технічний термін, що використовується для опису асфальтобетонних сумішей, які виробляються на тому ж бітумі що і гарячі, за знижених технологічних температур (80-100 °C) без погіршення фізико-механічних характеристик асфальтобетону [1].

Використання старого, в тому числі фрезерованого асфальтобетону, в Україні регламентується ДСТУ EN 13108-8 [2], де встановлено вимоги до регенованого асфальтобетону, його класифікації та властивостей. ДСТУ EN 13108-8 передбачає повернення старого в тому числі фрезерованого асфальтобетону у якості складової мінеральної частини при виробництві гарячих асфальтобетонних сумішей та у холодному фрезерованому матеріалі може використовуватися з бітумними емульсіями чи цементом для створення холодних сумішей. Такі заходи забезпечують економію за рахунок зменшення потреби у первинних матеріалах та екологічність шляхом зменшення відходів. Разом з тим норматив наголошує на важливості контролювання зернового складу, вмісту бітуму, старого матеріалу, а також підборі в'язучого та інших компонентів для нових сумішей з метою забезпечення їх якості і довговічності.

Окрім ДСТУ EN 13108-8 застосування старого асфальтобетону регламентується ДСТУ-Н Б В.3.2-5 [3]. В даному документі старий асфальтобетон визначений як асфальтогранулят - сипучий матеріал, отриманий шляхом механічного подрібнення асфальтобетонного покриття, відноситься до матеріалів групи VI – суміші з асфальтогранулятом, які передбачено використовувати при виконанні робіт з ліквідації вибоїн покриття на автомобільних дорогах III–V категорій, переважно при температурі повітря від 5 °C до мінус 10 °C та при підвищеній вологості повітря. Також даний ДСТУ-Н Б В.3.2-5 встановлює вимоги до сумішей з асфальтогрануляту

На сьогодні можна спостерігати з одного боку, різке зростання цін на енергоносії та сировину, а з іншого – розвиток будівельної галузі, частиною якої є і асфальтова промисловість [4]. Асфальтова промисловість, зокрема, стикається з дедалі більшими викликами щодо економічної прийнятності та скорочення викидів парникових газів, а також поліпшення умов праці. Одним із можливих рішень виявилися теплі асфальтобетонні суміші (WMA), які можна виробляти та ущільнювати при нижчих температурах порівняно з гарячими асфальтобетонними сумішами (HMA) [4].

У вітчизняній нормативній документації відсутній такий термін як «теплі асфальтобетонні суміші», а застосування подібних матеріалів і технологій регламентується ДСТУ-Н Б В.2.7-315 [5] і поширюється на виробництво та застосування асфальтобетонних сумішей за знижених технологічних температур із використанням енергозберігаючих добавок.

Останнім часом, ще одним кроком у напрямку підвищення екологічності дорожнього покриття стало використання напівтепліх асфальтобетонних сумішей (HWMA), які виробляються при температурі від 70 °C до 100 °C без негативного впливу на їхні кінцеві експлуатаційні характеристики. Серед цих методологічних підходів дуже цікавим рішенням для міських доріг або доріг з невеликим трафіком є суміші HWMA, приготовані з використанням традиційної теплої емульсії та нагрітих агрегатів [6].

За даними [7] застосування WMA, і HWMA зменшують шкідливий вплив на працівників та викиди парникових газів, таких як CO₂ також зменшуються викиди інших хімічних забруднювачів, що сприяє поліпшенню якості повітря. При використанні HWMA досягається скорочення викидів CO₂ на 58% та

зменшення частинок SO₂ на 99,9%. Крім того, також можна досягти скорочення споживання викопного палива. Зокрема, з WMA було повідомлено про економію енергії до 35% [8], а з HWMA скорочення споживання енергії до 50% [7]. Також важливою перевагою цих сумішей є те, що на відміну від асфальту холодного змішування, їх механічні характеристики схожі на НМА [7].

Теплий асфальтобетон (WMA) та регеноване асфальтове покриття (RAP) є найвідомішими стійкими матеріалами в асфальтобетонних покриттях. WMA — це не нова концепція, проте нові інновації та збільшення використання WMA були спричинені посиленою увагою до стійких інфраструктурних систем. WMA дозволяє знизити температуру виробництва за допомогою використання воску, води або інших хімічних добавок. Ефекти зниження температури виробництва включають зменшення споживання палива та викидів, поліпшення ущільнення та можливе збільшення концентрації RAP. RAP — це основний перероблений продукт старих асфальтобетонних покриттів, і його використання призводить до зменшення попиту на первинний заповнювач та асфальт. Щорічно в США виробляється понад 100 мільйонів тонн RAP [9].

Матеріали та методи. Методологічною основою виступає науковий підхід до аналізу питань дослідження шляхом огляду публікацій у відкритих джерелах на досліджувану тему. Джерелами дослідження є публікації у відкритих джерелах.

Метою роботи є огляд сучасних досліджень напівтеплих сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти. На сьогоднішній день застосування таких сумішей є актуальним та перспективним завданням, дає можливість створювати довговічні і ресурсоефективні матеріали, але ще недостатньо досліджений, особливо у вітчизняній практиці. Тому даний аналіз спрямований на вивчення закордонного досвіду та формування подальших напрямків досліджень.

Виклад основного матеріалу.

З метою сприяння циркулярній економіці та використанню більш екологічно чистих технологій у будівельному секторі у роботі [1] досліджувалася продуктивність напівтеплого асфальту (HWMA), виготовленого з високими пропорціями регенованого асфальтового покриття (RAP), а саме поведінка HWMA, виготовленої зі 100% RAP і без омолоджувачів, порівнювалася з поведінкою контрольної суміші, тобто HWMA, виготовленої з 0% RAP. Зокрема, проаналізовано енергію ущільнення за допомогою гіраторного компактора, час змішування та температуру, об'ємні властивості, стійкість до пошкоджень від вологи за допомогою непрямих випробувань на розтягування після занурення (ITS), жорсткість на основі модуля пружності, стійкість до постійної деформації за допомогою тестів відстеження коліс та стійкість до втоми за допомогою непрямих випробувань на втоми при розтяг (ITFT). Обидві суміші демонстрували адекватні об'ємні та механічні властивості, але продуктивність HWMA з високим RAP була кращою, ніж у контрольної суміші з точки зору стійкості до постійної деформації в жарких областях.

Автор [1] за результатами роботи звертає увагу на наступне. Під час виробничого процесу необхідно було нагріти бітумну емульсію контрольного HWMA до 80 °C, тоді як для HWMA з високим вмістом RAP бітумнуемульсію нагрівали до 60 °C. Крім того, контрольну суміш ущільнювали за допомогою 150 обертів гіраторного ущільнювача, тоді як для HWMA з високим вмістом RAP використано лише 65 обертів. Це пояснюється бітумом, прикріпленим до заповнювача що зменшує тертя всередині заповнювачів, тим самим сприяючи їхньому ущільненню. Крім того, для контрольної суміші необхідно було додати бітумну емульсію, яка забезпечувала 4,75% залишкового в'язучого; однак для перероблених сумішей необхідно було додати бітумну емульсію яка забезпечувала 1,5% залишкового в'язучого. Таким чином, HWMA з високим вмістом RAP без відновлювачів може бути

виготовлена з використанням меншого вмісту бітуму, меншої енергії на нагрівання та меншої енергії на ущільнення, ніж контрольна HWMA. Така економія енергії та матеріалів може сприяти сталому розвитку. Чутливість сумішей до води була адекватною як у контрольному, так і у випадку HWMA з високим вмістом RAP. Витриманий бітум, що міститься в рециклованій суміші, призвів до того, що високоміцний бітум з високим вмістом рециклованої суміші (HWMA) мав вищу жорсткість, ніж контрольна суміш. Зокрема, HWMA з високим вмістом рециклованої суміші (2,888 МПа) продемонстрував модуль пружності при 20 °С, який був на 45,98% вищим, ніж у контрольній суміші (2,888 МПа для контрольної суміші проти 4,216 МПа для переробленої суміші). Це посилення жорсткості було головним чином відповідальним за кращу стійкість до залишкової деформації суміші HWMA з високим вмістом RAP за будь-яких погодних умов. Фактично, як для помірних, теплих, так і для спекотних зон, суміш, виготовлена зі 100% RAP, підходила б для категорії інтенсивного руху транспорту до T1 (2000 > AADHT ≥ 800). Натомість контрольна суміш могла впоратися з цими вимогами до руху транспорту лише у випадку теплового та помірного клімату, але не в спекотних районах. Після аналізу опору втомі обох сумішей можна зробити висновок, що для HWMA з високим вмістом RAP без охолоджувачів очікується нижча довговічність до втоми. Більша жорсткість цієї суміші також є основною причиною такої поведінки.

