

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ГУМОВОЇ КРИХТИ В ДОРОЖНЬОМУ БУДІВНИЦТВІ

Вінницький національний технічний університет

Робота присвячена комплексному техніко-економічному обґрунтуванню використання гумової крихти в дорожньому будівництві як одного з інноваційних напрямів підвищення довговічності та якості автомобільних доріг. У роботі розглянуто сучасні підходи до застосування вторинної гумової сировини, отриманої шляхом перероблення зношених автомобільних шин, що на сьогодні є важливою складовою європейської та світової практики сталого розвитку. На основі узагальнення технічних характеристик модифікованих асфальтобетонних сумішей проаналізовано вплив гумової крихти на фізико-механічні властивості дорожнього покриття, зокрема на підвищення еластичності, опір утворенню тріщин, стійкість до колійності та покращення зчеплення коліс із поверхнею дороги. Особливу увагу приділено зниженню шуму транспортних потоків та підвищенню комфортності руху в умовах міського середовища.

У статті також висвітлено екологічні переваги технології, пов'язані з утилізацією відпрацьованих шин, зменшенням навантаження на полігони твердих побутових відходів та розвитком ринку вторинної переробки. З огляду на необхідність мінімізації негативного впливу на довкілля, застосування гумової крихти розглядається як ефективний інструмент екологічної модернізації дорожньої галузі.

Економічний аналіз включає порівняння традиційних та модифікованих технологій за критеріями вартості будівництва, тривалості експлуатації та потреби у ремонтах. Показано, що, незважаючи на деяке підвищення початкових витрат, дорожні покриття з гумовою крихтою забезпечують значну економію протягом життєвого циклу дороги завдяки збільшенню терміну служби та зниженню частоти ремонтних робіт. Представлено оцінку економічної ефективності із застосуванням таких показників, як чиста теперішня вартість, індекс рентабельності та період окупності.

Зроблено висновок, що використання гумової крихти є перспективним напрямом розвитку дорожнього будівництва в Україні, який поєднує технологічні, економічні та екологічні переваги.

Ключові слова: гумова крихта, дорожнє будівництво, асфальтобетон, економічна ефективність, модифіковані матеріали, утилізація шин.

Вступ

Високоякісне дорожнє будівництво та впровадження технологій повторного використання ресурсів належать до ключових напрямів розвитку сучасної інфраструктури автомагістралей [1-3]. Однією з актуальних проблем сучасного дорожнього будівництва є забезпечення довговічності та екологічності дорожніх покриттів. Традиційні асфальтобетонні суміші мають обмежений термін експлуатації через вплив кліматичних умов, динамічних навантажень та старіння бітуму. Водночас щорічно утворюються значні обсяги відпрацьованих автомобільних шин, утилізація яких становить екологічну проблему.

Одним із ефективних напрямів вирішення цих завдань є використання гумової крихти як модифікатора в асфальтобетонних сумішах, що дозволяє одночасно підвищити експлуатаційні властивості дорожніх покриттів і зменшити негативний вплив відходів на довкілля [4-7].

Метою статті є комплексне техніко-економічне обґрунтування доцільності використання гумової крихти в дорожньому будівництві шляхом аналізу її впливу на технологічні, експлуатаційні, економічні та екологічні характеристики дорожніх покриттів.

Для досягнення поставленої мети в статті передбачено виконання таких **завдань**:

- Проаналізувати сучасні технології перероблення та використання гумової крихти, отриманої зі зношених автомобільних шин, у контексті міжнародних тенденцій сталого розвитку.
- Систематизувати технічні характеристики асфальтобетонних сумішей, модифікованих гумовою крихтою, та визначити їх вплив на основні фізико-механічні властивості дорожнього покриття.
- Оцінити експлуатаційні переваги модифікованих покриттів, зокрема еластичність, стійкість до тріщиноутворення, опір колійності, шумозниження та покращення характеристик взаємодії шин із дорогою.
- Провести економічний аналіз ефективності використання гумової крихти, порівнявши традиційні та модифіковані технології дорожнього будівництва за вартісними параметрами, строком служби та потребою в ремонтах.

