

УДК 625.7/8

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.19.1056

ЗАСТОСУВАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У БУДІВНИЦТВІ ПОКРИТТІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

БАЛАШОВА Ю. Б.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
ДЕМ'ЯНЕНКО В. В.², канд. техн. наук, доц.,
ТРЕГУБ О. В.³, канд. техн. наук, доц.,
ЧЕПУРНА К. О.⁴, студ.,
БАЛАШОВ А. О.⁵, студ.

^{1*} Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 786-54-46, e-mail: balashova.yuliia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2286-9263

² Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (096) 728-38-94, e-mail: demianenko.viktor@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0427-4263

³ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (099) 439-16-34, e-mail: tregub.olexandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6436-352X

⁴ Будівельний факультет, кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 567-10-12, e-mail: kara.naw.law.2004@gmail.com

⁵ Будівельний факультет, кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 678-37-54, e-mail: andbalashov@hotmail.com, ORCID ID: 0009-0007-5833-0888

Анотація. Постановка проблеми. Україна, прямуючи до європейської інтеграції, стоїть перед викликом не лише вступити до Європейського союзу, а й адаптувати свою інфраструктуру до високих європейських стандартів якості. Після закінчення війни необхідно не лише відбудувати зруйновані автомобільні дороги, аеродроми та споруди, а й гарантувати стійкість та довговічність інфраструктурних об'єктів. Одна з ключових галузей, де інновації можуть мати суттєве значення, – це дорожнє будівництво. Асфальт і бетон – найпоширеніші будівельні матеріали у сфері будівництва нежорсткого і жорсткого дорожнього одягу. Інноваційні технології ремонту тріщин у покриттях автомобільних доріг з асфальту і бетону постійно розвиваються. Тривають пошуки нових методів і матеріалів для більш ефективного та тривалого утримання дорожнього покриття в належному стані. Використання передових технологій дозволяє підвищити якість ремонту, збільшити тривалість служби доріг і зменшити його вплив на навколишнє середовище. Інноваційні підходи до ліквідації тріщин допомагають забезпечити безпеку і комфорт на дорозі для всіх учасників дорожнього руху. **Мета статті** – аналіз зарубіжного досвіду застосування ефективних інноваційних технологій у будівництві покриттів автомобільних доріг та обґрунтування доцільності використання самовідновлюваного верхнього шару нежорсткого і жорсткого дорожнього одягу з асфальту і бетону в умовах України на основі аналізу їх властивостей. **Висновки.** Включення властивостей самовідновлення в асфальто-бетонні покриття – ефективний метод для збільшення терміну їх служби та досягнення екологічності дорожнього одягу. Досліджені наявні та вдосконалені технології самовідновлення, придатні для застосування в асфальтових покриттях, а саме, включення загоювальних речовин, індукційне нагрівання та гібридні технології. Досліджено механізми самовідновлення бетону: аутогенні, на основі автономних бактерій і на основі автономних капсул. Дослідження самовідновлюваних покриттів спрямовані на розроблення розумної та ефективної системи дорожнього одягу, здатної до самооцінки та автоматизованого ремонту тріщин. Вибір технології повинен базуватися на її здатності ефективно відновлювати пошкодження та тріщини в асфальті і бетоні, забезпечуючи тривалий та надійний захист.

Ключові слова: інноваційні технології; покриття автомобільних доріг; нежорсткий і жорсткий дорожній одяг; тріщини; самовідновлюваний асфальт; самовідновлюваний бетон

USE OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN THE CONSTRUCTION OF ROAD PAVEMENTS

BALASHOVA Yu.B.^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

DEMIANENKO V.V.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
TREGUB O.V.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
CHEPURNA K.O.⁴, *Stud.*,
BALASHOV A.O.⁵, *Stud.*

^{1*} Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 786-54-46, e-mail: balashova.yuliia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2286-9263

² Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (096) 728-38-94, e-mail: demianenko.viktor@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0427-4263

³ Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (099) 439-16-34, e-mail: tregub.olexandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6436-352X

⁴ Faculty of Civil Engineering, Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (095) 567-10-12, e-mail: kara.naw.law.2004@gmail.com

⁵ Faculty of Civil Engineering, Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 678-37-54, e-mail: andbalashov@hotmail.com, ORCID ID: 0009-0007-5833-0888

Abstract. Problem statement. Ukraine, on its way to European integration, faces the challenge not only of joining the European Union, but also of adapting its infrastructure to high European quality standards. After the end of the war, it is necessary not only to rebuild the destroyed roads, aerodromes and buildings, but also to guarantee the sustainability and durability of infrastructure facilities. One of the key industries where innovations can make a significant difference is road construction. Asphalt and concrete are the most common building materials in the construction of flexible and rigid pavements. Innovative technologies for repairing cracks in asphalt and concrete road pavements are constantly evolving. New methods and materials are being sought for more efficient and long-term maintenance of the road surface. The use of advanced technologies allows us to improve the quality of repairs, extend the service life of roads and reduce their environmental impact. Innovative approaches to crack repair help to ensure safety and comfort on the road for all road users. **The purpose of the article** is to analyze foreign experience in the application of effective innovative technologies in the construction of road pavements and to substantiate the feasibility of using a self-healing top layer of flexible and rigid asphalt and concrete pavements in Ukraine based on the analysis of their properties. **Conclusions.** The inclusion of self-healing properties in asphalt concrete pavements is an effective method for increasing their service life and achieving environmental friendliness of pavements. Existing and advanced self-healing technologies suitable for use in asphalt pavements, namely, the inclusion of healing agents, induction heating, and hybrid technologies, have been investigated. The mechanisms of self-healing of concrete have been studied: autogenous, based on autonomous bacteria, and based on autonomous capsules. Research on self-healing pavements is aimed at developing a smart and efficient pavement system capable of self-assessment and automated crack repair. The choice of technology should be based on its ability to effectively repair damage and cracks in asphalt and concrete, providing long-term and reliable protection.

Keywords: *innovative technologies; road pavement; flexible and rigid pavement; cracks; self-healing asphalt; self-healing concrete*

Постановка проблеми. Україна, прямуючи до європейської інтеграції, стоїть перед викликом не лише вступити до Європейського союзу, а й адаптувати свою інфраструктуру до високих європейських стандартів якості. Після закінчення війни необхідно не лише відбудувати зруйновані автомобільні дороги, аеродроми та споруди, а й гарантувати стійкість та довговічність інфраструктурних об'єктів [1]. Одна з ключових галузей, де інновації можуть мати суттєве значення, – це дорожнє будівництво.