Дослідниками [10] виконано систематичний огляд щодо стійкості до втоми асфальтобетонних сумішей, модифікованих RAP, порівняно з традиційними сумішами за допомогою непрямого випробування на розтяг. Отримані дані дають змогу констатувати, що використання відновленого асфальтового покриття (RAP) в асфальтових сумішах має екологічні та економічні переваги, оскільки зменшує залежність від нових заповнювачів і мінімізує будівельні відходи. Однак старе в'язуче в RAP збільшує жорсткість суміші, що може погіршити її втомну міцність. Цей систематичний огляд оцінює вплив вмісту RAP на втомну міцність у порівнянні з традиційними сумішами, зосередившись на непрямому випробуванні на розтяг (IDT) як основному методі оцінки. Відповідно до параметрів рекомендацій щодо систематичних оглядів та метааналізів (PRISMA), було виявлено п'ять досліджень, опублікованих у період з 2014 по 2024 рік, шляхом пошуку в базах даних Web of Science, ScienceDirect, ASCE та Scopus. Якість досліджень оцінювалася за допомогою інструменту Cochrane Risk of Bias. Результати показують, що, хоча RAP підвищує стійкість до колії, вищий вміст (>30%) часто призводить до зниження втомної міцності через затвердіння в'язучого та зниження гнучкості суміші. Включення омолоджуючих речовин, таких як важкі парафінові екстракти, та модифікаторів, включаючи високомодульні агенти, полімери та епоксидні в'язучі, може частково відновити властивості старого в'язучого та поліпшити характеристики. Сталі інновації, такі як промислові побічні продукти на основі лігніну та технології теплового асфальтобетону, є перспективними для досягнення балансу між механічними характеристиками та зменшенням впливу на навколишнє середовище. Різноманітність джерел матеріалів, стратегій модифікації та протоколів випробувань обмежує пряму порівнянність досліджень, що підкреслює необхідність стандартизованих систем оцінки. Загалом, цей огляд підкреслює, що оптимізація вмісту RAP та вибір ефективних стратегій омолодження або модифікації є необхідними для досягнення довговічних, економічно ефективних та екологічно відповідальних асфальтових покриттів. Майбутні дослідження повинні інтегрувати передові лабораторні методи з проектуванням на основі характеристик, щоб забезпечити високий рівень використання RAP без шкоди для стійкості до втоми.

У статті [11] представлено дослідження з виробництва напівтеплого асфальтобетону (HWMA) з використанням регенованого асфальтового покриття (RAP) та порівняння характеристик HWMA і

гарячого асфальтобетону (НМА) з використанням і без використання RAP. Дослідження має на меті зменшити споживання природних агрегатних ресурсів за допомогою використання матеріалів з пошкодженого покриття. Крім того, в ньому обговорюється екологічний/економічний вплив шляхом мінімізації викидів газів та споживання палива, оскільки НВМА можна виробляти при низьких температурах. Було досліджено три типи сумішей. Першою була традиційна гаряча асфальтова суміш (НМА), названа контрольною сумішшю, виготовлена при температурі 155 °С, а другою була суміш, що містила 70 % RAP та 30 % первинного заповнювача і була підготовлена при температурі 155 °С, названа НМА-RAP. Третя суміш була НВМА, яка містила 70% RAP та 30% первинного заповнювача і була приготована при 90 °С, названа НВМА-RAP. НВМА була приготована з використанням в'язучого, модифікованого етоксильованим нонілфенолом (NP9). Випробувані відсотки NP9 становили 10, 15, 20 і 25% від ваги бітуму. Були проведені експериментальні випробування для оцінки інженерних властивостей сумішей. Всі суміші були розроблені за допомогою методу проектування сумішей Маршалла. Були проведені випробування на стабільність і текучість за Маршаллом, випробування на непрямую міцність на розрив (ITS) і випробування на стійкість до колієутворення. Результати показали, що всі суміші досягли меж проектування сумішей Маршалла. Виробництво НВМА-RAP підвищило стабільність за Маршаллом, покращило коефіцієнт Маршалла (MQ) і дещо змінило оптимальний вміст в'язучого (ОАС). Було відмічено значне поліпшення значень ITS для НМА-RAP та НВМА-RAP. Кінцева глибина колії сумішей НВМА-RAP була майже такою ж, як і значення традиційних сумішей. Нарешті, можна зробити висновок, що НВМА-RAP показав такі ж або кращі результати, ніж традиційна суміш. На основі лабораторних випробувань, проведених на трьох різних асфальтових сумішах, можна зробити такі висновки:

- Виробництво НМА-RAP та НВМА-RAP покращило стабільність за Маршаллом. Коефіцієнт Маршалла (MQ) зменшився завдяки підвищенню стабільності та текучості. Це зменшення робить суміш більш стійкою до тріщин.
- Вміст в'язучого дещо змінився як для НМА-RAP, так і для НВМА-RAP.
- Поведінка сумішей НВМА-RAP при випробування на непрямую міцність на розрив (тест ITS) була такою ж, як і поведінка контрольних сумішей та сумішей НМА-RAP.
- Суміші НВМА-RAP так само стійкі до колії, як і традиційні суміші.
- Загалом, НВМА-RAP показали таку ж або кращу поведінку, ніж традиційні суміші.

В іншому дослідженні [12] було оцінено об'ємні характеристики суміші та потенціал утворення тріщин у спіненому теплому асфальтобетоні (WMA), що містить різні кількості регенованого асфальтобетону (RAP). Було виявлено, що підвищена здатність до покриття спіненого в'язучого WMA компенсує зниження температури змішування та ущільнення для WMA. Тому як контрольний НМА, так і спінений WMA демонстрували подібні об'ємні характеристики суміші до певних нижчих температур. Однак було виявлено, що подальше зниження температур змішування та ущільнення для спіненого WMA призводить до неналежного змішування між заповнювачами та спіненым в'язучим. Незважаючи на те, що спінений WMA демонстрував подібні об'ємні властивості до НМА до певної нижчої температури, було виявлено, що їхні характеристики стосовно втомного тріщиноутворення значно відрізнялися. Було виявлено, що спінений WMA виявляє вищу стійкість до тріщин порівняно з НМА в тестах на напівкругове згинання Луїзіани (SCB) та тесті на індекс гнучкості Іллінойсу (I-FIT). Було виявлено, що технологія спіненого WMA підвищує стійкість асфальтових сумішей до тріщин. Навпаки, було виявлено, що вищий вміст RAP у спіненому WMA знижує стійкість асфальтових сумішей до тріщин через включення старого і жорсткішого в'язучого з RAP.