- Визначити інтегральну економічну ефективність технології на основі показників NPV, індексу рентабельності та періоду окупності.
- Обґрунтувати перспективність впровадження гумової крихти в дорожнє будівництво України з урахуванням отриманих технічних, екологічних та економічних результатів.

Огляд літератури

У США та країнах Європи гумова крихта широко використовується в будівництві доріг з високим трафіком, оскільки така добавка дозволяє зменшити витрати на ремонт і подовжити термін служби покриття. США: гумоасфальт застосовується з 1970-х років, особливо на автострадах з інтенсивним рухом. У Швеції та Німеччині гумова крихта використовується для зниження шуму.

Застосування асфальту, модифікованого гумовою крихтою, покращує теплостійкість і міцність асфальтового в'язучого за низьких температур, підвищує довговічність покриття, сприяє утилізації відходів [8-10] та зменшує загальні витрати на будівництво. Саме тому технологія модифікації асфальту гумовою крихтою активно досліджується протягом останніх років.

Велика кількість досліджень зосереджена на властивостях асфальтів, модифікованих гумовою крихтою, а також сумішей на їх основі. Основні напрями робіт стосуються: удосконалення технологій переробки гумової крихти, оцінки експлуатаційних характеристик та вивчення механізмів модифікації. Щодо покращення процесів переробки крихти вчені досліджували різні методи попередньої обробки та поєднання з іншими матеріалами — активацію, щеплення, зсувну обробку — щоб підвищити її функціональні властивості [11-15]. Зокрема, Q. Liu та ін. встановили, що повне подрібнення частинок сприяє зниженню робочої в'язкості асфальту [11], тоді як S. Liu та ін. виявили, що використання неіоногенних активаторів поліпшує температурну стабільність модифікованого асфальту [12]. Z. Chen та ін. зазначили, що щеплення гумових частинок з використанням відпрацьованої олії збільшує їхню стійкість до старіння [13], а A. Ameli удосконалив властивості матеріалу за допомогою мікрохвильової та біологічної обробки [14]. Дослідження H. Wang продемонстрували, що дрібніші та більш однорідні частки, отримані водоструминним подрібненням, забезпечують кращу стабільність та меншу температурну чутливість [15].

Щодо експлуатаційних властивостей асфальтів, модифікованих гумовою крихтою, дослідники аналізували вплив вмісту крихти, її гранулометрії та інших параметрів на роботу асфальтових сумішей [16-20]. Так, S. Wang та ін. довели, що підвищений вміст крихти та довше зберігання сприяють покращенню характеристик матеріалу за високих та низьких температур [16]. Додавання поліфосфорної кислоти, як показали S. Ren та ін., істотно підвищує стабільність модифікованого асфальту [17]. P. Xu порівнював суміші на основі гумової крихти з SBS-модифікованими і встановив переваги першої за низькотемпературною в'язкістю та економічністю [18]. Дослідження J. Zhang визначило, що при вмісті крихти 9% підвищується опір втомі та збільшується довговічність покриття [19]. S. Lv показав, що збільшення кількості або розміру часток гумової крихти підвищує теплостійкість і водостійкість суміші, хоча надмірний вміст призводить до погіршення характеристик [20].

Дослідження механізмів модифікації асфальту гумовою крихтою проводилися переважно з використанням мікроскопічних методів [21-23]. X. Yang та ін. аналізували мікроструктуру матеріалу та покращили сумісність асфальту й гумових частинок [21]. Z. Zhang встановили, що процес модифікації має переважно фізичний характер [22], а López-Moroet підкреслив важливу роль сажі в структуроутворенні гумових асфальтів, виготовлених методом сухого змішування [23].

Основна частина

Гумова крихта отримується шляхом переробки зношених автомобільних шин і використовується як добавка до асфальтобетону або основного шару доріг.

Механічна переробка: подрібнення шин на фрагменти за допомогою спеціального обладнання. Кріогенна переробка: подрібнення шин при низьких температурах, що забезпечує отримання крихти з гладкою поверхнею. Хімічна переробка: застосування реагентів для руйнування структури гуми. Отримана крихта може мати різний розмір зерен (від 0,1 до 4 мм) залежно від вимог до кінцевого продукту.