Асфальт і бетон – найпоширеніші будівельні матеріали у сфері будівництва нежорсткого і жорсткого дорожнього одягу. Асфальт широко використовується для нежорсткого покриття доріг завдяки своїй здатності зменшувати шум від руху автотранспорту, високій стійкості до зношування та можливості повторного використання. Бетон застосовується для жорстких покриттів автомобільних доріг, а також як матеріал для дорожніх конструкцій, таких як огороження тунелів, підпірні стінки та балки, тунелі. Таким

чином, асфальт і бетон складають основну частину матеріалів, які використовуються у дорожньому будівництві. Внаслідок цього інноваційні технології ремонту тріщин у покриттях автомобільних доріг з асфальту і бетону постійно розвиваються. Застосування передових технологій дозволяє підвищити якість ремонту, збільшити тривалість служби доріг і зменшити його вплив на навколишнє середовище.

Аналіз публікацій. Одним із перспективних напрямків уже декілька десятиліть вважається застосування геосинтетичних матеріалів у конструкціях земляного полотна і покриттів автомобільних доріг для підвищення їх несучої здатності і довговічності [2]. Але постійний прогрес розвитку технологій спонукає до пошуку нових інноваційних рішень:

1. *Дороги з переробленого пластику.* У 2002 році професор хімії Інженерного коледжу м. Мадурай, Раджагопалан Васудеван (Rajagopalan Vasudevan) розробив технологію створення доріг із використанням пластику. Він запатентував метод перетворення звичайного сміття на добавку для бітуму. Додавання такої суміші дозволяє скоротити використання бітуму до 10 % [3].



Рис. 1. Використання пластикових відходів як добавки до бітуму

Інженер Тобі Маккартні (Toby McCartney) і його компанія, MacRebur, заснована в Шотландії, виробляє матеріали для будівництва доріг, які на 60 % міцніші за звичайний асфальт та мають термін експлуатації в 10 разів довший. Він

переробляє 100 % вторинний пластик на так звані гранули MR6, які замінюють бітум [4].

У ДП «ДерждорНДІ» проведено дослідження щодо використання добавок для модифікації бітумних в'язучих, отриманих із перероблених пластикових пляшок. Установлено, що асфальтобетон, виготовлений з використанням бітуму з такими добавками, виявляє значно кращі властивості порівняно з класичним асфальтобетоном [5].

2. *Збірні пластикові дороги.* Покриття доріг складається з модульних пластикових конструкцій, виготовлених із відходів переробленого пластику. У Нідерландах, у містах Зволле та Гітхорн, вже існують велосипедні доріжки, виконані тільки з пластикових відходів. Ця ідея відома як концепція PlasticRoad. Оцінюється, що термін експлуатації таких доріг збільшиться утричі порівняно з традиційними [6].



Рис. 2. Дороги із збірних пластикових панелей

У ПДАБА проведено дослідження щодо можливості використання для матеріалу дорожніх покриттів найбільш розповсюдженого в світі пластику – ПЕТ (поліетилентерефталат) та пластику з більш високими характеристиками щодо міцності – ПТФЕ (політетрафторетилен) [7]. У ході досліджень запроєктовано й оптимізовано модель збірного полімерного покриття для доріг із поліетилентерефталату (ПЕТ), яка має параметри, що забезпечують її надійне і довговічне функціонування в складних природних умовах, а також зручність в її подальшій експлуатації [8].

3. *Дороги зі світловідбивальними смугами (Light-Emitting Roads).* У Нідерландах на дорогах вуличні ліхтарі

замінені світловідбивальними смугами, які світяться в темряві, допомагаючи водіям зорієнтуватися. Це просте, але ефективно нововведення розробив дизайнер Даан Рузегарде. Протягом дня ці фосфоресцентні смуги поглинають сонячне світло і випромінюють його уночі [9].



Рис. 3. Дороги зі світловідбивальними смугами

4. *Електрифіковані дороги (Electrified Roads)*. Електрифікація усіх легкових автомобілів за допомогою відновлюваних джерел енергії з нульовим викидом вуглецю може суттєво зменшити викиди. Однак наразі серйозною проблемою для електромобілів став час заряджання. Проте ведуться дослідження щодо електрифікованих транспортних маршрутів, які дозволять водіям електромобілів заряджатися під час руху. Деякі розробки базуються на бездротовій зарядці, інші – на зарядці через контактний кабель, подібно до системи Scalextric у реальному масштабі, де автомобіль заряджається, маючи контакт із зарядною котушкою на дорозі [10].



Рис. 4. Електрифікована смуга руху на автомобільній дорозі

5. *Сонячні дороги (Solar Roadways)*. Основна мета Solar Roadways – виробляти чисту відновлювану енергію на дорогах та

інших поверхнях, по яких можна ходити або їздити. Концепція Solar Roadways піднімає сонячні технології на новий рівень. Її суть полягає в тому, щоб ефективно зібрати значну кількість сонячної енергії, яка падає на ці поверхні. Таким чином, вони матимуть подвійне призначення: сучасна інфраструктура плюс розумна електромережа.



Рис. 5. Сонячні дороги (Solar Roadways)

Розрахунки показують, що якби всі дорожні покриття та пішохідні доріжки у США були обладнані панелями Solar Roadway, вони могли б виробляти утричі більше електроенергії, ніж споживається у Сполучених Штатах [11].

6. *Дороги з магнітного бетону*. Швейцарська компанія Holcim у співпраці з баварським стартапом Magment працює над удосконаленням властивостей намагніченого бетону для дорожніх покриттів, що дозволить заряджати електромобілі під час руху. Це конкретне рішення відоме як «індуктивна зарядка». Технологія стала можливою завдяки бетону з високою магнітною проникністю, який можна використовувати як дорожнє покриття, на якому буде можливо безконтактно заряджати електромобілі [12].

7. *Дороги з водопоглинальних матеріалів*. Британська компанія Lafarge Tarmac упроваджує інноваційне дорожнє покриття Tormix Permeable. Верхній шар Tormix Permeable складається з великих фракцій щебеню, а вільний простір між цими фракціями дозволяє воді вільно стікати вниз. Пропускна здатність Tormix Permeable залежить від кількості вбудованих у покриття дренажних стоків: чим їх більше, тим ефективніше стікає вода з поверхні.

Завдяки пористій структурі покриття може швидко пропускати величезну кількість води – до 4 000 літрів за хвилину [13].



Рис. 6. Дорожнє покриття Gortmix Permeable

8. *Дороги із самовідновлюваного асфальтового покриття (Self-healing asphalt pavements)*. Всесвітній економічний форум визнає технологію самовідновлюваних матеріалів однією з 10 кращих нових технологій. До цього часу вона була вивчена на практиці головним чином в аерокосмічній промисловості, але дослідники активно працюють над її застосуванням у будівельній галузі.

Дослідники з Дельфтського технічного університету розробили самовідновлюване асфальтове покриття зі сталевими волокнами. Розтріскане покриття здатне самовідновлюватися за впливу сонячного світла або індукційного нагріву. Сталеві волокна в покритті забезпечують електропровідність. За впливу магніту асфальт і волокна в його складі нагріваються, тим самим дрібні тріщини на дорозі затягуються, що дає змогу звести дорожні роботи до мінімуму.

