

УДК 625.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2026.40.4>

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ПІРОЛІЗУ НА МІЖФАЗНУ ВЗАЄМОДІЮ ТА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ АСФАЛЬТНИХ СУМІШЕЙ, МОДИФІКОВАНИХ БІОВУГІЛЛЯМ

Бондарчук Вадим Сергійович

аспірант кафедри комп'ютерних технологій будівництва,
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,
e-mail: bondar0071312@gmail.com, orcid: 0009-0007-8864-6584

Анотація. Мета. Встановити вплив температури піролізу на міжфазну взаємодію в системі «біовугілля – бітум – мінеральний наповнювач» і закономірності структуроутворення асфальтних сумішей, модифікованих біовугіллям.

Методологія. Використано теоретичний аналіз і узагальнення сучасних досліджень щодо піролізного одержання біовугілля та його застосування в асфальтних сумішах. Оцінювання проведено за показниками, що визначають ефективність біовугілля: питомою поверхнею, мікропористістю, вмістом функціональних груп, змочуваністю, здатністю до адсорбції легких фракцій бітуму та характером зчеплення з мінеральним наповнювачем.

Результати. Встановлено, що температура піролізу є визначальним чинником формування функціональних властивостей біовугілля в асфальтній суміші. За температур нижче 550 °C у його структурі зберігаються легкі та кисневмісні компоненти, які погіршують когезію бітумного шару, підвищують водочутливість і ускладнюють формування суцільного міжфазного контакту. За температур вище 750 °C біовугілля набуває надмірно інертного характеру, що супроводжується зменшенням кількості функціональних груп і погіршенням змочуваності бітумом. Найсприятливіші умови для міжфазної взаємодії та структурної стабілізації суміші досягаються в діапазоні 600–700 °C.

Наукова новизна. Обґрунтовано зв'язок між температурою піролізу біовугілля і механізмами його дії в асфальтній суміші через зміну поверхневої енергії, змочуваності, адсорбційної здатності та характеру контакту з бітумом і мінеральним наповнювачем.

Практична значущість. Результати можуть бути використані для вибору параметрів одержання біовугілля, призначеного для модифікації асфальтних сумішей, з метою підвищення їх водостійкості, стійкості до старіння та структурної однорідності.

Ключові слова: біовугілля, асфальтобетонні суміші, температура піролізу, міжфазна взаємодія, мікропористість, змочуваність, адгезія, водостійкість, колієстійкість, тріщиностійкість, старіння, бітумне в'язуче, дорожні покриття, структуроутворення, експлуатаційна довговічність.

ВСТУП

Сучасні асфальтобетонні покриття працюють в умовах значних транспортних навантажень та інтенсивної дії води, циклів заморожування-відтавання, термоокисного старіння й ультрафіолетового випромінювання [12].

Традиційні підходи до підвищення довговічності дорожніх матеріалів дедалі частіше переглядаються з позицій сталого розвитку, декарбонізації та циркулярного використання вторинної сировини [18]. Одночасно зростає інтерес до низьковуглецевих технологій, які

дозволяють утилізувати біомасу та зменшувати викиди парникових газів за рахунок фіксації вуглецю в довговічних композитах [4; 6].

Біовугілля, отримане шляхом піролізу рослинної та іншої біомаси, розглядається як перспективний модифікатор дорожніх покриттів завдяки розвиненій пористій структурі та високому вмісту стабільного вуглецю [6; 13; 15]. Можливість цілеспрямованої зміни його властивостей технологічними параметрами одержання робить біовугілля особливо привабливим для модифікації в'язучих [14; 15]. Численні дослідження демонструють, що введення біовугілля в асфальтове в'язуче та асфальтобетон дозволяє підвищити жорсткість і колієстійкість за високих температур [5; 10; 11; 13; 19; 21], а також відкриває можливість утилізації побічних продуктів перероблення біомаси в дорожніх матеріалах [5; 13; 21]. Дані щодо впливу на старіння є переважно позитивними, але залежать від типу біовугілля та умов його одержання [9; 10; 13].