Додавання гумової крихти до асфальтових сумішей підвищує еластичність і довговічність покриття. Такий асфальт, відомий як гумоасфальт, має ряд переваг: **Стійкість до тріщиноутворення:** гумова крихта забезпечує пластичність покриття, що зменшує ризик утворення мікротріщин.

Морозостійкість: покриття з гумовою крихтою витримує значні температурні коливання. **Зменшення шуму:** гумовий асфальт ефективно поглинає звукові хвилі, що особливо важливо в міських умовах.

Гумова крихта використовується для зміцнення основи дорожніх покриттів, зокрема у вигляді сумішей з цементом або іншими зв'язувальними матеріалами. Гумова крихта також застосовується для створення безшовних покриттів, що використовуються на дитячих майданчиках, тротуарах і велосипедних доріжках.

Технічні особливості використання гумової крихти

Гумова крихта – це продукт переробки зношених шин шляхом механічного подрібнення. Основними фракціями, які використовуються в дорожньому будівництві, є частинки розміром від 0,5 до 5 мм. Її додають до бітуму або асфальтобетонної суміші в кількості 10–20 % від маси в'язучого. На основі узагальнення технічних характеристик модифікованих асфальтобетонних сумішей проведений аналіз впливу гумової крихти на фізико-механічні властивості дорожнього покриття в таблиці 1.

Таблиця 1

Експлуатаційні переваги модифікованих дорожніх покриттів

Показник	Значення
Еластичність покриття	Зростання на 20–35%
Опір повторним навантаженням	Підвищення до 30%
Зменшення тріщиноутворення	Скорочення на 25–45%
Цикли розтягування до мікротріщин	Зростання у 1,3–1,5 раза
Опір колійності	Покращення на 30–50%
Стійкість до деформацій у спеку	Підвищення на 20–40%
Шумозниження	Зменшення на 3–6 дБ
Зниження шуму шин	Зменшення на 10–25%
Зчеплення у вологих умовах	Покращення на 10–20%
Гальмівний шлях на мокрому покритті	Скорочення на 8–15%
Мікροшорсткість	Підвищення на 12–18%

Введення гумової крихти призводить до таких змін у властивостях матеріалу: підвищується еластичність і тріщиностійкість покриття; знижується шумність руху транспорту; покращується зчеплення шин із поверхнею дороги; підвищується стійкість до колійності при високих температурах; зменшується водопроникність та старіння бітуму.

Технологічно суміш із гумовою крихтою вимагає більш ретельного змішування при температурі 180–190 °С, але не потребує суттєвих змін у стандартному технологічному процесі укладання.

Економічна ефективність використання гумової крихти

Використання гумової крихти в дорожньому будівництві є технологічно обґрунтованим та економічно вигідним рішенням, що забезпечує [5,6]:

- підвищення якості та довговічності дорожніх покриттів;
- скорочення витрат на експлуатацію та ремонт;
- зниження екологічного навантаження;
- раціональне використання відходів автомобільної промисловості.

З огляду на техніко-економічні переваги, впровадження цієї технології в Україні має значний потенціал і може стати важливим елементом оновлення дорожньої інфраструктури.

У прикладі порівнюємо два варіанти покриття на горизонті оцінювання 14 років (щоб порівняти традиційне покриття та покриття з гумовою крихтою), використовуючи дисконтовані показники. Норма дисконту ($E=10\%$).

Традиційне покриття (варіант 1): Початкові інвестиції $K_1 = 1,000,000$ грн ($t = 0$). Щорічні поточні витрати $Z_1 = 80,000$ грн (роки 1–14). Додатковий капремонт у рік 7: 300,000 грн. Повна заміна у рік 10: додаткові витрати $K_d = 1,000,000$ грн.

Покриття з гумовою крихтою (варіант 2): Початкові інвестиції $K_2 = 1,080,000$ грн (на 8% дорожче). Щорічні поточні витрати $Z_2 = 50,000$ грн (роки 1–14). Капремонт у рік 12: 200,000 грн. Життєвий цикл без повної заміни — 14 років.