Водночас в роботі [13] наголошують, що екологічна безпека асфальтозмішувальних заводів викликає все більшу занепокоєність через високу температуру виробництва асфальтової суміші, що призводить до значного споживання енергії та викидів забруднюючих речовин в атмосферу. Саме тому багато досліджень у всьому світі зосереджуються на зниженні температури змішування асфальту за допомогою використання теплих, напівтеплих і холодних сумішей. Одним з найуспішніших напрямків досліджень у цій галузі є застосування спіненого бітуму як в'язучого матеріалу для асфальтової суміші, а також важливим екологічним напрямком досліджень є використання RAP (регенерованих асфальтових матеріалів) у нових асфальтових сумішах. Асфальтові суміші з пінобітумом та RAP можуть зменшити цю проблему.

У таблиці 1 наведено загальну кількість та частку застосування матеріалів RAP у деяких європейських країнах у 2019 році [13, 14].

Таблиця 1 – Загальні обсяги та частки застосування матеріалів RAP у деяких європейських країнах у 2019 році [13, 14]

Table 1 – The total quantities and application shares of RAP materials in some European countries in 2019 [13, 14]

Країна	Всі наявні RAP (млн тонн)	% RAP, використаного в		
		гарячому та теплому асфальті	на місці, холодний асфальт	завод, холодний асфальт
Бельгія	1,64	79	0	0
Хорватія	0,21	35	2,5	немає даних
Чеська Республіка	2,80	14	25	0
Фінляндія	1,50	100	0	0
Німеччина	13,40	82	0	0
Угорщина	0,15	98	1	1
Норвегія	1,17	28	0	1
Румунія	0,61	0	5	0
Словаччина	0,16	40	48	0
Словенія	0,15	23	10	0
Іспанія	1,49	0,1	1	6

У цій статті [13] розглядаються їхні функціональні та екологічні ефекти. Використання RAP-матеріалів зменшує шкоду для навколишнього середовища та витрати на будівництво, а також зберігає обмежені ресурси каменю, піску та гравію.

У цій статті було представлено, що гарячі асфальтобетонні суміші, зв'язані спіненим бітумом і містять матеріали RAP, забезпечують хорошу оброблюваність у порівнянні з «традиційними» гарячими асфальтобетонними сумішами. Однак виробництво спіненого бітуму вимагає спеціальних технологічних етапів перед його використанням як асфальтового в'язучого. Тим не менш, використання матеріалів RAP у новій асфальтовій суміші має ряд економічних та екологічних переваг, серед яких: зниження витрат на будівництво; значно менші викиди парникових газів завдяки усуненню значного споживання палива, необхідного для придбання та переробки сировини для «нової» суміші; збереження обмежених ресурсів каменю, піску та гравію; забезпечення якості, що не поступається якості «традиційної» асфальтової суміші. Результати серії лабораторних випробувань доводять, що

додавання матеріалів RAP у зростаючій пропорції збільшує значення стабільності Маршалла (важливий показник прогнозування експлуатаційних характеристик) суміші.

З метою вивчення технології теплового асфальтобетону (WMA) з додаванням регенованого асфальтобетону (RAP) та оцінки взаємодії цих матеріалів на рівні асфальтового в'язучого дослідження були проведені дослідження в роботі [15]. Це обумовлено тим, що у зв'язку з швидким глобальним розширенням дорожніх мереж асфальтова промисловість стикається з низкою екологічних викликів, таких як дефіцит матеріалів, екологічні проблеми, зростання вартості матеріалів, при цьому попит на екологічно чисті матеріали та впровадження політики «нульових викидів». З огляду на ці виклики та визнаючи необхідність пошуку нових рішень, у цьому дослідженні було оцінено зразки асфальтового в'язучого, що містять теплий асфальтобетон (WMA) та регеноване асфальтове покриття (RAP), або WMA-RAP. Оцінка була зосереджена на аналізі фізичних, реологічних та характеристик постійної деформації зразків WMA-RAP, що містять 20%, 35% та 50% переробленого покриття. У дослідженні використовувалася хімічна добавка до WMA типу поверхнево-активної речовини, Evotherm® P25. В'язучі WMA-RAP дозволяють виробляти суміш при нижчих температурах — на 30 °C менше — заощаджуючи енергію та зменшуючи потребу в нових агрегатних матеріалах за рахунок використання перероблених матеріалів, тим самим мінімізуючи вплив на навколишнє середовище.

У порівнянні з еталонними зразками, в ході дослідження оцінювалися зразки WMA-RAP та їх фізичні, реологічні характеристики і характеристики постійної деформації. Результати продемонстрували, що збільшення вмісту RAP значно покращило характеристики зразків, підкресливши потенціал WMA-RAP як стійкої альтернативи для дорожнього покриття.

Основні висновки цього дослідження [15] можна підсумувати наступним чином:

- Взаємодія між новим в'язучим, добавкою WMA та в'язучим RAP не показала негативних результатів у випробуваннях при високих температурах.
- Фізична оцінка показала зниження проникності (від 20% до 47%) та підвищення температури розм'якшення (від 7% до 17%), включаючи 20% до 50% RAP у зразках.
- Видима в'язкість зростала із збільшенням вмісту RAP при 135 °C (від 44% до 181%).
- Однак технологічність усіх зразків WMA-RAP залишалася задовільною, не перевищуючи 3000 сП при 135 °C.
- Зразки з додаванням RAP показали підвищені значення PGN порівняно з еталонними зразками: 1 PGN при 20% RAP і 2 PGN при 35% і 50% RAP. Крім того, безперервний аналіз PGN показав підвищення температури від 4,1 °C до 5,3 °C з кожним збільшенням вмісту RAP у зразках WMA-RAP.
- Основні криві показали збільшення жорсткості матеріалу та зменшення фазового кута, що вказує на старіння при додаванні в'язучого RAP. Однак зразки WMA-RAP продемонстрували зменшену чутливість до старіння в усьому частотному діапазоні порівняно з еталонними зразками, ймовірно, через проведення RTFO при 133 °C.
- Результати MSCR показали, що збільшення вмісту в'язучого RAP покращило стійкість до постійної деформації в зразках WMA-RAP. Значення $J_{nr3,2}$ зменшувалося із збільшенням вмісту RAP, що вказує на здатність витримувати більш інтенсивне дорожнє навантаження для категорій 64S, 64H та 64V/70H відповідно у зразках із 20%, 35% та 50% RAP.
- Зразки WMA з вмістом RAP до 50% продемонстрували задовільні характеристики щодо постійної деформації. Незважаючи на посилене старіння через вищий вміст RAP, вони показали вищі

значення PGH, поліпшені фізичні та реологічні властивості та підвищену продуктивність. Отже, зразки WMA-RAP продемонстрували задовільну поведінку навіть із значним вмістом RAP.

Результати показують, що стійкість до постійної деформації не є перешкодою для використання WMA-RAP. Це дозволяє виробляти суміші при нижчих температурах, зменшуючи споживання енергії, підвищуючи екологічність та використовуючи перероблені матеріали [15].

Економічні вигоди та аспекти сталого розвитку, з урахуванням політики скорочення викидів парникових газів та підвищення середньої глобальної температури, роблять ці типи матеріалів перспективними рішеннями, які будуть широко застосовуватися в найближчі роки. Більше того, це відповідає Цілі сталого розвитку 9 Організації Об'єднаних Націй, яка зосереджена на промисловості, інноваціях та інфраструктурі. Зокрема, це дослідження сприяло розвитку стійкої інфраструктури шляхом створення передових матеріалів та технологій для більш довговічних та стійких критичних споруд. Крім того, воно сприяло впровадженню стійких практик у будівельній галузі та представило інноваційні рішення для інфраструктурних викликів, сприяючи інноваціям у цій галузі. Ці моменти підкреслюють важливість дослідження [15].