Разом з тим більшість відомих робіт, так само як і попередні узагальнення щодо можливості використання біовугілля в асфальтобетоні, зосереджена переважно на оцінюванні загальної доцільності застосування та змін фізико-механічних або реологічних показників, тоді як механізми міжфазної взаємодії в системі «біовугілля – бітум – мінеральний наповнювач» висвітлено недостатньо [1; 13]. Особливо актуальним є питання впливу температури піролізу біовугілля на його поверхневі й структурні характеристики – мікропористість, полярність і вміст функціональних груп, які істотно впливають на змочуваність, адгезійну взаємодію та характер структуроутворення асфальтних сумішей [4; 13–16].

У зв'язку з цим виникає необхідність системного узагальнення доступних експериментальних даних щодо ролі температури піролізу у формуванні міжфазних властивостей біовугілля та їхнього впливу на структуру й експлуатаційні показники асфальтних сумішей. Такий підхід дозволяє підґрунтовно обґрунтувати вибір температурного режиму отримання біовугілля для дорожніх матеріалів та сформулювати рекомендації щодо підвищення довговічності покриттів.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Загальні закономірності піролізу біомаси та формування структури біовугілля докладно розглянуто в низці оглядових робіт, присвячених термохімічним процесам та еволюції фізико-хімічних властивостей продуктів піролізу [4; 8; 14]. Показано, що зі зростанням температури піролізу зменшується вихід твердого

продукту, але зростає ступінь ароматизації, теплота згоряння та вміст фіксованого вуглецю [8]. Змінюються також пористість і питома поверхня біовугілля [14]. Узагальнення даних свідчить, що температура піролізу визначає співвідношення між стабільністю структури біовугілля, мікропористістю та збереженням поверхневих функціональних груп [2; 16].

Температура піролізу істотно впливає на розподіл пор за розмірами, хімічний склад поверхні та гідрофобно-гідрофільний баланс біовугілля [6; 15; 16]. За відносно низьких температур ($\leq 500\text{--}550\text{ }^\circ\text{C}$) зберігається значна кількість кисневмісних функціональних груп, що забезпечують високу полярність і здатність до хімічної взаємодії [15], але одночасно підвищують гігроскопічність і схильність до водонасичення. За високих температур ($\geq 750\text{ }^\circ\text{C}$) поверхня біовугілля стає більш інертною, зменшується кількість активних центрів [16], однак зростає мікропористість і стабільність структури [8].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із використанням біовугілля в будівельних матеріалах. Для дорожніх матеріалів особливий інтерес становлять результати досліджень, у яких біовугілля розглядається як модифікатор асфальтового в'язучого, мастики та асфальтобетонних сумішей [3; 5; 10; 11; 13; 17; 19; 20; 21].

Ряд авторів досліджували біоасфальти та асфальтові в'язучі, модифіковані біовугіллям, отриманим з різних видів біомаси. У роботі А. Кумар та ін. [5] показано, що використання біовугілля як побічного продукту піролізу рослинних відходів у складі біоасфальтобетону дозволяє зменшити penetрацію, підвищити температуру розм'якшення та покращити показники реології за високих температур. Введення біовугілля з різним розміром частинок і вмістом у в'язучому змінює комплексний модуль, фазовий кут та показники колієстійкості [19; 21]. У дослідженнях розглядалися різні концентрації біовугілля – від низьких до підвищених, причому оптимальні значення залежать від типу біовугілля, розміру частинок і способу модифікації; у багатьох роботах вони не перевищували 10 % маси в'язучого [13; 19–21].

Біовугілля, отримане за різних температур піролізу, по-різному впливає на реологічну поведінку та стійкість до старіння асфальтових в'язучих [10; 11; 20]. Підвищення температури піролізу до певних значень може супроводжуватися збільшенням жорсткості та колієстійкості, тоді як надмірне підвищення температури потенційно погіршує

низькотемпературні властивості та вимагає окремого врахування міжфазних ефектів [3; 13]. Огляд Г.А. Рондон-Кінтана та ін. [13] систематизує наявні результати щодо використання біовугілля в асфальті та акцентує увагу на необхідності врахування мікроструктури й міжфазної взаємодії для коректного вибору параметрів модифікації.

Таким чином попередні дослідження підтверджують перспективність використання біовугілля в асфальтових сумішах, але не дають вичерпної відповіді щодо оптимального температурного режиму його одержання з позицій міжфазної взаємодії в системі «біовугілля – бітум – мінеральний наповнювач». Це зумовлює актуальність подальшого системного аналізу, спрямованого на встановлення зв'язку «температура піролізу – поверхневі властивості біовугілля – структуроутворення асфальтної суміші».