Проведено дисконтовані розрахунки (усі платежі приведено до моменту 0 при ($E=10\%$)) в таблиці 2.

Розрахунок дисконтованих витрат, грн

Рік	Грошові потоки Варіант 1	Грошові потоки Варіант 2	Додаткові витрати Варіант 1	Коефіцієнт дисконтуван ня при нормі дисконту 10%	NPV ₁	NPV ₂	NPV додаткови х витрат варіанту 2
0	-1000000	-1080000	80000	1,00	-1000000,00	-1080000,	80000,00
1	-80000	-50000	-30000	0,91	-72727,27	-45454,55	-27272,73
2	-80000	-50000	-30000	0,83	-66115,70	-41322,31	-24793,39
3	-80000	-50000	-30000	0,75	-60105,18	-37565,74	-22539,44
4	-80000	-50000	-30000	0,68	-54641,08	-34150,67	-20490,40
5	-80000	-50000	-30000	0,62	-49673,71	-31046,07	-18627,64
6	-80000	-50000	-30000	0,56	-45157,91	-28223,70	-16934,22
7	-380000	-50000	-330000	0,51	-195000,08	-25657,91	-169342,18
8	-80000	-50000	-30000	0,47	-37320,59	-23325,37	-13995,22
9	-80000	-50000	-30000	0,42	-33927,81	-21204,88	-12722,93
10	-1080000	-50000	-1030000	0,39	-416386,75	-19277,16	-397109,59
11	-80000	-50000	-30000	0,35	-28039,51	-17524,69	-10514,82
12	-80000	-250000	170000	0,32	-25490,47	-79657,70	54167,24
13	-80000	-50000	-30000	0,29	-23173,15	-14483,22	-8689,93
14	-80000	-50000	-30000	0,26	-21066,50	-13166,56	-7899,94

Дисконтовані загальні витрати традиційного покриття визначали за формулою:

$$NPV = \sum_{t=0}^{T_p} (K_t - Z_t) \cdot \eta_t, \quad (1)$$

де η_t – коефіцієнт дисконтування.

Z_t – витрати у t -й рік;

K_t – інвестиції у t -й рік;

T_p – розрахунковий період.

$$NPV_1 = 2\,128\,825,72 \text{ грн.}$$

Дисконтовані загальні витрати покриття з гумовою крихтою:

$$NPV_2 = 1\,512\,060,54 \text{ грн.}$$

Дисконтована економія при застосуванні гумової крихти:

$$\Delta NPV = NPV_1 - NPV_2 = 616\,765 \text{ грн.}$$

Додаткові початкові інвестиції $\Delta K = 80\,000$ грн.

Розрахункова норма рентабельності $IRR = 616\,765 / 80\,000 = 7,71 = 771\%$.

Це означає, що кожна додаткова вкладена гривня дає ~7,7 грн дисконтованої економії протягом життєвого циклу.

Загальні показники економічної ефективності варіантів зведені в таблицю 3.

Загальні показники економічної ефективності варіантів порівняння

Показник	Значення
NPV традиційне покриття 10%	-2128825,72
NPV покриття з гумовою крихтою 10%	-1512060,54
ΔNPV , $E = 10\%$	-616765,18
ΔK	-80000
IRR	7,7
T, роки	4

Дисконтований термін окупності (Т): накопичена дисконтована економія стає додатною приблизно на 4-му році — тобто після ~4 років економія починає перевищувати додаткові початкові вкладення та інші відмінності у потоках.

В результаті проведення аналізу чутливості (таблиця 4) при різних нормах дисконту найкращій варіант розглядається при $E = 8\%$ - $IRR = 9,07\%$.

Таблиця 4

Аналіз чутливості

E	NPV варіанту 1	NPV варіанту 2	Δ NPV	Δ K	IRR
0,08	-2297779,565	-	-726144,9644	-80000	9,076812055
0,1	-2128825,721	-	-616765,1851	-80000	7,709564813
0,12	-1987931,459	-	-525188,0294	-80000	6,564850368

У межах техніко-економічного аналізу визначено, що використання гумової крихти підвищує довговічність дорожніх покриттів на 30–40%, а це, у свою чергу, забезпечує зниження сумарних витрат на будівництво на 20–25%.