Щоб провести ремонт такої дороги, не потрібно перекривати її частину на кілька днів і замінювати покриття – достатньо прогнати по ній електромагнітну машину. Це може не просто вирішити проблему заторів, скоротити кількість аварій, а й дає змогу значно заощадити на ремонтних роботах.

Безумовно, поки що це дещо дорожче за традиційне дорожнє покриття. За підрахунками керівника дослідження Еріка Шлангена, інноваційне асфальтове покриття обходиться на 25 % дорожче, але термін служби дороги збільшиться вдвічі і дасть

змогу щорічно економити до 90 млн євро на рік [14].

9. *Дороги із самовідновлюваних бетонів (Self-Healing Concrete Roads)*. У 2013 році вчені з Університету Бата в Кардіффі та Кембриджу спільно розробили «розумний» бетон нового покоління та інші будівельні матеріали на основі цементу. У рамках проекту вони розробляють бетонну суміш, яка містить мікроінкапсульовані бактерії, що активізуються при проникненні води в тріщини бетону. Відбувається утворення вапняку (кальциту), який заповнює тріщини та ущільнює їх, перешкоджаючи проникненню води та кисню, що може спричинити корозію арматури. Використання самовідновлюваного бетону дозволяє знизити витрати на технічне обслуговування [15].

Дослідники з Вустерського політехнічного інституту (WPI) використовують фермент, що міститься в еритроцитах, для створення самовідновлюваного бетону, який в чотири рази міцніший за традиційний бетон. Цей матеріал може подовжити термін служби конструкцій на основі бетону та уникнути необхідності дорогого ремонту або заміни. Застосований фермент автоматично реагує з атмосферним вуглекислим газом (CO₂), утворюючи кристали карбонату кальцію, які мають структуру, міцність та інші властивості, схожі на бетон. Крім того, ці кристали можуть заповнювати тріщини, подовжуючи термін служби конструкцій [16].

Мета статті – аналіз зарубіжного досвіду застосування ефективних інноваційних технологій у будівництві покриттів автомобільних доріг та обґрунтування доцільності використання самовідновлювального верхнього шару нежорсткого і жорсткого дорожнього одягу з асфальту і бетону в умовах України на основі аналізу їх властивостей.

Результати досліджень. Тріщини в асфальтовому і бетонному покриттях автомобільних доріг, а також у конструкціях і спорудах – це традиційна проблема в дорожньому будівництві, досі не розв'язана

досконально. Тріщини, зокрема крихітні, є практично на всіх спорудах автомагістралей різної протяжності [17, 18]. Тріщини на дорогах викликають різноманітні проблеми в їх конструкціях. Вони можуть з'являтися як у дорожньому покритті (асфальті або бетоні), так і в окремих конструктивних елементах, таких як бетонні балки мостів або облицювання тунелів. Для покриттів доріг розтріскування погіршує термін служби і комфорт водіння.

Проте для структурних елементів тріщини становлять більш серйозну загрозу. У випадку виходу з ладу ключових компонентів, таких як колони мостів, можуть мати місце катастрофічні наслідки.

Покриття автомобільних доріг просто несуть навантаження від транспортних засобів, тоді як для структурних елементів мостів важливо враховувати як навантаження транспортних засобів, так і вагу матеріалу. У тунелях, крім цих навантажень, конструкція облицювання зазнає впливу тиску гірських порід і гідравлічної ерозії. Складність гірського тиску в геотехнічних середовищах іноді непередбачувана, і гідравлічну ерозію важко контролювати. Ці тріщини мають бути оброблені, щоб уникнути подальших небезпек. Деякі типові форми тріщинних катастроф, що існують на автомагістралях, показано на рисунку 7 [19].

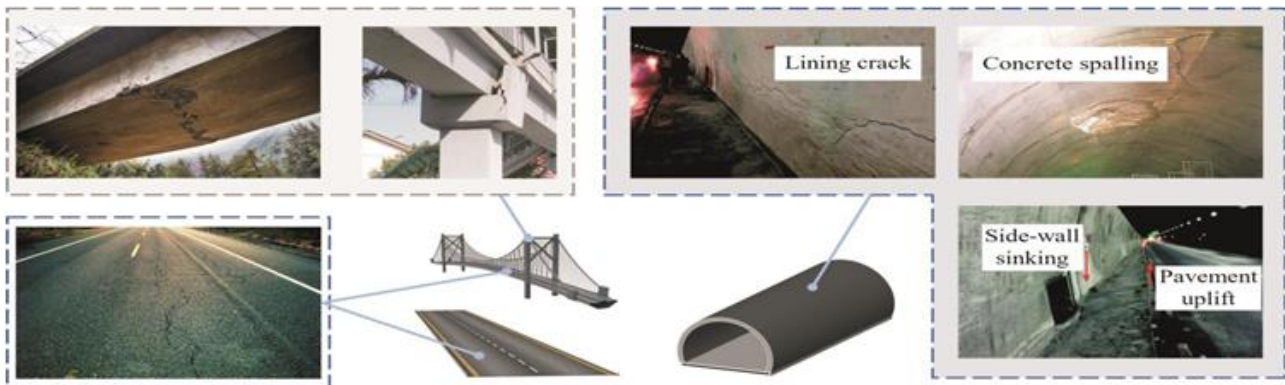


Рис. 7. Типові форми пошкодження тріщинами на автомагістралях [19]

Багато країн витратили величезні суми на підтримку та ремонт своєї інфраструктури. У США утримання автомагістралей через корозію обходиться приблизно в 4 млрд доларів, в Австралії – майже в 550 млн доларів за рік. У 2019 році Китай заплатив 37,18 млрд юань на утримання доріг. Підраховано, що собівартість виробництва бетону коливається від \$ 65/м³ до \$ 80/м³, тоді як ремонт тріщин і обслуговування конструкцій коштують приблизно 147 доларів США/м³. Довговічність відремонтованих конструкцій залишається серйозною проблемою: через 5 років, 20 % цих споруд виходять з ладу, а через 10 років – приблизно 55 %.

Основним методом ремонту тріщин на сьогоднішній день стало заповнення видимих тріщин цементним розчином або асфальтобетонними матеріалами. Проте цей

метод має дві основні проблеми: по-перше, експлуатаційні характеристики конструкції можуть відновитися лише до певного рівня первісної конструкції, що спричиняє повторне утворення тріщин у випадку, якщо зовнішнє середовище та навантаження залишаться незмінними; і, по-друге, такий метод дозволяє відремонтувати лише видимі тріщини на поверхні, тоді як внутрішні та мікротріщини в конструкціях можуть залишатися непоміченими.