МЕТА

Метою статті є системне узагальнення та інтерпретація результатів досліджень впливу температури піролізу на поверхневі й структурні характеристики біовугілля та встановлення на цій основі зв'язку між температурою піролізу, міжфазною взаємодією в системі «біовугілля – бітум – мінеральний наповнювач» і закономірностями структуроутворення асфальтних сумішей, модифікованих біовугіллям. Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

- проаналізувати, як зміна температури піролізу впливає на мікропористість, елементний склад і набір функціональних груп на поверхні біовугілля;
- узагальнити дані щодо змочуваності, енергії адгезії та адсорбційної здатності біовугілля стосовно бітуму за різних температур піролізу;
- встановити зв'язок між характеристиками біовугілля та структурно-реологічними показниками асфальтових сумішей;
- окреслити оптимальний діапазон температур піролізу, за якого досягається сприятливий баланс між жорсткістю, тріщиностійкістю, водостійкістю та стійкістю до старіння асфальтних сумішей.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати аналізу літературних джерел підтверджують, що температура піролізу є одним з ключових керувальних параметрів, які визначають функціональну роль біовугілля в асфальтній суміші [21]. На мікрорівні підвищення температури піролізу зумовлює дегідратацію, дегазацію та поступове руйнування

кисневмісних функціональних груп [4; 8], що супроводжується переходом від аморфної структури з великою кількістю полярних центрів до більш упорядкованої ароматичної решітки [14; 16]. Це впливає як на величину питомої поверхні та розподіл пор, так і на поверхневу енергію частинок біовугілля.

За температур нижче 550 °C у структурі біовугілля зберігається значна частка летких компонентів і полярних груп (карбокільні, гідрокільні, фенольні), що забезпечують високу змочуваність полярними середовищами та здатність до участі в хімічних взаємодіях [15; 16]. Водночас надлишок полярних груп підвищує енергію взаємодії з водою; у складі асфальтної суміші це може реалізуватися як зниження водостійкості та прискорене руйнування контактного шару на межі «бітум – наповнювач» за наявності вологи [21]. Такі ефекти відзначаються також у роботах, де використовувалося біовугілля низькотемпературного піролізу, що приводило до зростання водочутливості сумішей попри певне підвищення їх жорсткості [10].

Підвищення температури піролізу до інтервалу 600–700 °C супроводжується формуванням біовугілля з розвиненою мікропористою структурою та відносно високою питомою поверхнею [4; 8; 16]. У цьому температурному інтервалі поверхня біовугілля втрачає частину полярних груп, але ще не набуває повністю інертного характеру, що може бути сприятливим для взаємодії з бітумом [13; 15; 16]. За таких умов спостерігається покращення змочуваності біовугілля бітумом, підвищення роботи адгезії, зменшення роботи відшарування та більш рівномірний розподіл частинок у бітумній плівці [5; 7; 11; 19]. Мікропористість біовугілля сприяє механічному анкеруванню бітуму в порах і утворенню додаткової контактної поверхні, що позитивно впливає на стійкість до колійності та стійкість до деформацій за високих температур [20].

За подальшого зростання температури піролізу (вище 750 °C) структура біовугілля стає надмірно графітоподібною та інертною; зменшується кількість функціональних груп і загальна полярність поверхні [2; 14; 16]. Це може послаблювати взаємодію з бітумом і негативно впливати на однорідність контактного шару в системі «біовугілля – в'язуче» [3; 9; 13;], що може зумовлювати розшарування в'язучого й утворення дефектів у зоні контакту з мінеральним наповнювачем. Надмірно «жорстке» біовугілля високотемпературного піролізу, хоча й покращує модуль пружності та опір колієутворенню [3; 17], може негативно впливати на тріщиностійкість за

низьких температур і довготривалу витривалість [3; 13].

З позицій структуроутворення асфальтної суміші біовугілля виконує роль багатофункціонального компонента. По-перше, воно модифікує реологію бітумного в'язучого: зростання комплексного модуля, зменшення фазового кута та підвищення показників колієстійкості за введення біовугілля, як правило, у межах до 10 % маси в'язучого, хоча в окремих дослідженнях розглядалися й вищі дозування [5; 10; 11; 13; 19; 21]. По-друге, біовугілля бере участь у формуванні просторової структури мінерального скелета, впливаючи на жорсткість мастики, характер деформування та роботу мінерального скелета в асфальтній суміші [3; 17].