Для оцінки економічної доцільності використання гумової крихти було проведено порівняльний аналіз двох варіантів дорожнього покриття за допомогою кошторисної програми при складанні кошторисної документації в поточних цінах [26,27](таблиця 5).

Таблиця 5

Порівняльний аналіз загальних витрат протягом 20 років

Показник	Звичайний асфальтобетон	Асфальтобетон з гумовою крихтою
Собівартість 1 т суміші, грн	2 400	2 650
Орієнтовний термін служби, років	8	14
Витрати на ремонт протягом 20 років (у розрахунку на 1 км)	1 200 000	700 000
Загальні витрати життєвого циклу, грн/км	3 600 000	3 050 000

Отже, економія становить близько 15% на життєвому циклі дороги.

При будівництві 1 км двосмугової дороги (ширина 7 м, товщина покриття 0,06 м) витрачається близько 1 000 т асфальтобетонної суміші.

Якщо використати гумову крихту (10% маси бітуму), то:

- потрібно близько 10 т гумової крихти, отриманої з 1 200 зношених шин;
- собівартість збільшиться на 250 000 грн, але термін служби дороги зросте на 6 років;
- річна економія на ремонтах становить ≈ 90 000 грн, тобто витрати окупляться за менш ніж 3 роки.

Екологічні переваги

Додатковий ефект забезпечується за рахунок зменшення шуму на 3–5 дБ і скорочення утворення відходів шин на полігонах і поліпшенню стану довкілля.

Використання гумової крихти у дорожньому будівництві сприяє:

- зменшенню обсягів відходів, що підлягають спаленню або захороненню;
- зниженню викидів CO_2 , адже для виробництва модифікованих бітумів використовується менше нової нафтової сировини;
- зменшенню рівня шуму від транспортних потоків;
- створенню умов для циркулярної економіки, коли відходи стають вторинною сировиною.

Таким чином, технологія має не лише технічну, а й соціально-екологічну значущість.