Щоб запобігти подальшій концентрації напружень, компенсувати певний ступінь розтягувального напруження та запобігти подальшому розширенню тріщин, їх ремонт треба проводити своєчасно.

Асфальт і бетон становлять переважну більшість усіх матеріалів, що використовуються в дорожніх покриттях і конструкціях на автомагістралях. Тому технологія ремонту тріщин в основному

спрямована на асфальт і бетон у дорожньому будівництві. Завдяки досягненням у галузі багатофункціональних матеріалів, багато досліджень були зосереджені на тому, як запобігти розтріскуванню будівельних матеріалів, таких як асфальт і бетон, за комплексного впливу сили, температури та проникнення води [20].

Традиційний підхід полягає у вбудовуванні певних армувальних компонентів, таких як волокна або специфічні сполуки, у бетон або асфальт з метою поліпшення їх здатності запобігати утворенню тріщин. Інший метод, відомий як самовідновлення, передбачає включення в будівельні матеріали речовин, що можуть самостійно «зцілювати» мікропошкодження, тим самим забезпечуючи нові рішення для тривалого запобігання утворенню тріщин [21].

Своєчасне технічне обслуговування і відновлення обов'язкові для забезпечення того, щоб асфальтові покриття могли служити транспорту протягом усього їх проектного терміну експлуатації. Однак постійне виробництво і використання асфальтобетонних сумішей не лише стає нерентабельним, а й сприяє викидам значної кількості парникових газів. Тому були розроблені різні технології для внутрішнього виправлення дефектів до того, як вони стають помітними, із використанням різноманітних методів відновлення, відомих як технології самовідновлення.

Самовідновлення у дорожніх покриттях може бути досягнуте за допомогою використання загоювальних речовин, індукційного нагріву, мікрохвильового нагріву та інших технологій відновлення, де використовуються різноманітні наноматеріали і полімери як самовідновлювані добавки в асфальті.

Дослідження показують, що додавання самовідновлюваних добавок до асфальту може ефективно усунути мікротріщини, що утворилися, та значно продовжити термін служби. Тому дослідження лікувальних властивостей асфальту стали пріоритетним

напрямком ще з 1960-х років. Незважаючи на те, що асфальт сам по собі є матеріалом із деякими самовідновлюваними властивостями, цих властивостей недостатньо для ефективного ремонту мікротріщин. Отож, дослідження з посилення властивостей самовідновлення асфальту за допомогою зовнішніх методів зазнали значного прогресу протягом останнього десятиліття.

Проте ця галузь проектування та обслуговування дорожніх покриттів залишається досить мало вивченою. Необхідно детально розібратися в механізмі та принципах дії технологій самовідновлення, які вже використовуються на практиці, і провести дослідження щодо майбутніх перспективних методів.

Основна мета досліджень самовідновлюваних покриттів – це розроблення розумної та ефективної системи дорожнього покриття, здатної до самооцінки та автоматизованого ремонту тріщин. Різні методи самовідновлення асфальтових покриттів (Self-Healing Asphalt Pavements – SHAP), їх оптимальні умови відновлення наведені на рисунку 8.



Рис. 8. Методи самовідновлення асфальтових покриттів [22]

1. Самовідновлення асфальтових покриттів

Мікротріщини, що виникають внаслідок постійних транспортних навантажень, якщо їм дозволити зцілитися, можуть запобігти поширенню макротріщин та відновити міцність дорожнього покриття. Однією з переваг самовідновлення дорожнього покриття став швидкий внутрішній ремонт, що зменшує перешкоди для руху та мінімізує витрати.

2. Самозцілення за допомогою цілющих засобів

Лікувальні речовини вводяться в асфальт за допомогою інкапсулювальних агентів, таких як мікрокапсули [23], порожнисті волокна та мікросудинні волокна. Під час утворення тріщини енергія руйнування на її краю відкриває герметичне середовище та вивільняє цілющу речовину.

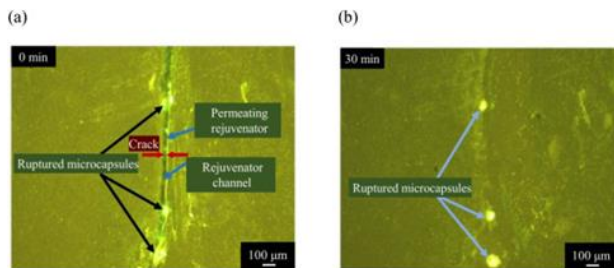


Рис. 9. Асфальт, що містить мікрокапсули: а – асфальт почав тріскатися; б – асфальт почав загоюватися протягом 30 хв [23]

3. Індукційний нагрів для самовідновлення

Хоча асфальт сам по собі має деякі властивості самовідновлення, його здатність до цього безпосередньо залежить від температури та тривалості періодів спокою. Проте за навколишньої температури неможливо забезпечити достатню кількість таких періодів, не призупинивши рух транспорту. Це спонукало до створення концепції самовідновлення за допомогою індукційного нагріву. Однак асфальт – електричний ізолятор, тому для індукційного нагріву потрібно надати йому електропровідність.

4. Гібридні технології самовідновлення в асфальті

Останнім часом активно досліджуються гібридні системи, які включають як охолодження, так і нагрівання. Дослідники, зокрема [23], розробили гібридну самовідновлювану систему з використанням індукційного нагріву та охолоджувальних капсул. Індукційний нагрів служить механізмом відновлення пошкоджень, в той час як капсули забезпечують охолодження зістареного асфальту і відновлюють його властивості. Крім того, підвищена температура за допомогою індукційного

нагріву може сприяти швидшому процесу дифузії охолоджувача в зістарений асфальт.

Серед різних існуючих технологій самовідновлення асфальтобетонних покриттів відповідну технологію слід обирати на основі таких критеріїв:

1) *Стійкість до впливу навколишнього середовища*: обрана технологія повинна бути стійкою до впливу факторів навколишнього середовища, таких як температурні зміни, вологість, агресивні речовини на дорозі тощо.

2) *Тривалість дії*: важливо вибрати технологію, яка забезпечує довготривалу захисну дію, зменшуючи потребу у частому обслуговуванні та ремонті.

3) *Екологічність*: технологія повинна бути екологічно безпечною, мінімізуючи негативний вплив на навколишнє середовище під час встановлення та використання.

Обираючи технологію самовідновлення асфальтових покриттів, важливо враховувати всі ці критерії для забезпечення найкращого результату в плані тривалості служби та ефективності експлуатації нежорсткого дорожнього покриття.