Важливим є також вплив температури піролізу біовугілля на стійкість асфальтних

сумішей до старіння. Біовугілля може сприяти підвищенню стійкості в'язучого до старіння завдяки своїй пористій структурі та сорбційним властивостям, однак вираженість цього ефекту залежить від типу сировини та умов піролізу [9; 10; 13]. Водночас надто полярне біовугілля низькотемпературного піролізу може каталізувати небажані окисні процеси, тоді як надмірно інертне високотемпературне біовугілля не забезпечує достатнього рівня хімічної взаємодії з компонентами в'язучого. Вплив температури піролізу біовугілля на міжфазну взаємодію та властивості асфальтної суміші наведено в таблиці 1.

Для наочності узагальнену логіку зв'язку між температурою піролізу, зміною властивостей біовугілля та експлуатаційними показниками асфальтної суміші подано на рис. 1.

Таблиця 1

Вплив температури піролізу біовугілля на міжфазну взаємодію та властивості асфальтної суміші

| Діапазон температури піролізу | Характеристика біовугілля | Вплив на взаємодію з бітумом | Очікуваний вплив на асфальтну суміш | Загальна оцінка |
|-------------------------------|---|---|---|----------------------------|
| < 550 °C | Високий вміст летких і кисневмісних компонентів, підвищена полярність, нижча структурна стабільність | Висока взаємодія з полярними середовищами, підвищена чутливість до вологи | Можливе зростання водочутливості, погіршення водостійкості, нестабільність контактного шару | Небажаний режим |
| 600–700 °C | Розвинена мікропористість, помірنا полярність, достатня кількість функціональних груп, вища гідрофобність | Сприятливий баланс змочуваності, адгезії, адсорбції та структурної сумісності з бітумом | Підвищення водостійкості, колієстійкості, стабільності структури та стійкості до старіння | Найбільш сприятливий режим |
| > 750 °C | Більш інертна, частково графітоподібна поверхня, менше активних центрів | Ослаблення міжфазної взаємодії, гірша якість контактного шару | Ризик погіршення тріщиностійкості й однорідності системи | Умовно небажаний режим |

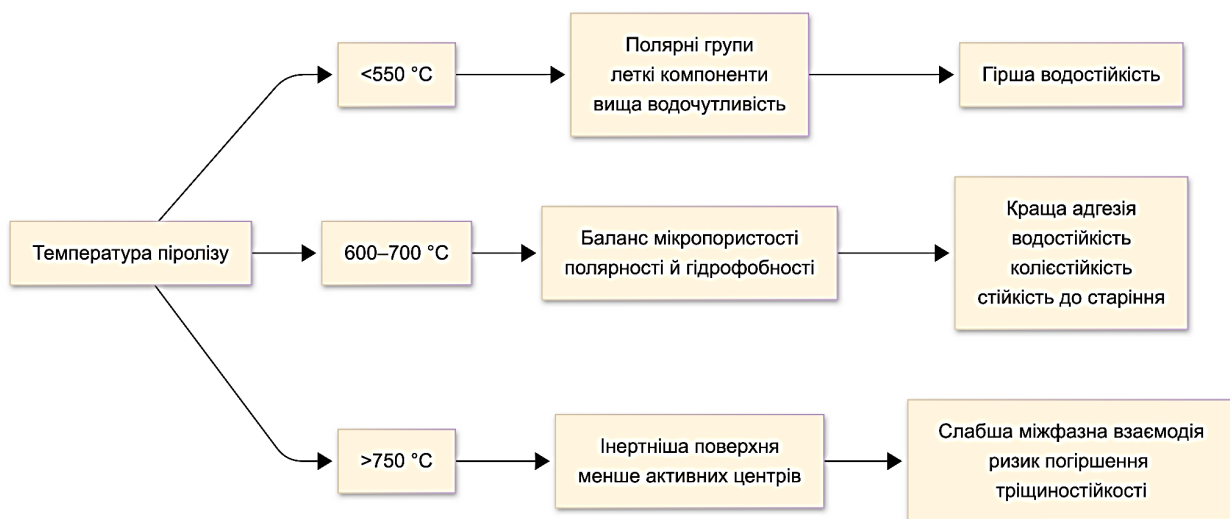


Рис. 1. Схема впливу температури піролізу на властивості біовугілля та експлуатаційні характеристики асфальтної суміші. Джерело: узагальнено автором на основі [7; 15; 16; 21]