У дослідженні [16] оцінювався вплив додавання регенованого асфальтового покриття (RAP) та його вологості на механічні характеристики гарячої асфальтобетонної суміші (НМА). За допомогою стандартного методу Маршалла були підготовлені суміші з 0%, 10%, 20%, 30%, 40% та 50% RAP, і для кожної суміші було визначено оптимальний вміст в'язучого (ОАС). Було досліджено два стани вологості RAP (висушений у печі та насичений поверхнево висушений) для оцінки його чутливості до залишкової вологи. Результати показали, що додавання більшої кількості RAP до суміші знизило ОАС з 5,22% (контроль) до 4,87% (50% RAP), що відображає вплив старого в'язучого. При більш високих рівнях RAP стабільність за Маршаллом підвищувалася, а плинність знижувалася, що означало, що суміш була більш жорсткою. Однак при високих рівнях RAP жорсткість часто перевищувала допустимі межі. Суміші RAP демонстрували зростання значень міцності на розрив до 20% RAP, але при більш високих рівнях ці значення знижувалися. Залишкова вологість в RAP значно впливала на механічні характеристики. Зразки, підготовлені з насиченим RAP, були менш стабільними, мали вищу текучість і значно нижчу непряму міцність на розрив, ніж сухі зразки, що погіршувалося після 20% RAP. До 20% RAP можна використовувати без зниження якості суміші, про що свідчить той факт, що рівні RAP і умови вологості, а також об'ємні (V_a , V_{MA} , V_{FA}) і механічні параметри відповідають стандартам ефективності SCRB R/9 2007 і ASTM. Пропозиції включають управління вологістю RAP шляхом правильного складування, покриття або використання конічних складів [16].

У роботі [9] зазначається що WMA і RAP можуть спричинити проблеми з експлуатаційними характеристиками, зокрема щодо вологості, утворення колій і стійкості до руйнування. Тому ці екологічні матеріали необхідно правильно розуміти і, можливо, використовувати в поєднанні, щоб збалансувати три складові стійкості, як того вимагає стійка система. В дослідженнях [9] було проведено огляд літератури з метою оцінки технологій WMA та їх подальшої ефективності. Крім того, огляд літератури включав розділ про RAP, щоб визначити його вплив на ефективність та фактори, що сприяють успішному використанню RAP. Після цього було проведено випробування асфальтового в'язучого з метою визначення профілів в'язкості-температури модифікованих та немодифікованих асфальтових в'язучих WMA при помірних та високих температурах. Також було проведено оцінку в'язучих при низьких температурах, щоб визначити, як на жорсткість асфальтового в'язучого впливає наявність і концентрація добавок WMA. Нарешті, було розроблено і випробувано суміші з первинного

і RAP WMA та HMA, щоб визначити їхню стійкість до колії, вологи та руйнування. Основні висновки, зроблені в ході цього дослідження [9]:

- Добавки WMA не обов'язково знижують в'язкість асфальтового в'язучого при температурах виробництва у всіх випадках. У двох з трьох випадків у цьому дослідженні в'язкість модифікованого асфальтового в'язучого не відрізнялася істотно від в'язкості немодифікованого в'язучого при всіх температурах випробування.

- Добавки WMA підвищували жорсткість BBR порівняно з немодифікованим асфальтовим в'язучим. Отже, додавання добавок WMA має бути оптимізовано, щоб уникнути потенційних пошкоджень, таких як термічне тріщинне руйнування.

- Стійкість до колії може бути проблематичною для сумішей WMA, що не містять модифікаторів на основі воску. Хімічні та піноутворюючі добавки продемонстрували знижену стійкість до колії в порівнянні з контрольними сумішами HMA та Sasobit WMA (рис. 1).

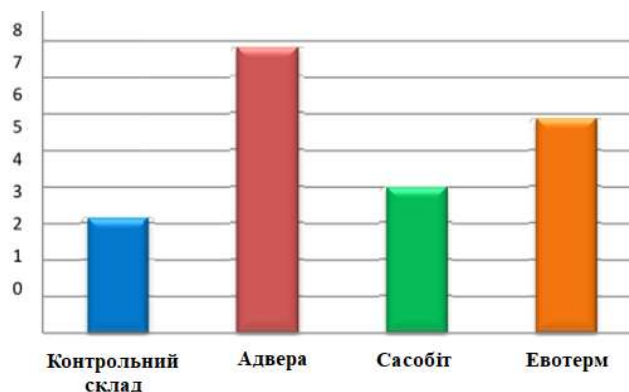


Рисунок 1 – Глибина колії при 45% вмісті RAP після 10 000 проходів коліс [9]

Figure 1 – Track depth at 45% RAP content after 10,000 wheel passes [9]

- Чутливість до вологи є значною проблемою для більшості добавок WMA. Як результат, для вирішення цієї проблеми можуть знадобитися антирозшарувальні агенти або гідратована вапно.

- Стійкість до руйнування значно відрізнялася серед добавок WMA. Тому дані свідчать про те, що зниження температури виробництва не має істотного впливу на енергію руйнування DC(T).

- Нарешті, RAP в деяких випадках може призвести до зменшення колії та чутливості до вологи сумішей WMA, що характеризується відповідно тестами Гамбурга та TSR. Однак для виробництва якісних асфальтобетонних сумішей необхідно враховувати знижену стійкість до руйнування сумішей RAP, оскільки добавки WMA та знижені температури змішування самі по собі не були достатніми для зменшення крихкості сумішей цього дослідження при включенні 45% RAP.

Крім того автор [9] зазначає наступне:

- Зниження в'язкості при температурах виробництва не є основною причиною зниження температур виробництва, доступних у всіх технологіях WMA. Необхідно також враховувати інші фактори, такі як хімічний склад.

- Властивості технологій WMA мають значний вплив на стійкість асфальтобетонних сумішей до руйнування, вологи та колії. Тому для досягнення бажаного результату необхідно вибрати

відповідну технологію, а випробування характеристик є необхідним компонентом при розробці стійких сумішей, що містять WMA та RAP.

- Додавання RAP до WMA може значно поліпшити характеристики цих сумішей при середніх і високих температурах. Однак необхідно ретельно підійти до вибору сорту нового в'язучого матеріалу та типу нового заповнювача, щоб забезпечити належну стійкість до розтріскування.

Автори [17] зазначають що, відсоток RAP, який можна успішно використати при гарячому рециклінгу суміші, визначається переважно практичними міркуваннями. Щоб уникнути погіршення стану старого в'язучого, RAP не слід піддавати дії відносно високих температур. У цьому дослідженні вивчалася можливість використання добавки для теплої асфальтової суміші (WMA) - Sasobit H8 – для успішного рециклінгу гарячої асфальтової суміші з 75% вмісту RAP при нижчій температурі.. Контрольна зразок гарячої асфальтової суміші був приготований з екстрагованими заповнювачами та в'язучим PG 64-28 при температурі 150 °C. Ще один зразок гарячої асфальтової суміші був виготовлений з в'язучим PG 52-28 при температурі 135 °C. Дві суміші WMA було приготовано з Sasobit H8 при 125 °C, одна з в'язучим PG 52-28, а інша з PG 42-42. Зразки з проектним вмістом асфальту ущільнювалися за допомогою 75 обертів гіраторного ущільнювача Supergrave. Визначалися та порівнювалися їх пори, міцність на розрив при -10 °C, опір колієутворенню при 60 °C та модулі при 0, 25 та 40 °C (у різний час). Зразки для визначення модулів піддавалися впливу температури 60 °C між тестами. Результати показують, що можливо виробляти суміші з 75% RAP з аналогічними порами, як у сумішей з первинних матеріалів, при нижчих, ніж традиційні, температурах з використанням 1,5% Sasobit. Додавання значно м'якшого в'язучого, PG 42-42, у кількості 1,5% від маси суміші, призвело до отримання суміші, найбільш подібної до суміші з первинних матеріалів.