Далі розглянемо основний матеріал для жорстких дорожніх і аеродромних покриттів – бетон. Цей матеріал широко використовується на будівельному ринку завдяки своїй доступності та вартості, хоча і схильний до утворення тріщин. Традиційний бетон при контакті з водою має механізм самовідновлення, який називається аутогенним загоєнням. Він має таку здатність, оскільки негідратований цемент залишається присутнім у матриці. Коли вода контактує з негідратованим цементом, відбувається подальша гідратація та «загоєє» тріщини. Сучасні дослідження спрямовані на посилення властивостей бетону до самовідновлення, а саме:

- Гідрогелі або суперабсорбувальні полімери (SAP) можуть вбирати значну кількість рідини та утримувати її, сприяючи закриттю тріщин. Після набухання вони вивільнюють рідину для внутрішнього затвердіння та ущільнення тріщин.

- Мікроорганізми, які виробляють карбонат кальцію, вбудовані в бетон і випускають його при утворенні тріщин, що сприяє їх закриттю.

- Інкапсульовані полімери розриваються при пошкодженні, вивільнюючи вміст. Це заповнює тріщину, яку полімер потім склеює разом, сприяючи її загоєнню.

Із використанням самовідновлюваних бетонів зменшується необхідність у виявленні та ремонті тріщин, це дає соціальні, економічні та екологічні переваги завдяки оптимізації використання матеріалів.

Самовідновлюваний бетон (Self-Healing Concrete – SHC) володіє властивістю автономного відновлення та зменшує необхідність у виявленні та усуненні внутрішніх пошкоджень (тріщин) без зовнішнього втручання (рис. 10).

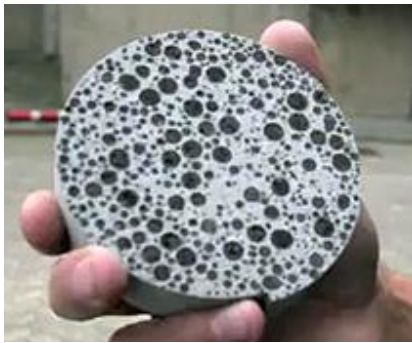


Рис. 10. Загальний вигляд самовідновлюваного бетону (біобетону)

Це сприяє запобіганню корозії арматури та деградації бетону, а також зменшує витрати та підвищує тривалість експлуатації. Протягом певного періоду тріщини можуть з'являтися у бетоні внаслідок гідратації мінералів або карбонізації гідроксиду кальцію.

Самовідновлюваний бетон, розроблений у 2006 році професором мікробіології Хенком Йонкерсом з Делфтського технологічного університету в Нідерландах, використовує спеціальні матеріали, такі як капсули або волокна, що містять ремонтні розчини [24]. Після 36 місяців експериментів було виявлено ідеальний метод – використання бактерій [25].

Самовідновлюваний бетон відрізняється здатністю автономно загоювати тріщини. Він моделює автоматичне загоєння шляхом викиду певного матеріалу для загоєння. Коли у бетоні з'являється тріщина, спеціальні капсули в ньому ламаються, а ремонтний матеріал заповнює цю тріщину для самостійного виправлення ушкодження. Це може подовжити термін експлуатації бетонних конструкцій і зробити їх більш екологічно чистими та міцними. Залежно від методу відновлення існують різні способи використання відновлювальних матеріалів для ремонту, кожен з яких має свої механізми дії (рис. 11).

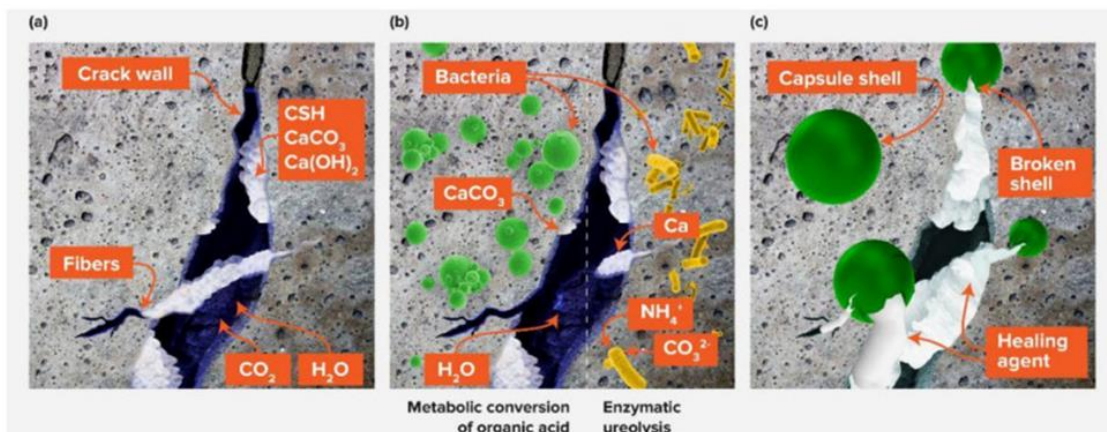


Рис. 11. Механізми самовідновлення: (а) аутогенні, (б) на основі автономних бактерій і (с) на основі автономних капсул [26]

Основна мета процесу самовідновлення – загоєння тріщин у бетонній конструкції.

Це продовжує термін служби бетонних конструкцій, роблячи їх більш міцними та стійкими.

1. Аутогенне самовідновлення (Autogenic self-healing – ASH) – це здатність бетону ремонтувати або загоювати тріщини за наявності вологи та відсутності напруги розтягування [27]. Процес аутогенного самовідновлення використовує лише вихідні матеріальні компоненти, які сприяють загоєнню завдяки своїй чіткій та активній хімічній природі за сприятливих умов навколишнього середовища для цього процесу. Загалом причини аутогенного самовідновлення можна поділити на три категорії: фізичні, хімічні та механічні [28]:

Фізичні фактори включають розширення цементної матриці навколо отвору тріщини в результаті поглинання води гідратованою цементною матрицею, що сприяє звуженню тріщини.

Хімічні причини пов'язані з двома основними процесами: триваючою гідратацією портландцементу та осадженням карбонату кальцію навколо тріщин.

Механічний ефект аутогенного самозалікування полягає в заповненні відкритих тріщин дрібними частинками, що просочуються з пошкодженої поверхні бетону або переносяться в тріщину водою.

Аутогенне загоєння найбільш ефективно для дуже малих тріщин (менше 0,3 мм у ширину).

2. Бактерія *Bacillus sphaericus* виявила здатність повністю вилікувати тріщини шириною до 0,97 мм, що майже в чотири рази більше, ніж у випадку без бактерій [29]. Однак існує обмеження ефективності самозагоєння для великих та широких тріщин. Важливими факторами постають вік та розмір тріщин, а також включення до цементних композицій різних агентів, таких як мінерали, бактерії та мікрокапсули з адгезивними елементами [30].

3. Наступний і один із найбільш поширених методів – це інкапсуляція. Процес герметизації відбувається, коли тріщина з'являється всередині сполучної матриці та поширюється через капсулу, яку

розриває, вивільняючи лікувальний агент. Виділена загоювальна речовина заповнює тріщину й стримує її подальше поширення. Зазвичай зменшення ширини та кількості тріщин у бетоні поліпшує його міцність. Тому механічні властивості бетону частково відновлюються.