Узагальнюючи наведені результати, можна зробити висновок, що діапазон 600–700 °C доцільно розглядати як орієнтовно сприятливий для отримання біовугілля з погляду міжфазної взаємодії та структуроутворення асфальтної суміші [2; 3; 13]. У цьому інтервалі досягається поєднання розвиненої мікропористості, помірної полярності поверхні, достатньої кількості функціональних груп і підвищеної гідрофобності, що забезпечує:

- підвищення адгезійної міцності на межі «біовугілля – бітум» та «бітум – мінеральний наповнювач»;
- зниження водонасичення та підвищення водостійкості асфальтної суміші;
- покращення колієстійкості й опору деформаціям за високих температур;
- сповільнення процесів термоокисного старіння бітумного в'язучого;
- формування більш однорідної та стабільної структури дорожнього покриття.

ВИСНОВКИ

Узагальнення проаналізованих досліджень показує, що температура піролізу є керувальним параметром, від якого безпосередньо залежать структура, поверхневі властивості та функціональна роль біовугілля в асфальтних сумішах. Саме через зміну мікропористості, набору функціональних груп і гідрофобно-гідрофільного балансу визначається характер міжфазної взаємодії в системі «біовугілля – бітум – мінеральний наповнювач» і, як наслідок, довговічність дорожнього покриття.

Порівняння результатів різних авторів дозволяє зробити висновок, що використання біовугілля низькотемпературного піролізу, у структурі якого зберігається значна кількість летких і кисневмісних компонентів, пов'язане з підвищеною водочутливістю та ризиком прискореного руйнування контактного шару. Натомість біовугілля, отримане в діапазоні 600–700 °C, формує комбінацію розвиненої мікропористості, помірної полярності та підвищеної гідрофобності, що сприяє кращому змочуванню бітумом, підвищенню адгезійної міцності та стабілізації структури асфальтної суміші. Надмірне ж підвищення температури піролізу вище цього діапазону призводить до надто інертної поверхні, що знижує якість контакту й може погіршувати тріщиностійкість.

Таким чином, з позицій міжфазної взаємодії та структуроутворення доцільно розглядати діапазон 600–700 °C як орієнтовно оптимальний для одержання біовугілля, призначеного для модифікації асфальтних

сумішей. У цьому інтервалі досягається прийнятний баланс між жорсткістю, колієстійкістю, водостійкістю та стійкістю до старіння, що відповідає вимогам до сучасних дорожніх покриттів.