У результаті виконаних досліджень у роботі [17] наведено наступні висновки:

- Можна виготовляти суміші з 75% RAP з подібним вмістом повітряних пустот, як у первинних сумішах за нижчих, ніж звичайні, температур, використовуючи 1,5% Sasobit (від ваги загальної асфальтової зв'язувальної речовини).

- Додавання Sasobit допомагає знизити в'язкість асфальтової зв'язувальної речовини за вищих температур, але, найімовірніше, має незначний ефект твердіння за низьких температур.

- Додавання Sasobit допомогло отримати однорідні суміші, що видно з низької мінливості властивостей.

- Додавання значно нижчого сорту зв'язуючої речовини, PG 42-42, у кількості 1,5% від ваги суміші, дало суміш, яка найбільше порівнянна з первинною сумішшю.

- Додавання Sasobit H8 допомогло отримати повітряні пустоти в сумішах, ущільнених за нижчої, ніж звичайна, температури, які були подібні до повітряних пустот, отриманих у звичайних сумішах, ущільнених за звичайних температур.

У роботі [18] проведена оцінка експлуатаційних характеристик теплих асфальтобетонних сумішей з переробленим асфальтовим покриттям. Зазначено що, технологія теплового асфальтобетону (WMA) забезпечує не тільки виробництво асфальтового покриття за нижчої температури, ніж температура, що підтримується в гарячій асфальтовій суміші (HMA), але й заохочує використання переробленого асфальтового покриття (RAP), і таким чином економить енергію та невідновлювані ресурси, а також зменшує викиди та споживання палива. Описано доцільність використання чотирьох різних добавок WMA (органічних, хімічних, синтетичних цеолітів та природних цеолітів) з різним вмістом RAP. Після визначення оптимального вмісту RAP, що відповідає кожній добавці WMA, було проаналізовано аналіз Маршалла, модуль непрямої жорсткості на розтяг та поведінку втоми HMA та

WMA, що включає RAP, та порівняно їх з контрольними зразками. Для оцінки характеристик залишкової деформації сумішей, що містять оптимальний вміст RAP використовували гамбурзький метод для визначення колієстійкості.

Висновки дослідників [18] вказують наступне. Зниження викидів від виробництва асфальту на заводі та викидів від ущільнення в польових умовах є найважливішими перевагами використання WMA. Властивості бітуму покращуються за допомогою органічних, хімічних, синтетичних цеолітних добавок WMA та природного цеоліту. Цих результатів було досягнуто завдяки традиційним методам випробувань, такі як проникнення, температура розм'якшення, оберտальна в'язкість, результати випробувань TFOT. Крім того, використання органічних, хімічних, синтетичних цеолітів та природних цеолітних добавок допомагає знизити значення в'язкості, що, у свою чергу, знижує температуру змішування та ущільнення, що призводить до зменшення витрат енергії, а також викидів. Значення стабільності за Маршаллом, пов'язані з сумішами RAP, виявилися вищими, ніж у контрольних сумішах. Виходячи з використаного заповнювача, 20%, 30%, 10% та 20% можна прийняти як оптимальний вміст RAP для зразків НМА, органічних, хімічних, як синтетичних цеолітів, так і природних цеолітових добавок відповідно.

Інші властивості зразків, включаючи оптимальний вміст RAP для сумішей НМА та кожної добавки WMA, також знаходяться в межах специфікацій щодо плинності, рівня повітряних порожнин. Використання добавок WMA значно покращує характеристики втоми бітумних сумішей. Однак, використання матеріалів RAP негативно впливає на характеристики втоми. Враховуючи вплив RAP на характеристики втоми, можна сказати, що навіть якщо характеристики Маршалла сумішей, що містять матеріали RAP, залишаються в допустимих межах, характеристики втоми цих сумішей необхідно враховувати окремо. Серед добавок, що використовуються в рамках дослідження, органічна добавка WMA є придатною добавкою, яку можна використовувати як омолоджуючий агент під час відновлення доріг з використанням матеріалів RAP. Деформація зразків з усіма добавками WMA, що контролювалася під час випробування на непряму втому при розтягу, показує, що добавки значно збільшують кількість циклів навантаження зразків для контрольної деформації порівняно зі сумішами НМА. Крім того, додавання RAP значно покращує деформаційні характеристики зразків WMA. Варіація є набагато перспективнішою з органічною добавкою WMA [18].

У світлі результатів випробувань на утворення колії, можна вважати, що добавки WMA, що використовуються в рамках цього дослідження, покращують характеристики стійкості до утворення колії в бітумних сумішах. Органічні та хімічні добавки мають структурно-модифікуючий вплив на бітумні суміші, оскільки цеоліти також поведуться як частинки наповнювача. Для певної кількості проходів (наприклад, 15 000 проходів) суміші з органічною добавкою демонструють найнижчий відсоток глибини колії. Цей результат пояснюється кристалізованою структурою, що виникає внаслідок модифікуючого ефекту органічної добавки WMA. Загалом, суміші WMA, приготовані з добавками, що використовуються в цьому дослідженні, мають кращі характеристики, ніж суміші НМА, з точки зору втоми та колійності. Окрім модифікаційного впливу добавок WMA, менший ступінь старіння через нижчі температури застосування відіграє важливу роль у загальній оцінці цих інноваційних технологій [18].

У роботі [19] надано оцінку механічних характеристик напівтеплих перероблених асфальтових сумішей, що містять до 100% RAP. В статті продемонстровано доцільність використання оцінки механічних характеристик напівтеплих перероблених асфальтових сумішей, що містять до 100% RAP у шарах зносу. Для цього в лабораторії було розроблено HWMRA з 70% та 100% відновленим

асфальтовим покриттям (RAP) та емульсією. Потім характеристики сумішей були оцінені та порівняні з характеристиками звичайного гарячого асфальтового покриття. На другому етапі суміші були виготовлені на заводі, укладені та ущільнені на прискореній випробувальній трасі для дорожнього покриття. Потім були вилучені керни та випробувані на модуль жорсткості та стійкість до втоми. Результати випробувань, проведених як з лабораторними зразками, так і з кернами, показали, що характеристики HWMRA порівнянні з характеристиками НМА. Ці результати вселяють більшу впевненість у просуванні використання цих типів екологічно чистих асфальтових сумішей. Для цього суміші HWMRA досліджувалися у два етапи. На першому етапі досліджували лабораторні зразки, а на другому етапі суміші випробували на етапах виробництва на заводі, укладання та ущільнення в польових умовах. Результати завжди порівнювали з результатами, отриманими за допомогою звичайного НМА.

Після лабораторного виробництва суміші були випробувані на модуль жорсткості, водочутливість та стійкість до залишкових деформацій. Можна зробити такі висновки [19]:

- Через різні значення, отримані стосовно модуля жорсткості (що може бути пов'язано з різними методами ущільнення), неможливо зробити якісь остаточні висновки щодо жорсткості HWMRA та НМА.

- *Водочутливість HWMRA відповідає вимогам для використання в шарах зносу.*

- HWMRA демонструє достатні показники утворення колії.

Прототип установки був здатний виробляти суміші, що містять до 100% RAP, використовуючи емульсію за напівтеплих температур. Після укладання та ущільнення в польових умовах керни були вилучені, а їх модуль жорсткості та опір втоми були оцінені в лабораторії. Можна зробити такі висновки:

- Модуль жорсткості HWMRA був вищим, ніж у НМА, і подібним до результатів, отриманих для лабораторного виробництва. Більше того, щільність кернів також була порівнянною з лабораторними зразками. Таким чином, схоже, що HWMRA можна успішно відтворити на заводі та ущільнити без жодних проблем.