Важливо уникати великої кількості порожнистих волокон або капсул, оскільки це може негативно вплинути на міцність цементної матриці. Однак дослідження підтверджують можливість ефективного самовідновлення в разі численних ушкоджень за допомогою методів інкапсуляції.

Незважаючи на переваги самовідновлюваного бетону, такі як відновлення та тривалість служби, важливо також звернути увагу на вартість його виробництва. Потрібні подальші дослідження, щоб знайти способи зниження витрат, пов'язаних із самовідновленням.

З використанням самовідновлення бетонні споруди стають менш піддатливими до зношування. Самовідновлення бетону створює можливість будувати довговічні конструкції, що витримують екстремальні умови експлуатації, такі як висока механічна втома та екстремальні температури. Деякі інфраструктурні об'єкти потребують тривалого терміну служби, який перевищує стандартні вимоги, наприклад, у морських або підземних спорудах, або в регіонах із суворим кліматом.

Самовідновлюваний бетон може значно знизити витрати на технічне обслуговування, незважаючи на збільшення вартості інфраструктури. Технологія самовідновлення може стати популярною для бетонних конструкцій в найближчому майбутньому, забезпечуючи довговічність та надійність споруд. Такі конструкції будуть ефективно витримувати експлуатаційні випробування, що робить їх ідеальними для різних проектів у містах та передмістях, забезпечуючи тривалий та ефективний ремонт.

Висновки.

1. Включення властивостей самовідновлення в асфальтобетонні

покриття стало ефективним методом для збільшення терміну їх служби та досягнення екологічності дорожнього одягу.

2. Досліджено наявні та вдосконалені технології самовідновлення, придатні для застосування в асфальтових покриттях, а саме: включення загоювальних речовин, індукційний нагрів та гібридні технології.

3. Вивчено механізми самовідновлення бетону: аутогенні, на основі автономних бактерій і на основі автономних капсул.

4. З'ясовано, що наразі успішно застосовуються самовідновлювані асфальт і бетон на основі мікрокапсул. Термін служби асфальтобетонних покриттів передбачається продовжити на 60–70%.

Як позитивні, так і негативні ефекти бетону та асфальту на основі мікрокапсул слід враховувати в конкретних випадках застосування. Самовідновлення важливе для того, щоб утримувати покриття автомобільних доріг й інфраструктурні об'єкти від передчасного руйнування.

5. Дослідження самовідновлюваних покриттів спрямовані на розроблення

розумної та ефективної системи дорожнього одягу, здатної до самооцінки та автоматизованого ремонту тріщин. Серед різних існуючих технологій самовідновлення асфальтобетонних покриттів відповідну технологію слід обирати на основі аналізу оптимальних умов відновлення та відповідної ефективності.

Вибір технології повинен базуватися на її здатності ефективно відновлювати пошкодження та тріщини в асфальті і бетони, забезпечуючи тривалий та надійний захист. Технологія повинна бути доступною з точки зору витрат. Важливо враховувати як вартість матеріалів, так і трудомісткість процесу.

Перспективи. Самовідновлювані дорожні покриття – це сукупність передових рішень для загоєння тріщин асфальту та бетону і збільшення терміну їх служби. Проте все це – ще галузь досліджень, що розвивається, з величезним потенціалом для інновацій та поліпшення життя людей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Проект Плану відновлення України. Матеріали робочої групи «Відновлення та розбудова інфраструктури». Національна рада з відновлення України від наслідків війни. (2022) 178 с. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/restoration-and-development-of-infrastructure.pdf>
2. Balashova Yuliia, Demianenko Viktor, Tkach Nataliia, Karasev Hennadii. Ensuring the sustainability of the roadbeds in the zones of the underground mine works. Vol. 123. EDP Sciences. 2019. P. 01041. 13 pp. Scopus. ISSN 25550403. DOI: 10.1051/e3sconf/201912301041. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57211522441&eid=2-s2.0-85074287353>
3. Vasudevan R., Nigam S. K., Velkennedy R., Ramalinga A., Sekar Chandra, Sundarakannan B. Utilization of waste plastics for flexible pavement. Indian High Ways (Indian Road Congress). Vol. 34, № 7. Pp. 105–111. (July 2006). URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.555.1740&rep=rep1&type=pdf>
4. Toby McCartney CEO of The Plastic Road Company. URL: <https://environmentjournal.online/articles/interview-toby-mccartney-ceo-of-the-plastic-road-company/>
5. Пластикове покриття – дороги майбутнього. URL: <http://www.agroprofi.com.ua/statti/1901-plastykove-pokryttya-dorohy-maybutnoho>
6. PlasticRoad: Solution to the plastic waste problem. URL: <https://www.startupselfie.net/2022/05/11/plasticroad-solution-to-plastic-waste-problem/>
7. Balashova Yuliia, Demianenko Viktor, Sankov Petro, Lukianenko Vladislav, Youb Khadija/ New construction solutions and materials for panels of road pavements. *Innovative Technologies in Construction, Civil Engineering and Architecture. AIP Conference Proceedings*. Vol. 2678. Pp. 020001. 2023, 15 February. P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0118620>; <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/5.0118620>; <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?origin=resultslist&authorId=57211518828&zone>
8. Балашова Ю. Б., Дем'яненко В. В., Бондаренко Л. П., Лук'яненко В. В., Балашов А. О. Альтернативні матеріали для покриттів автомобільних доріг. *Український журнал будівництва та архітектури*, 2023. № 2 (014). С. 7–18. URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/issue/view/16663>; DOI:10.30838/J.BPSACEA.2312.250423.7.925.
9. First highway with glow-in-the-dark markings opens in the Netherlands. URL: <https://newatlas.com/smart-highway-glowing-lines/34363/>
10. Electrified roads could power cars from the ground up. URL: <https://www.newscientist.com/article/mg21128295-700-electrified-roads-could-power-cars-from-the-ground-up/>