Практична реалізація підходу, заснованого на цілеспрямованому виборі температури піролізу з урахуванням міжфазних ефектів, відкриває можливість переходу від емпіричного підбору добавки до керованого проектування структури асфальтних сумішей. Це створює підґрунтя для підвищення довговічності покриттів, більш раціонального використання вторинної біосировини та інтеграції біовугілля у стратегії сталого дорожнього будівництва.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Краюшкіна К. В., Бондарчук В. С. Аналіз можливості використання біовугілля в асфальтобетоні. *Теорія та практика дизайну. Архітектура та будівництво*. 2025. Вип. 2 (36). С. 54–64. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.36.5>.
- [2] Barszcz W., Kaźmierczak B., Szeląg M., Swat M., Wystalska K., Kwarciak-Kozłowska A. Impact of pyrolysis process conditions on the structure of biochar obtained from apple waste. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article 11291. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61394-8>.
- [3] Dassanayake C., Mashaan N. S. Biochar as additive and modifier in bitumen and asphalt mixtures. *Eng*. 2025. Vol. 6. Article 341. DOI: <https://doi.org/10.3390/eng6120341>.
- [4] Jahirul M. I., Rasul M. G., Chowdhury A. A., Ashwath N. Biofuels production through biomass pyrolysis – a technological review. *Energies*. 2012. Vol. 5. P. 4952–5001. DOI: <https://doi.org/10.3390/en5124952>.
- [5] Kumar A., Choudhary R., Narzari R., Katak R., Shukla S. K. Evaluation of bio-asphalt binders modified with biochar: a pyrolysis by-product of Mesua ferrea seed cover waste. *Cogent Engineering*. 2018. Vol. 5. Article 1548534. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1548534>.
- [6] Lehmann J. Biochar for environmental management: an introduction. *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* / ed. by J. Lehmann, S. Joseph. London: Earthscan, 2009. P. 1–12.
- [7] Li Q., Xu L., Chen X., Li W., Li Y., Wang H., Liu K. Study on the adhesion performance of biochar-modified asphalt based on surface free energy and atomic force microscopy. *Coatings*. 2024. Vol. 14, No. 11. Article 1390. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14111390>.
- [8] Lin Y., Ma X., Peng X., Yu Z., Fang S., Lin Y., Fan Y. Combustion, pyrolysis and char CO₂-gasification characteristics of hydrothermal carbonization solid fuel from municipal solid wastes. *Fuel*. 2016. Vol. 181. P. 905–915. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.05.031>.
- [9] Loise V., Calandra P., Policicchio A., Madeo L., Oliviero Rossi C., Porto M., Abe A., Agostino R. G., Caputo P. The efficiency of bio-char as bitumen modifier. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. Article e23192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23192>.
- [10] Ma F., Dai J., Fu Z., Li C., Wen Y., Jia M., Wang Y., Shi K. Biochar for asphalt modification: a case of high-temperature properties improvement. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 804. Article 150194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150194>.
- [11] Martinez-Toledo C., Valdes-Vidal G., Calabí-Floody A., Gonzalez M. E., Reyes-Ortiz O. Evaluation of rheological properties of asphalt binder modified with biochar from oat hulls. *Materials*. 2024. Vol. 17. Article 4312. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17174312>.

[12] Remisova E., Briliak D. Evaluation of the effect of thermo-oxidative aging and UV radiation on asphalt stiffness. *Materials*. 2023. Vol. 16, No. 10. Article 3716. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16103716>.

[13] Rondón-Quintana H. A., Reyes-Lizcano F. A., Chaves-Pabón S. B., Bastidas-Martínez J. G., Zafra-Mejía C. A. Use of biochar in asphalts: review. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Article 4745. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14084745>.

[14] Sharma A., Pareek V., Zhang D. Biomass pyrolysis – a review of modelling, process parameters and catalytic studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 50. P. 1081–1096. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.193>.

[15] Sohi S. P., Krull E., Lopez-Capel E., Bol R. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*. 2010. Vol. 105. P. 47–82. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9).

[16] Wei J., Tu C., Yuan G., Liu Y., Bi D., Xiao L. et al. Assessing the effect of pyrolysis temperature on the molecular properties and copper sorption capacity of a halophyte biochar. *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 251. P. 56–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.069>.

[17] Wu Y., Cao P., Shi F., Liu K., Wang X., Leng Z., Tan Z., Zhou C. Modeling of the complex modulus of asphalt mastic with biochar filler based on the homogenization and random aggregate distribution methods. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 2020. Article 2317420. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/2317420>.

[18] Yaro N. S. A., Sutanto M. H., Habib N. Z., Usman A., Kaura J. M., Murana A. A., Birniwa A. H., Jagaba A. H. A comprehensive review of biochar utilization for low-carbon flexible asphalt pavements. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 8. Article 6729. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15086729>.

[19] Zhang R., Dai Q., You Z., Wang H., Peng C. Rheological performance of bio-char modified asphalt with different particle sizes. *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8. Article 1665. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8091665>.

[20] Zhao S., Huang B., Shu X., Ye P. Laboratory investigation of biochar-modified asphalt mixture. *Transportation Research Record*. 2014. Vol. 2445. P. 56–63. DOI: <https://doi.org/10.3141/2445-07>.

[21] Zhao S., Huang B., Ye X. P., Shu X., Jia X. Utilizing bio-char as a bio-modifier for asphalt cement: a sustainable application of bio-fuel by-product. *Fuel*. 2014. Vol. 133. P. 52–62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.05.002>.

REFERENCES

[1] Krayushkina K. V., Bondarchuk V. S. (2025). Analiz mozhlyvosti vykorystannia biovuhillia v asfaltobetonu [Analysis of the possibility of using biochar in asphalt concrete]. *Teoriia ta praktyka dyzainu. Arkhitektura ta budivnytstvo - Theory and Practice of Design. Architecture and Construction*, 2(36), 54–64. DOI: 10.32782/2415-8151.2025.36.5. [in Ukrainian].