- Для випробуваних рівнів напруження характеристики втоми HWMRA були задовільними порівняно з НМА.

Таким чином, HWMRA продемонстрував еквівалентну ефективність НМА, що підтверджується як лабораторними, так і польовими випробуваннями. Таким чином, HWMRA, виготовлений з емульсією, можна розглядати як екологічно безпечну альтернативу НМА.

У роботі [20] виконане лабораторне дослідження ущільнення та оцінка механічних характеристик напівтеплих асфальтобетонних сумішей з переробленого асфальту, що містять 100% RAP. Зазначено що ще залишаються деякі технічні прогалини щодо процедур проектування сумішей для приготування та характеристики напівтеплих асфальтобетонних сумішей (HWMRA) у лабораторії. З цією метою було обрано три різні методи лабораторного ущільнення (наприклад, статичне навантаження, ударний ущільнювач Маршалла та гірометричний ущільнювач) та проведено оцінку, щоб визначити найбільш підходящий метод випробувань на ущільнення напівтеплих сумішей переробленого асфальту (HWMRA) зі 100% регенованим асфальтовим покриттям (RAP). Згодом було досліджено вплив чотирьох режимів прискореного твердіння (0, 24, 48 та 72 год) на механічні характеристики сумішей. Потім було проведено розширену механічну характеристику характеристик суміші для кількісної оцінки непрямой міцності на розтяг (ITS), модуля жорсткості, утворення колії та випробування на втоми при чотириточковому згинанні (4PB). Таким чином, згідно з висновками

авторів, суміші HWMRA зі 100% RAP та емульгованим бітумом продемонстрували належну об'ємну (наприклад, повітряні порожнини та щільність) та механічну поведінку з точки зору пошкодження вологою, внутрішньої пружності (ITS), модуля жорсткості, утворення колії та розтріскування від втоми. Ці результати вселяють більшу впевненість у просуванні використання цих екологічно чистих асфальтових сумішей для їх використання на дорожніх покриттях або міських вулицях.

Основною метою дослідження [20] було оцінити три різні процедури лабораторних випробувань на ущільнення (тобто ударний ущільнювач Маршалла, статичне навантаження подвійним плунжером та гіраторний ущільнювач) та визначити найбільш підходящий метод для напівтеплих сумішей переробленого асфальту, що містять 100% вміст RAP, та емульгований бітум. Другою метою було кількісно визначити вплив прискореного твердіння на розвиток механічних властивостей сумішей. В результаті проведених випробувань можна зробити наступні висновки [20], що стосуються ущільнення та характеристики зразків HWMRA на стадії проектування суміші:

- Розглядаючи об'ємні та механічні властивості, отримані за допомогою трьох різних методів лабораторного ущільнення, можна сказати, що система гіраторного ущільнювача виявилася найбільш підходящим методом випробувань на ущільнення для виробництва/ущільнення та характеристики зразків напівтеплої суміші переробленого асфальту (HWMRA) в лабораторії. Для цього зразки ущільнювали, застосовуючи розрахункову енергію ущільнення суміші 70 гіроскопів при температурі 80 °C, та встановлення гіраторного ущільнювача під внутрішнім кутом обертання 0,82°, вертикальний тиск ущільнення 600 кПа та швидкість обертання 30 об/хв.

- Варто зазначити, що використання статичного стискаючого навантаження подвійним плунжером навантаженням 21 МПа було відхилено для подальших механічних випробувань, оскільки цей метод продемонстрував значно вищі значення об'ємної щільності, непрямой міцності на розтяг та модуля жорсткості, ніж ті, що отримані за допомогою дорожніх випробувань робочий майданчик після будівництва дорожнього покриття. Крім того, було помічено, що статичний метод спричиняв руйнування заповнювачів та стискання в'язучих речовин протягом усього процесу ущільнення суміші.

- Щодо результатів ущільнення сумішей за допомогою ударного ущільнювача Маршалла з 75 та 100 ударами з кожного боку, було отримано значне погіршення об'ємних (повітряні порожнини та об'ємна щільність) та механічних характеристик (модуль жорсткості та ITS) сумішей у порівнянні з результатами, отриманими за допомогою гіроскопічного ущільнювача при 70 обертах; ймовірно, в результаті руйнування заповнювачів під час процесу ущільнення суміші.

- Ефект тривалої прискореної обробки твердінням протягом трьох днів (72 год) при температурі 50°C, було виявлено досить позитивний вплив на розвиток механічних властивостей сумішей з точки зору модуля жорсткості та непрямой міцності на розтяг.

- Суміш HWMRA 100% RAP відповідає значенням стійкості до пошкодження вологою та утворення колії, встановленим іспанськими технічними специфікаціями для перероблених сумішей з емульсією для їх використання в дорожніх покриттях середньої або низької категорії транспортного навантаження. Крім того, було встановлено, що ця суміш відповідає вимогам, встановленим для гарячих асфальтобетонних сумішей для цих типів шарів (асфальтові суміші для основного шару) та термічних умов.

- Для тих самих рівнів деформації, що були протестовані, можна сказати, що суміші HWMRA з бітумом марки 50/70 реп. показали прийнятні характеристики з точки зору довговічності. Однак, бітум 50/70 реп. продемонстрував дещо нижчу мікророзтягову втому-деформацію (ϵ_b) значення, ніж результати для бітуму марки 160/220 реп. Це, ймовірно, пояснюється впливом м'якшого бітуму з

проникненням у кінцеву конструкцію суміші, що дозволило забезпечити вищу пластичність та гнучкість суміші, забезпечуючи більші навантаження від втоми при розтягуванні та деформації.

Однак не зважаючи на велику кількість проведених досліджень напівтеплих сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти дослідники рекомендують провести подальші дослідження, щоб розширити висновки в наступних областях.

Для більш повного розуміння взаємодії матеріалів необхідний хімічний аналіз. Крім того, для підтвердження результатів майбутніх досліджень слід розглянути можливість оцінки стійкості до втоми, чутливості до води та випробування інших в'язучих речовин RAP [15].

За результатами дослідження автори [16] додатково рекомендують дослідити біоосновані або відпрацьовані масла, які можуть відновити властивості старих в'язучих речовин, дозволяючи вмісту RAP перевищувати 20% при збереженні жорсткості та мінімізації ризику утворення тріщин. Також бажано здійснити оцінку додавання полімерів до асфальтових в'язучих речовин, які можуть зміцнити НМА, підвищити еластичність і поліпшити вологостійкість та додатково провести випробування на колісному сліді (AASHTO T 324) та випробування на втомну міцність (AASHTO T 321) сумішей з високим вмістом RAP, щоб оцінити їх стійкість до колії та втоми протягом тривалого періоду.

Майбутні дослідження повинні інтегрувати передові лабораторні методи з проектуванням на основі характеристик, щоб забезпечити високий рівень використання RAP без шкоди для стійкості до втоми [10].

Продовження зазначених досліджень буде зосереджено на розробці математичної моделі оптимізації експлуатаційних характеристик для з'ясування взаємозв'язку між змінними процесу спінювання бітуму [13].

Вивчення характеристик сумішей WMA з низьким і помірним вмістом RAP. Це дослідження може надати практикам і дослідникам діапазон відсоткового вмісту RAP, який забезпечує оптимальні характеристики з точки зору стійкості до колії, вологи та руйнування. Застосування моделі прогнозування експлуатаційних характеристик для вивчення довгострокових експлуатаційних характеристик сумішей RAP WMA. Це дослідження може надати практикам уявлення про експлуатаційні характеристики сумішей RAP WMA, що виходять за межі доступних на сьогоднішній день експлуатаційних характеристик. Розробка специфікації експлуатаційних характеристик сумішей WMA. Велика кількість технологій вимагає використання специфікації експлуатаційних характеристик для зменшення потенційного неправильного використання WMA [9].