Висновки

- У результаті проведеного дослідження визначено, що використання гумової крихти в дорожньому будівництві є ефективним напрямом підвищення довговічності, надійності та екологічності дорожніх покриттів. Аналіз технічних характеристик модифікованих асфальтобетонних сумішей підтвердив позитивний вплив гумової крихти на еластичність, стійкість до деформацій, опір утворенню тріщин і комфортність руху. Екологічні переваги технології полягають у раціональній утилізації шин та зниженні техногенного навантаження на довкілля. Економічні розрахунки довели доцільність впровадження такої технології завдяки економії протягом життєвого циклу дороги. Економічна ефективність полягає у зниженні витрат на ремонт і продовженні міжремонтного періоду на 40–60 %. Отже, застосування гумової крихти є перспективним і комплексно обґрунтованим рішенням для розвитку дорожньої галузі України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] L. Liu *et al.* Preparation of a heat insulation bonding layer for roads and its heat insulation effect. *Journal of Cleaner Production*. 2022.
- [2] S. Hosseimezhad *et al.* Surface functionalization of rubber particles to reduce phase separation in rubberized asphalt for sustainable construction. *Journal of Cleaner Production*. 2019.
- [3] N. Fiore *et al.* Evaluation of bitumen modification with crumb rubber obtained through a high pressure water jet (HPWJ) process. *Construction and Building Materials*. 2017.
- [4] Лялюк О. Г., Васюра І. В., Федорончук А. Використання гумової крихти у дорожньому будівництві. *Матеріали III Всеукраїнської наукової конференції здобувачів освіти і молодих учених "Відбудова транспортної інфраструктури України"* https://drive.google.com/file/d/1rqgfy9_f6p8sqw965wyl8lurssyqjeuq/view.
- [5] Р В.2.7-37641918-876:2017 Рекомендації з приготування та застосування бітумів і асфальтобетонних сумішей, модифікованих гумовою крихтою. К: Укравтодор. 2017. 19 с.
- [6] ДСТУ Б В.2.7 – 310:2016. Бітуми дорожні, модифіковані гумовою крихтою. Технічні умови. [Чинний від 2017-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2017. 12 с. (Національний стандарт України).
- [7] ДСТУ Б В.2.7 – 311:2016. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній, модифіковані гумовою крихтою. Технічні умови. [Чинний від 2017-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2017. 15 с. (Національний стандарт України).
- [8] C. Qian *et al.* Influence of polyphosphoric acid (PPA) on properties of crumb rubber (CR) modified asphalt. *Construction and Building Materials*. 2019.
- [9] F.J. López-Moro *et al.* Microscopic analysis of the interaction between crumb rubber and bitumen in asphalt mixtures using the dry process. *Construction and Building Materials*. 2013.
- [10] S.F. Kabir *et al.* Use of microbially desulfurized rubber to produce sustainable rubberized bitumen. *Resources, Conservation & Recycling*. 2021.
- [11] Q. Liu *et al.* Evaluation and optimization of asphalt binder and mixture modified with high activated crumb rubber content. *Construction and Building Materials*. 2022.
- [12] S. Liu *et al.* Variance analysis and performance evaluation of different crumb rubber modified (CRM) asphalt. *Construction and Building Materials*. 2009.
- [13] Z. Chen *et al.* Investigation of ultraviolet radiation aging gradient in asphalt binder. *Construction and Building Materials*. 2020.
- [14] A. Ameli *et al.* Investigation of the performance properties of asphalt binders and mixtures modified by Crumb Rubber and Gilsonite. *Construction and Building Materials*. 2021.
- [15] H. Wang *et al.* Preparation and performance evaluation of swine manure bio-oil modified rubber asphalt binder. *Construction and Building Materials*. 2021.
- [16] S. Wang *et al.* Laboratory evaluation of the properties of high-cured crumb rubber modified asphalt containing sulfur and polymer after the oxidative aging procedure. *Construction and Building Materials*. 2021.
- [17] S. Ren *et al.* The continuous swelling-degradation behaviors and chemo-rheological properties of waste crumb rubber modified bitumen considering the effect of rubber size. *Construction and Building Materials*. 2021.
- [18] P. Xu *et al.* Research on highly dissolved rubber asphalt prepared using a composite waste engine oil addition and microwave desulfurization method. *Construction and Building Materials*. 2021.
- [19] J. Zhang *et al.* Evaluation of VOCs inhibited effects and rheological properties of asphalt with high-content waste rubber powder. *Construction and Building Materials*. 2021.
- [20] S. Lv *et al.* Experimental investigation on the performance of bone glue and crumb rubber compound modified asphalt. *Construction and Building Materials*. 2021.
- [21] X. Yang *et al.* Effect of microwave-activated crumb rubber on reaction mechanism, rheological properties, thermal stability, and released volatiles of asphalt binder. *Journal of Cleaner Production*. 2020.
- [22] Z. Zhang *et al.* Construction and assessment technology of green road in China. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*. 2018.
- [23] JTTE Edition Office *et al.* New innovations in pavement materials and engineering: A review on pavement engineering research 2021. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2021.
- [24] Duan, Kaixi; Wang, Chaohui; Liu, Jikang; Song, Liang; Chen, Qian; Chen, Yuanzhao. Research progress and performance evaluation of crumb-rubber-modified asphalts and their mixtures. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 361. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.129687.

- [25] Sernas, Ovidijus; Vaitkus, Audrius; Skultecke, Judita. Performance of crumb rubber bitumen and asphalt modified in the wet process alone and in combination with SBS polymer. Road materials and pavement design. 2023. Vol. 24. P. 107-123. DOI 10.1080/14680629.2023.2180294.
- [26] <https://www.greonix.com.ua/ukr/nasha-produktsiya/gumova-krikhta>. Гумова крихта. (дата звернення: 20.09.2025).
- [27] <https://lxtan-sport.com/uk/dethttps://lxtan-sport.com/uk/det>. Технологія укладання покриття з гумової крихти технологія укладання покриття з гумової крихти. (дата звернення: 20.09.2025).