[2] Barszcz, W., Kaźmierczak, B., Szeląg, M., Swat, M., Wystalska, K., & KwarciaK-Kozłowska, A. (2024). Impact of pyrolysis process conditions on the structure of biochar obtained from apple waste. *Scientific Reports*, 14, Article 11291. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61394-8>.

[3] Dassanayake, C., & Mashaan, N. S. (2025). Biochar as additive and modifier in bitumen and asphalt mixtures. *Eng*, 6, 341. <https://doi.org/10.3390/eng6120341>.

[4] Jahirul, M. I., Rasul, M. G., Chowdhury, A. A., & Ashwath, N. (2012). Biofuels production through biomass pyrolysis – A technological review. *Energies*, 5(12), 4952–5001. <https://doi.org/10.3390/en5124952>.

[5] Kumar, A., Choudhary, R., Narzari, R., Katak, R., & Shukla, S. K. (2018). Evaluation of bio-asphalt binders modified with biochar: A pyrolysis by-product of Mesua ferrea seed cover waste. *Cogent Engineering*, 5(1), Article 1548534. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1548534>.

[6] Lehmann, J. (2009). Biochar for environmental management: An introduction. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (pp. 1–12). Earthscan.

[7] Li, Q., Xu, L., Chen, X., Li, W., Li, Y., Wang, H., & Liu, K. (2024). Study on the adhesion performance of biochar-modified asphalt based on surface free energy and atomic force microscopy. *Coatings*, 14(11), Article 1390. <https://doi.org/10.3390/coatings14111390>.

[8] Lin, Y., Ma, X., Peng, X., Yu, Z., Fang, S., Lin, Y., & Fan, Y. (2016). Combustion, pyrolysis and char CO₂-gasification characteristics of hydrothermal carbonization solid fuel from municipal solid wastes. *Fuel*, 181, 905–915. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.05.031>.

[9] Loise, V., Calandra, P., Policicchio, A., Madeo, L., Oliviero Rossi, C., Porto, M., Abe, A., Agostino, R. G., & Caputo, P. (2024). The efficiency of bio-char as bitumen modifier. *Heliyon*, 10(1), Article e23192. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23192>.

[10] Ma, F., Dai, J., Fu, Z., Li, C., Wen, Y., Jia, M., Wang, Y., & Shi, K. (2022). Biochar for asphalt modification: A case of high-temperature properties improvement. *Science of the Total Environment*, 804, Article 150194. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150194>.

[11] Martínez-Toledo, C., Valdes-Vidal, G., Calabi-Floody, A., Gonzalez, M. E., & Reyes-Ortiz, O. (2024). Evaluation of rheological properties of asphalt binder modified with biochar from oat hulls. *Materials*, 17(17), Article 4312. <https://doi.org/10.3390/ma17174312>.

[12] Remisova, E., & Briliak, D. (2023). Evaluation of the effect of thermo-oxidative aging and UV radiation on asphalt stiffness. *Materials*, 16(10), Article 3716. <https://doi.org/10.3390/ma16103716>.

[13] Rondón-Quintana, H. A., Reyes-Lizcano, F. A., Chaves-Pabón, S. B., Bastidas-Martínez, J. G., & Zafra-Mejía, C. A. (2022). Use of biochar in asphalts: Review. *Sustainability*, 14(8), Article 4745. <https://doi.org/10.3390/su14084745>.

[14] Sharma, A., Pareek, V., & Zhang, D. (2015). Biomass pyrolysis – A review of modelling, process parameters and catalytic studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1081–1096. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.193>.

[15] Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 105, 47–82. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9).

[16] Wei, J., Tu, C., Yuan, G., Liu, Y., Bi, D., Xiao, L., et al. (2019). Assessing the effect of pyrolysis temperature on the molecular properties and copper sorption capacity of a halophyte biochar. *Environmental Pollution*, 251, 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.069>.

[17] Wu, Y., Cao, P., Shi, F., Liu, K., Wang, X., Leng, Z., Tan, Z., & Zhou, C. (2020). Modeling of the complex modulus of asphalt mastic with biochar filler based on the homogenization and random aggregate distribution methods. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, Article 2317420. <https://doi.org/10.1155/2020/2317420>.