Автори [1] зазначають, що під час аналізу на втому спостерігався сильний розкид результатів, тому було б доцільно додатково дослідити цю властивість у майбутніх дослідженнях.

Дослідники [17] пропонують провести дослідження довготривалої міцності та стійкості до втоми.

Також авторами роботи [20] наголошується на продовженні роботи з моніторингу стану та характеристик механічних властивостей сумішей HWMRA зі 100% RAP та емульгованим бітумом, як у лабораторії, так і в польових умовах, щоб заохотити більшу впевненість у просуванні використання цих сумішей для робіт з технічного обслуговування та реконструкції (M&R) дорожніх покриттів

Висновки. Загалом, дослідження напівтеплих сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти є актуальною задачею сьогодення для багатьох країн в тому числі і України. Використання вищевказаних сумішей має ряд переваг і широко впроваджується у світі.

Однією з переваг сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти є використання переробленого асфальтового покриття (RAP), і таким чином економить енергію та невідновлювані ресурси. За даними дослідників Щорічно в США виробляється понад 100 мільйонів тонн RAP, а у Європі станом на 2019 рік - більше 23 мільйонів тонн.

Іншою суттєвою перевагою є особливості технології які дозволяють виготовляти такі суміші при нижчих температурах що в свою чергу значно зменшуються викиди хімічних забруднювачів: скорочення викидів CO₂ на 58% та зменшення частинок SO₂ на 99,9% у порівнянні з гарячими сумішами, разом з тим зменшується споживання енергії на 35 - 50%.

По своїм характеристикам суміші з високим вмістом асфальтобетонної крихти в залежності від вмісту RAP та особливостей технології демонструють адекватні об'ємні та механічні властивості, HWMA з високим вмістом RAP продемонстрував модуль пружності при 20 °C, який був на 45,98% вищим, ніж у контрольній суміші, водночас в HWMA з високим вмістом RAP очікується нижча довговічність до втоми що пояснюється більшою жорсткістю цієї суміші. Разом з тим суміші HWMA-RAP так само стійкі до колії, як і традиційні суміші. Дослідники рекомендують застосовувати суміші HWMA-RAP при середній та низькій інтенсивності руху в умовах помірного та жаркого клімату.

На сьогодні існує відносно невелика кількість досліджень напівтепліх сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти, особливо вітчизняних оскільки лише в небагатьох дослідженнях вивчаються розрахункові та експлуатаційні характеристики напівтепліх сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти.

На даному етапі доцільно проводити лабораторні та натурні експериментальні дослідження впливу кількості та якості асфальтобетонної крихти на фізико-механічні властивості напівтепліх сумішей, їх оптимізація при використанні найбільш поширених і типових матеріалів в Україні з метою визначення параметрів технології улаштування напівтепліх асфальтобетонних сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти та отримання математичних моделей залежностей фізико-механічних характеристик напівтепліх сумішей від складових матеріалу та параметрів технології. Також є актуальними дослідження в лабораторних та польових умовах довгострокових якісних характеристик (стійкість до утворення колійності та атмосферних впливів) сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти. Реалізація всіх вищезазначених заходів надасть змогу економити енергетичні та матеріальні ресурси, зменшити шкідливі викиди у навколишнє середовище, а також створення довговічних і ресурсоефективних матеріалів, що особливо актуально в умовах післявоєнної відбудови.

Перелік посилань

1. Pasandín A.R., Pérez, I., Gómez-Mejide B. Performance of High Rap Half-Warm Mix Asphalt. *Sustainability*. 2020. 12(24). 10240. <https://doi.org/10.3390/su122410240>
2. ДСТУ EN 13108-8 Асфальтобетон. Вимоги до матеріалів. Частина 8: Регенований асфальтобетон (EN 13108-8:2016, IDT). [Чинний від 2019-07-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 10 с.
3. ДСТУ-Н Б В.3.2-5:2016 Настанова з ліквідації вибоїн покриття нежорсткого дорожнього одягу автомобільних доріг. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2017. 21 с.
4. Pavšič, Primož. Warm mix asphalt use in Slovenia and in Europe: A review. *Gradjeviniski materijali i konstrukcije*. 2022. Vol. 65. P. 149-153. <https://doi.org/10.5937/GRMK2204149P>

5. ДСТУ-Н Б В.2.7-315:2016 Настанова щодо виробництва та застосування асфальтобетонних сумішей за знижених технологічних температур із використанням енергозберігаючих добавок. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2017. 14 с.
6. Federico Autelitano, Erika Garilli, Felice Giuliani. Half-warm mix asphalt with emulsion. An experimental study on workability and mechanical performances, *Transportation Research Procedia*, 2021. Vol. 55. P. 1081-1089. ISSN 2352-1465. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.079>
7. Rubio M.D.C., Moreno F., Martínez-Echevarría M.J., Martínez G., Vázquez J.M. Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt. *J. Clean. Prod.* 2013. Vol. 41, P. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.036>
8. Capitão S., Picado-Santos L., Martinho F. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Constr. Build. Mater.* 2012. Vol. 36. P. 1016-1024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038>
9. Hill B. Performance evaluation of warm mix asphalt mixtures incorporating reclaimed asphalt pavement. Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA, 2011.
10. Loprencipe G, Moretti L, Saltaren Daniel M. Fatigue Resistance of RAP-Modified Asphalt Mixes Versus Conventional Mixes Using the Indirect Tensile Test. *A Systematic Review. Designs.* 2025. Vol. 9(5):104. <https://doi.org/10.3390/designs9050104>
11. Afshar Yousefi, Ali Behnood, Ata Nowruzzi, Hamzeh Haghshenas, Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials.* 2021. Vol. 268. 121200. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121200>
12. Mohammad Ashiqur Rahman, Musharraf Zaman, Syed Ashik Ali, Rouzbeh Ghabchi & Sagar Ghos. Evaluation of mix design volumetrics and cracking potential of foamed Warm Mix Asphalt (WMA) containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *International Journal of Pavement Engineering.* 2021. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1902522>
13. Saleh, A., & Gáspár, L. Functional and environmental impacts of the use of reclaimed asphalt pavement materials and of foamed asphalt. *Acta Technica Jaurinensis.* 2021. Vol. 14(2). P. 212–227. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00590>
14. D. B. Sánchez, G. Airey et al., Effect of foaming technique and mixing temperature on the rheological characteristics of fine RAP-foamed bitumen mixtures. *Road Materials and Pavement Design.* 2020. Vol. 21 (8). P. 2143-2159. https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1593228?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
15. Bohn KA, Thives LP, Specht LP. Physical, Rheological, and Permanent Deformation Behaviors of WMA-RAP Asphalt Binders. *Sustainability.* 2023. Vol. 15(18):13737. <https://doi.org/10.3390/su151813737>
16. Mohammad Naser, Mu tasim Abdel-Jaber, Rawan Al-shamayleh, Nawal Louzi, Reem Ibrahim. Evaluating the effects of using reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate on the behavior of hot mix asphalts. *Transportation Engineering,* 2022. Vol. 10. 100140. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100140>
17. Mallick R.B., Kandhal P.S., Bradbury R.L. Using Warm-Mix Asphalt Technology to Incorporate High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement Material in Asphalt Mixtures. *Transp. Res. Rec. J. Transp.*

Res. Board. 2008. Vol. 2051. P. 71-79. https://doi.org/10.3141/2051-09?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

18. Sengoz B., Topal A., Oner J., Yilmaz M., Dokandari, P.A., Kok B.V. Performance Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures with Recycled Asphalt Pavement. *Period. Polytech. Civ. Eng.* 2016, Vol. 61, P. 117–127. <https://doi.org/10.3311/PPci.8498>