REFERENCES

- [1] L. Liu *et al.* Preparation of a heat insulation bonding layer for roads and its heat insulation effect. Journal of Cleaner Production .2022.
- [2] S. Hosseinezhad *et al.* Surface functionalization of rubber particles to reduce phase separation in rubberized asphalt for sustainable construction. Journal of Cleaner Production. 2019.
- [3] N. Fiore *et al.* Evaluation of bitumen modification with crumb rubber obtained through a high pressure water jet (HPWJ) process. Construction and Building Materials. 2017.
- [4] Lyalyuk O. H., Vasyura I. V., Fedoronchuk A. Vykorystannya humovoyi krykhty u dorozhn'omu budivnytstvi. Materialy III Vseukrayins'koyi naukovoyi konferentsiyi zdobuvachiv osvity i molodykh uchenykh "Vidbudova transportnoyi infrastruktury Ukrayiny" https://drive.google.com/file/d/1rqgfy9_f6p8sqw965wyl8lurssyqjeyq/view.
- [5] R V.2.7-37641918-876:2017 Rekomendatsiyi z pryhotuvannya ta zastosuvannya bitumiv i asfal'tobetonnykh sumishey, modyfikovanykh humovoyu krykhtoyu. K: Ukravtodor. 2017. 19 с.
- [6] DSTU B V.2.7 – 310:2016. Bitumy dorozhni, modyfikovani humovoyu krykhtoyu. Tekhnichni umovy.[Chynnyy vid 2017-01-01]. Kyiv: Minrehion Ukrayiny, 2017. 12 s. (Natsional'nyy standart Ukrayiny).
- [7] DSTU B V.2.7 – 311:2016. Sumishi asfal'tobetonni i asfal'tobeton dorozhniy, modyfikovani humovoyu krykhtoyu. Tekhnichni umovy.[Chynnyy vid 2017-01-01]. Kyiv: Minrehion Ukrayiny, 2017. 15 s. (Natsional'nyy standart Ukrayiny).
- [8] C. Qian *et al.* Influence of polyphosphoric acid (PPA) on properties of crumb rubber (CR) modified asphalt. Construction and Building Materials. 2019.
- [9] F.J. López-Moro *et al.* Microscopic analysis of the interaction between crumb rubber and bitumen in asphalt mixtures using the dry process. Construction and Building Materials. 2013.
- [10] S.F. Kabir *et al.* Use of microbially desulfurized rubber to produce sustainable rubberized bitumen. Resources, Conservation & Recycling. 2021.
- [11] Q. Liu *et al.* Evaluation and optimization of asphalt binder and mixture modified with high activated crumb rubber content. Construction and Building Materials. 2022.
- [12] S. Liu *et al.* Variance analysis and performance evaluation of different crumb rubber modified (CRM) asphalt. Construction and Building Materials. 2009.
- [13] Z. Chen *et al.* Investigation of ultraviolet radiation aging gradient in asphalt binder. Construction and Building Materials. 2020.
- [14] A. Ameli *et al.* Investigation of the performance properties of asphalt binders and mixtures modified by Crumb Rubber and Gilsonite. Construction and Building Materials. 2021.
- [15] H. Wang *et al.* Preparation and performance evaluation of swine manure bio-oil modified rubber asphalt binder. Construction and Building Materials. 2021.
- [16] S. Wang *et al.* Laboratory evaluation of the properties of high-cured crumb rubber modified asphalt containing sulfur and polymer after the oxidative aging procedure. Construction and Building Materials.2021.
- [17] S. Ren *et al.* The continuous swelling-degradation behaviors and chemo-rheological properties of waste crumb rubber modified bitumen considering the effect of rubber size. Construction and Building Materials. 2021.
- [18] P. Xu *et al.* Research on highly dissolved rubber asphalt prepared using a composite waste engine oil addition and microwave desulfurization method. Construction and Building Materials. 2021.
- [19] J. Zhang *et al.* Evaluation of VOCs inhibited effects and rheological properties of asphalt with high-content waste rubber powder. Construction and Building Materials. 2021.
- [20] S. Lv *et al.* Experimental investigation on the performance of bone glue and crumb rubber compound modified asphalt. Construction and Building Materials. 2021.
- [21] X. Yang *et al.* Effect of microwave-activated crumb rubber on reaction mechanism, rheological properties, thermal stability, and released volatiles of asphalt binder. Journal of Cleaner Production. 2020.
- [22] Z. Zhang *et al.* Construction and assessment technology of green road in China. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition). 2018.
- [23] JTTE Edition Office *et al.* New innovations in pavement materials and engineering: A review on pavement engineering research 2021. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2021.
- [24] Duan, Kaixi; Wang, Chaohui; Liu, Jikang ; Song, Liang) ; Chen, Qian) ; Chen, Yuanzhao. Research progress and performance evaluation of crumb-rubber-modified asphalts and their mixtures. Construction and bulding materials. 2022. Vol. 361. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.129687.
- [25] Sernas, Ovidijus; Vaitkus, Audrius; Skultecke, Judita. Performance of crumb rubber bitumen and asphalt modified in the wet process alone and in combination with SBS polymer. Road materials and pavement design. 2023. Vol. 24. P. 107-123. DOI 10.1080/14680629.2023.2180294
- [26] <https://www.greonix.com.ua/ukr/nasha-produktsiya/gumova-krikhta>. Humova krykhta. (data zvernennya: 20.09.2025).
- [27] <https://lxtan-sport.com/uk/dethttps://lxtan-sport.com/uk/det>. Tekhnolohiya ukladannya pokryttya z humovoyi krykhty tekhnolohiya ukladannya pokryttya z humovoyi krykhty. (data zvernennya: 20.09.2025).