[18] Yaro, N. S. A., Sutanto, M. H., Habib, N. Z., Usman, A., Kaura, J. M., Murana, A. A., Birniwa, A. H., & Jagaba, A. H. (2023). A comprehensive review of biochar utilization for low-carbon flexible asphalt pavements. *Sustainability*, 15(8), Article 6729. <https://doi.org/10.3390/su15086729>.

[19] Zhang, R., Dai, Q., You, Z., Wang, H., & Peng, C. (2018). Rheological performance of bio-char modified asphalt with different particle sizes. *Applied Sciences*, 8(9), Article 1665. <https://doi.org/10.3390/app8091665>.

[20] Zhao, S., Huang, B., Shu, X., & Ye, P. (2014). Laboratory investigation of biochar-modified asphalt mixture. *Transportation Research Record*, 2445(1), 56–63. <https://doi.org/10.3141/2445-07>.

[21] Zhao, S., Huang, B., Ye, X. P., Shu, X., & Jia, X. (2014). Utilizing bio-char as a bio-modifier for asphalt cement: A sustainable application of bio-fuel by-product. *Fuel*, 133, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.05.002>.

ABSTRACT**Bondarchuk V. The Effect Of Pyrolysis Temperature On Interphase Interaction And Structure Formation In Asphalt Mixtures Modified With Biochar**

Purpose. The purpose of the study is to determine the influence of pyrolysis temperature on interfacial interaction in the «biochar – bitumen – mineral aggregate» system and on the structure formation patterns of asphalt mixtures modified with biochar. Particular attention is focused on identifying the temperature range that provides the best combination of adhesion activity, structural stability, and resistance of the mixture to moisture and thermo-oxidative effects.

Methodology. The study is based on a theoretical analysis and synthesis of recent research on pyrolytic biochar production and its use in asphalt mixtures. The influence of pyrolysis temperature was assessed through the properties that directly determine the efficiency of biochar in asphalt mixtures, namely specific surface area, microporosity, content of functional groups, wetting energy, adsorption capacity for light bitumen fractions, and the nature of adhesion to mineral aggregate. The methodological basis of the work is the interpretation of structure formation as a consequence of controlled changes in the interfacial properties of biochar depending on the temperature of its thermal treatment.

Results. It was established that pyrolysis temperature is the key parameter governing the functional performance of biochar in asphalt mixtures. At temperatures below 550 °C, volatile and oxygen-containing compounds remain in the biochar structure, which weakens the cohesion of the bitumen film, increases moisture susceptibility, and prevents the formation of a continuous contact layer at the phase boundary. At temperatures above 750 °C, biochar becomes excessively inert, which is accompanied by a decrease in the number of functional groups and poorer wetting by bitumen. The most favorable conditions for interfacial interaction and structural stabilization of the mixture are achieved within the range of 600–700 °C, where biochar acquires an optimal balance of microporosity, moderate polarity, and hydrophobicity. This leads to improved adhesion strength, reduced moisture sensitivity, delayed aging of the bituminous binder, and better structural stability of the asphalt mixture.

Scientific novelty. The scientific novelty of the study lies in the systematic substantiation of the relationship between biochar pyrolysis temperature and the mechanisms of its action in asphalt mixtures through changes in surface energy, wettability, adsorption capacity, and the nature of contact with bitumen and mineral aggregate. In contrast to generalized assessments of the prospects for biochar application, the present study focuses on the interfacial mechanisms that determine structure formation and durability.

Practical relevance. The obtained results can be used to substantiate the parameters of pyrolytic biochar production intended for asphalt mixture modification, as well as to select technological regimes that ensure improved moisture resistance, aging stability, and structural uniformity of the road material. The practical implementation of this approach creates preconditions for increasing pavement durability and rational use of secondary bioresources in road construction.

Keywords: biochar, asphalt concrete mixtures, pyrolysis temperature, interfacial interaction, microporosity, wettability, adhesion, moisture resistance, rutting resistance, cracking resistance, aging, bituminous binder, road pavements, structure formation, service durability.

AUTHOR'S NOTE:

Bondarchuk Vadym, Postgraduate Student at the Department of Computer Technologies in Construction, State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine, e-mail: bondar0071312@gmail.com, orcid: 0009-0007-8864-6584.

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії
відкритого доступу CC BY 4.0