19. Liz á rraga J.M., Del Barco-Carri ó n A.J., Ramírez A., Díaz, P., Moreno-Navarro F., Rubio M.C., Rubio-Gámez M. Mechanical performance assessment of half warm recycled asphalt mixes containing up to 100% RAP. *Mater. Construc.* 2017. Vol. 7, 129. <https://doi.org/10.3989/mc.2017.05116>

20. Marcobal J.R., Liz á rraga J.M., Gallego J. Laboratory Compaction Study and Mechanical Performance Assessment of Half-Warm Mix Recycled Asphalt Mixtures Containing 100% RAP. *Materials.* 2019. 12.

https://doi.org/10.3390/ma12121992?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

CURRENT RESEARCH ON HIGH RAP HALF-WARM MIX ASPHALT

Baran Serhii A., Ph.D. (Candidate of Technical Science), Associate Professor, Associate Professor of Road Building Materials and Chemistry, Associate Professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: baran_serg@ukr.net, tel. +380442859528, <https://orcid.org/0000-0002-3591-9880>

Andriievskiy Ihor P., Postgraduate student of Road Building Materials and Chemistry, Associate Professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: kusto2000@gmail.com, tel. +380442859528, <https://orcid.org/0009-0007-0444-5954>.

Summary. The article presents recent studies of high rap half-warm mix asphalt, which indicates the promising application of semi-warm mixtures with a high content of asphalt concrete crumbs and makes it possible to create durable and resource-efficient materials. The use of asphalt concrete crumbs not only saves materials and solves the issue of its disposal, but also allows saving energy resources and reducing harmful emissions into the environment due to lower technological temperatures for the preparation and installation of semi-warm mixtures. At the same time, this technology has not yet been sufficiently researched, especially in domestic practice, and requires laboratory and field experimental studies with subsequent optimization of formulation and technological parameters, as well as the development of mathematical models of the dependence of the physical and mechanical characteristics of semi-warm mixtures on the components of the material and technological parameters. Research in laboratory and field conditions on the long-term quality characteristics (calculated characteristics, resistance to rutting and atmospheric influences) of mixtures with a high content of asphalt concrete crumbs is also relevant.

Keywords: semi-warm asphalt concrete mixtures with a high content of asphalt concrete crumbs, reclaimed asphalt pavement, foamed bitumen, rutting resistance, physical and mechanical characteristics.

References

1. Pasandín A.R., Pérez, I., Gómez-Meijide B. Performance of High Rap Half-Warm Mix Asphalt. *Sustainability.* 2020. 12(24). 10240. <https://doi.org/10.3390/su122410240>

2. DSTU EN 13108-8 Asfaltobeton. Vymohy do materialiv. Chastyna 8: Rehenerovanyi asfaltobeton (EN 13108-8:2016, IDT). [Chynnyi vid 2019-07-01]. Vyd. ofits. Kyiv : DP «UkrNDNTs», 2019. 10 s. [in Ukrainian]

3. DSTU-N B V.3.2-5:2016 Nastanova z likvidatsii vyboin pokryttia nezhorstkoho dorozhnoho odiahu avtomobilnykh dorih. [Chynnyi vid 2017-04-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2017. 21 s. [in Ukrainian]
4. Pavšič, Primož. Warm mix asphalt use in Slovenia and in Europe: A review. *Gradjevinski materijali i konstrukcije*. 2022. Vol. 65. P. 149-153. <https://doi.org/10.5937/GRMK2204149P>
5. DSTU-N B V.2.7-315:2016 Nastanova shchodo vyrobnytstva ta zastosuvannia asfaltobetonnykh sumishei za znyzhenykh tekhnolohichnykh temperatur iz vykorystanniam enerhozberihaiuchykh dobavok. [Chynnyi vid 2017-04-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2017. 14 s.
6. Federico Autelitano, Erika Garilli, Felice Giuliani. Half-warm mix asphalt with emulsion. An experimental study on workability and mechanical performances, *Transportation Research Procedia*, 2021. Vol. 55. P. 1081-1089. ISSN 2352-1465. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.079>
7. Rubio M.D.C., Moreno F., Martínez-Echevarría M.J., Martínez G., Vázquez J.M. Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt. *J. Clean. Prod.* 2013. Vol. 41, P. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.036>
8. Capitão S., Picado-Santos L., Martinho F. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Constr. Build. Mater.* 2012. Vol. 36. P. 1016-1024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038>
9. Hill B. Performance evaluation of warm mix asphalt mixtures incorporating reclaimed asphalt pavement. Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA, 2011.
10. Loprencipe G, Moretti L, Saltaren Daniel M. Fatigue Resistance of RAP-Modified Asphalt Mixes Versus Conventional Mixes Using the Indirect Tensile Test. *A Systematic Review. Designs*. 2025. Vol. 9(5):104. <https://doi.org/10.3390/designs9050104>
11. Afshar Yousefi, Ali Behnood, Ata Nowruzzi, Hamzeh Haghshenas, Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 268. 121200. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121200>
12. Mohammad Ashiqur Rahman, Musharraf Zaman, Syed Ashik Ali, Rouzbeh Ghabchi & Sagar Ghos. Evaluation of mix design volumetrics and cracking potential of foamed Warm Mix Asphalt (WMA) containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *International Journal of Pavement Engineering*. 2021. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1902522>
13. Saleh, A., & Gáspár, L. Functional and environmental impacts of the use of reclaimed asphalt pavement materials and of foamed asphalt. *Acta Technica Jaurinensis*. 2021. Vol. 14(2). P. 212–227. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00590>
14. D. B. Sánchez, G. Airey et al., Effect of foaming technique and mixing temperature on the rheological characteristics of fine RAP-foamed bitumen mixtures. *Road Materials and Pavement Design*. 2020. Vol. 21 (8). P. 2143-2159. https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1593228?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
15. Bohn KA, Thives LP, Specht LP. Physical, Rheological, and Permanent Deformation Behaviors of WMA-RAP Asphalt Binders. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(18):13737. <https://doi.org/10.3390/su151813737>
16. Mohammad Naser, Mu tasim Abdel-Jaber, Rawan Al-shamayleh, Nawal Louzi, Reem Ibrahim. Evaluating the effects of using reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate on the behavior

of hot mix asphalts. *Transportation Engineering*, 2022. Vol. 10. 100140. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100140>

17. Mallick R.B., Kandhal P.S., Bradbury R.L. Using Warm-Mix Asphalt Technology to Incorporate High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement Material in Asphalt Mixtures. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 2008. Vol. 2051. P. 71-79. https://doi.org/10.3141/2051-09?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

18. Sengoz B., Topal A., Oner J., Yilmaz M., Dokandari, P.A., Kok B.V. Performance Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures with Recycled Asphalt Pavement. *Period. Polytech. Civ. Eng.* 2016, Vol. 61, P. 117–127. <https://doi.org/10.3311/PPci.8498>

19. Liz á rraga J.M., Del Barco-Carri ó n A.J., Ramírez A., Díaz, P., Moreno-Navarro F., Rubio M.C., Rubio-Gámez M. Mechanical performance assessment of half warm recycled asphalt mixes containing up to 100% RAP. *Mater. Construc.* 2017. Vol. 7, 129. <https://doi.org/10.3989/mc.2017.05116>

20. Marcobal J.R., Liz á rraga J.M., Gallego J. Laboratory Compaction Study and Mechanical Performance Assessment of Half-Warm Mix Recycled Asphalt Mixtures Containing 100% RAP. *Materials*. 2019. 12.

https://doi.org/10.3390/ma12121992?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

Дата надходження до редакції 24.12.2025.

Дата прийняття статті після рецензування 11.01.2026.