Васюра Ігор Васильович – студент групи АДВ-226 факультету будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця. e-mail: vasiura.igor@gmail.com. ORCID 0009-0004-5080-4709.

Лялюк Олена Георгіївна – к. т. н., доцент кафедри будівництва міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету, науковий керівник. e-mail: Lyalyuk74@gmail.com ORCID 0000-0001-6446-9244.

O. Lialiuk
I. Vasiura

TECHNICAL AND ECONOMIC SUBSTANTIATION OF THE USE OF RUBBER CRUSHES IN ROAD CONSTRUCTION

Vinnitsia financial and economic University

The work is devoted to a comprehensive technical and economic justification of the use of rubber crumb in road construction as one of the innovative directions of increasing the durability and quality of roads. The work considers modern approaches to the use of secondary rubber raw materials obtained by recycling worn-out automobile tires, which is currently an important component of European and global sustainable development practice. Based on the generalization of the technical characteristics of modified asphalt concrete mixtures, the influence of rubber crumb on the physical and mechanical properties of the road surface is analyzed, in particular on increasing elasticity, resistance to cracking, rutting resistance and improving wheel adhesion to the road surface. Special attention is paid to reducing traffic noise and increasing the comfort of movement in urban environments.

The article also highlights the environmental benefits of the technology associated with the utilization of waste tires, reducing the load on solid waste landfills and developing the secondary recycling market. Given the need to minimize the negative impact on the environment, the use of rubber crumb is considered an effective tool for the environmental modernization of the road industry.

The economic analysis includes a comparison of traditional and modified technologies according to the criteria of construction cost, service life and need for repairs. It is shown that, despite a slight increase in initial costs, road surfaces with rubber crumb provide significant savings over the life cycle of the road due to an increase in service life and a decrease in the frequency of repair work. An assessment of economic efficiency is presented using indicators such as net present value, profitability index and payback period.

It is concluded that the use of rubber crumb is a promising direction for the development of road construction in Ukraine, which combines technological, economic and environmental advantages.

Keywords: *rubber crumb, road construction, asphalt concrete, economic efficiency, modified materials, tire recycling.*

Vasiura Ihor – a student of the ADV-22b group of the Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia. e-mail: vasiura.ihor@gmail.com.

Lialiuk Olena – Ph. D., assistant professor of construction of urban economy and architecture Vinnitsia National Technical University, e-mail: Lyalyuk74@gmail.com. e-mail: Lyalyuk74@gmail.com.