11. Solar Roadways. URL: <https://solarroadways.com/specifics/solar/>
12. Holcim will Betonbeläge zum Aufladen von Elektromobilen entwickeln. URL: <https://www.swissinfo.ch/ger/alle-news-in-kuerze/holcim-will-betonbelaege-zum-aufladen-von-elektromobilen-entwickeln/47241652>
13. Topmix Permeable. URL: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Topmix_Permeable
14. Tabakovic A., Schlangen E. Self-healing technology for asphalt pavements. Delft University of Technology. *Advances in Polymer Science*. November, 2016. Pp. 1–22. URL: https://doi.org/10.1007%2F12_2015_33; https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/45373235/Self_healing_Technology_for_Asphalt_Pavements_Revised.pdf
15. Self-healing Concrete Wins Innovation Award. URL: <https://www.costain.com/news/news-releases/self-healing-concrete-wins-innovation-award/>
16. WPI Researcher Develops Self-Healing Concrete that Could Multiply Structures' Lifespans, Slash Damaging CO₂ Emissions. URL: <https://www.wpi.edu/news/wpi-researcher-develops-self-healing-concrete-could-multiply-structures-lifespans-slash>
17. Das B. P., Siddagangaiah A. K. Identification of parameter to assess cracking resistance of asphalt mixtures subjected to aging and moisture conditioning. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2022. Vol. 9, iss. 2. Pp. 293–304. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85128540892&origin=inward&txGid=76cc93e4c7727f978bbb659ad59347fd>
18. Gardner D., Lark R., Jefferson T. et Davies R. A survey on problems encountered in current concrete construction and the potential benefits of self-healing cementitious materials. *Case Studies in Construction Materials*. 2018. Vol. 8. Pp. 238–247. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85042198855&origin=inward&txGid=6822f8f5e79075370376584e2ef36d75>
19. Enlin Ma, Xi Chen, Jinxing Lai, Xiangze Kong, Chunxia Guo. Self-healing of microcapsule-based materials for highway construction: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2023. Vol. 10, iss. 3. Pp. 368–384. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.02.003>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756423000533>
20. Cui G., Ma J., Wang D. Applying the new corrugated steel plate (NCSP) liner in the seasonally frozen tunnel to enhance the insulation capacity of linings. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. № 26. Art. 101130. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85119247736&origin=inward&txGid=a4ba994c29e212e1960215c912fe6d2b>
21. Schreiberova H., Bily P., Fladr J. et al. Impact of the self-healing agent composition on material characteristics of bio-based self-healing concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2019. № 11. Art. e00250. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85066302842&origin=inward&txGid=860287fe5d04365807b7034239220797>
22. Anupam B. R., Umesh Chandra Sahoo, Anush K. Chandrappa. A methodological review on self-healing asphalt pavements. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 321. Art. 126395. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126395>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822000897>
23. Xue C., Li W., Li J. et al. A review study on encapsulation-based self-healing for cementitious materials. *Structural Concrete*. 2019. № 20 (1). Pp. 198–212. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85052850583&origin=inward&txGid=1c6a95f0c3c5c990eea059ac4fc74715>
24. Qureshi T., Al-Tabbaa A. *Advanced Functional Materials*. IntechOpen; London, UK: 2020. *Self-Healing Concrete and Cementitious Materials*. DOI: 10.5772/intechopen.92349. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/72141>
25. Khitab A., Anwar W., Ul-Abdin Z., Tayyab S., Ibrahim O. A. *Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials: Properties, Modelling and Applications*. Elsevier; Amsterdam, The Netherlands: 2019. Applications of self healing nano concretes. Pp. 501–524. URL: https://www.elsevier.com/books-and-journals:https://www.researchgate.net/profile/Elham-Mansouri-2/publication/338816425_Radiation_protection_characteristics_of_nano-concretes_against_photon_and_neutron_beams/links/5ee8eeb7458515814a62e4a1/Radiation-protection-characteristics-of-nano-concretes-against-photon-and-neutron-beams.pdf
26. Amran M., Onaizi Ali M., Fediuk R., Vatin N., Rashid R. S. M., Abdelgader H., Ozbakkaloglu T. Self-Healing Concrete as a Prospective Construction Material: a review. 2022. *Materials*. Basel. Vol. 15 (9). Pp. 3214. DOI: 10.3390/ma15093214. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9106089/#B34-materials-15-03214>
27. Qureshi T., Kanellopoulos A., Al-Tabbaa A. Autogenous self-healing of cement with expansive minerals-I: Impact in early age crack healing. *Constr. Build. Mater.* 2018. № 192. Pp. 768–784. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.143. URL: https://www.researchgate.net/publication/328290640_Autogenous_self-healing_of_cement_with_expansive_minerals-I_Impact_in_early_age_crack_healing
28. Qureshi T. S., Al-Tabbaa A. Self-healing of drying shrinkage cracks in cement-based materials incorporating reactive MgO. *Smart Mater. Struct.* 2016. № 25. Pp. 084004. DOI: 10.1088/0964-1726/25/8/084004. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/25/8/084004/meta>

29. Qian C., Chen H., Ren L., Luo M. Self-healing of early age cracks in cement-based materials by mineralization of carbonic anhydrase microorganism. *Front. Microbiol.* 2015. № 6. Pp. 1225. DOI: 10.3389/fmicb.2015.01225.29. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2015.01225/full>

30. Yang Y., Lepech M. D., Yang E. H., Li V. C. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cem. Concr. Res.* 2009. № 39. Pp. 382–390. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.01.013. URL: https://www.researchgate.net/publication/222421225_Autogenous_healing_of_engineered_cementitious_composites_under_wet-dry_cycles

REFERENCES

1. *Proekt Planu vidnovlennia Ukrainy* [Draft Recovery Plan for Ukraine.] *Materialy robochoi hrupy "Vidnovlennia ta rozbudova infrastruktury"* [Materials of the working group "Restoration and Development of Infrastructure"]. National Council for the Restoration of Ukraine from the Consequences of War. 2022, 178 p. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/restoration-and-development-of-infrastructure.pdf> (in Ukrainian).

2. Balashova Yuliia, Demianenko Viktor, Tkach Nataliia and Karasev Hennadii. Ensuring the sustainability of the roadbeds in the zones of the underground mine works. Vol. 123, EDP Sciences, 2019, p. 01041, 13 p., Scopus, ISSN 25550403, doi: 10.1051/e3sconf/201912301041. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57211522441&eid=2-s2.0-85074287353>

3. Vasudevan R., Nigam S.K., Velkennedy R., Ramalinga Chandra Sekar A. and Sundarakannan B. Utilization of waste plastics for flexible pavement, Indian High Ways (Indian Road Congress). 2006, vol. 34, no. 7, pp. 105–111. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.555.1740&rep=rep1&type=pdf>

4. McCartney Toby CEO of The Plastic Road Company. URL: <https://environmentjournal.online/articles/interview-toby-mccartney-ceo-of-the-plastic-road-company/>

5. *Plastykove pokryttia – dorohy maibutnoho* [Plastic pavement – roads of the future] 2020. URL: <http://www.agroprofi.com.ua/statti/1901-plastykove-pokryttya-dorohy-maybutnoho> (in Ukrainian).

6. PlasticRoad: Solution to the plastic waste problem. 2022. URL: <https://www.startupselfie.net/2022/05/11/plasticroad-solution-to-plastic-waste-problem/>

7. Balashova Yuliia, Demianenko Viktor, Sankov Petro, Lukianenko Vladislav and Youb Khadija. New construction solutions and materials for panels of road pavements. *Innovative Technologies in Construction. Civil Engineering and Architecture. AIP Conference Proceedings*, 2023, no. 2678, 020001, pp. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0118620>; <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/5.0118620>; <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?origin=resultslist&authorId=57211518828&zone>

8. Balashova Yu.B., Demianenko V.V., Bondarenko L.P., Lukianenko V.V. and Balashov A.O. *Alternatyvni materialy dlia pokryttiv avtomobilnykh dorih* [Alternative materials for pavements of roads]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 2 (014), pp. 7–18, ISSN 2710-0367 (Print), ISSN 2710-0375 (Online). URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/issue/view/16663/>; DOI:10.30838/J.BPSACEA.2312.250423.7.925. (in Ukrainian).

9. First highway with glow-in-the-dark markings opens in the Netherlands. URL: <https://newatlas.com/smart-highway-glowing-lines/34363/>

10. Electrified roads could power cars from the ground up. URL: <https://www.newscientist.com/article/mg21128295-700-electrified-roads-could-power-cars-from-the-ground-up/>

11. Solar Roadways. URL: <https://solarroadways.com/specifics/solar/>

12. Holcim will Betonbeläge zum Aufladen von Elektromobilen entwickeln. 2022. URL: <https://www.swissinfo.ch/ger/alle-news-in-kuerze/holcim-will-betonbelaege-zum-aufladen-von-elektromobilen-entwickeln/47241652>

13. Topmix Permeable. 2020. URL: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Topmix_Permeable

14. Tabakovic A. and Schlangen E. Self-healing technology for asphalt pavements. 2016. Delft University of Technology. *Advances in Polymer Science*, (November), pp. 1–22. URL: https://doi.org/10.1007%2F12_2015_33; https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/45373235/Self_healing_Technology_for_Asphalt_Pavements_Revised.pdf

15. Self-healing Concrete Wins Innovation Award. 2014. URL: <https://www.costain.com/news/news-releases/self-healing-concrete-wins-innovation-award/>

16. WPI Researcher Develops Self-Healing Concrete that Could Multiply Structures' Lifespans, Slash Damaging CO₂ Emissions. 2021. URL: <https://www.wpi.edu/news/wpi-researcher-develops-self-healing-concrete-could-multiply-structures-lifespans-slash>

17. Das B.P. and Siddagangaiiah A.K. Identification of parameter to assess cracking resistance of asphalt mixtures subjected to aging and moisture conditioning. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2022, vol. 9, iss. 2, pp. 293–304. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85128540892&origin=inward&txGid=76cc93e4c7727f978bbb659ad59347fd>

18. Gardner D., Lark R., Jefferson T. et Davies R. A survey on problems encountered in current concrete construction and the potential benefits of self-healing cementitious materials. *Case Studies in Construction Materials*.

2018, vol. 8, pp. 238–247. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85042198855&origin=inward&txGid=6822f8f5e79075370376584e2ef36d75>

19. Enlin Ma, Xi Chen, Jinxing Lai, Xiangze Kong, Chunxia Guo. Self-healing of microcapsule-based materials for highway construction : a review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2023, vol. 10, iss. 3, pp. 368–384. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.02.003>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756423000533>

20. Cui G., Ma J. and Wang D. Applying the new corrugated steel plate (NCSP) liner in the seasonally frozen tunnel to enhance the insulation capacity of linings. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021, no. 26, article 101130. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85119247736&origin=inward&txGid=a4ba994c29e212e1960215c912fe6d2b>

21. Schreiberova H., Bily P., Fladr J. et al. Impact of the self-healing agent composition on material characteristics of bio-based self-healing concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2019, no. 11, article e00250. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85066302842&origin=inward&txGid=860287fe5d04365807b7034239220797>

22. Anupam B.R., Umesh Chandra Sahoo and Anush K. Chandrappa. A methodological review on self-healing asphalt pavements. *Construction and Building Materials*. 2022, vol. 321, article 126395. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126395>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822000897>

23. Xue C., Li W., Li J. et al. A review study on encapsulation-based self-healing for cementitious materials. *Structural Concrete*. 2019, no. 20 (1), pp. 198–212. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85052850583&origin=inward&txGid=1c6a95f0c3c5c990eea059ac4fc74715>

24. Qureshi T. and Al-Tabbaa A. *Advanced Functional Materials*. IntechOpen; London, UK: 2020. Self-Healing Concrete and Cementitious Materials. DOI: 10.5772/intechopen.92349. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/72141>

25. Khitab A., Anwar W., Ul-Abdin Z., Tayyab S. and Ibrahim O.A. *Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials: Properties, Modelling and Applications*. Elsevier; Amsterdam, The Netherlands: 2019. Applications of self healing nano concretes, pp. 501–524. URL: https://www.elsevier.com/books-and-journals:https://www.researchgate.net/profile/Elham-Mansouri-2/publication/338816425_Radiation_protection_characteristics_of_nano-concretes_against_photon_and_neutron_beams/links/5ee8eeb7458515814a62e4a1/Radiation-protection-characteristics-of-nano-concretes-against-photon-and-neutron-beams.pdf

26. Amran M., Ali M. Onaizi, Fediuk R., Vatin N., Rashid R.S.M., Abdelgader H. and Ozbakkaloglu T. Self-Healing Concrete as a Prospective Construction Material : a review. *Materials (Basel)*. 2022, no. 15 (9), 3214. DOI: 10.3390/ma15093214. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9106089/#B34-materials-15-03214>

27. Qureshi T., Kanellopoulos A. and Al-Tabbaa A. Autogenous self-healing of cement with expansive minerals-I: Impact in early age crack healing. *Constr. Build. Mater*. 2018, no. 192, pp. 768–784. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.143. URL: https://www.researchgate.net/publication/328290640_Autogenous_self-healing_of_cement_with_expansive_minerals-I_Impact_in_early_age_crack_healing

28. Qureshi T.S. and Al-Tabbaa A. Self-healing of drying shrinkage cracks in cement-based materials incorporating reactive MgO. *Smart Mater. Struct.* 2016, no. 25, 084004. DOI: 10.1088/0964-1726/25/8/084004; URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/25/8/084004/meta>

29. Qian C., Chen H., Ren L. and Luo M. Self-healing of early age cracks in cement-based materials by mineralization of carbonic anhydrase microorganism. *Front. Microbiol.* 2015, no. 6, 1225. DOI: 10.3389/fmicb.2015.01225.29. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2015.01225/full>

30. Yang Y., Lepech M.D., Yang E.H. and Li V.C. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cem. Concr. Res.* 2009, no. 39, pp. 382–390. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.01.013. URL: https://www.researchgate.net/publication/222421225_Autogenous_healing_of_engineered_cementitious_composites_under_wet-dry_cycles

Надійшла до редакції: 24.04.2024.