

М. О. Постолатій
М. В. Білошицький

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ТЕХНІЧНОГО ВУГЛЕЦЮ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІНОПОЛІСТИРОЛБЕТОННИХ БЛОКІВ

Вінницький національний технічний університет

Запропоновано робочу гіпотезу створення нового теплоізоляційного будівельного матеріалу на основі цементу (Ц), пінополістиролу (ППС), технічного вуглецю (ТВ) та піноутворювача (ПУ). Обґрунтовано актуальність використання легких композиційних бетонів у сучасних умовах відновлення будівельної галузі України, зокрема з позицій енергоефективності, ресурсозбереження та зниження матеріалоемності будівництва.

Розглянуто особливості структури та властивостей пінополістиролбетону як перспективного матеріалу для зведення енергоефективних огорожувальних конструкцій. Проаналізовано вплив технічного вуглецю на формування мікроструктури цементного каменю, ущільнення міжфазної контактної зони та підвищення фізико-механічних характеристик композиту. Визначено основні переваги використання ТВ як дисперсного мікронаповнювача, здатного покращувати міцність, щільність та тріщиностійкість матеріалу.

Виділено позитивні характеристики пінополістиролу як легкого теплоізоляційного заповнювача, що забезпечує зменшення густини та підвищення термічного опору виробів. Розглянуто роль піноутворювача у формуванні пористої структури та зниженні ваги композиту. На основі аналізу сучасних досліджень встановлено, що оптимальний вміст технічного вуглецю сприяє підвищенню міцності на стиск та формуванню більш однорідної й структурно стабільної системи.

Ключові слова: енергоефективність, будівельна галузь, легкий бетон, пінополістирол, пінополістирол бетон, технічний вуглець, щільність, міцність, теплопровідність, зносостійкість, електропровідність, композити вуглецеве волокно.

Стаття надійшла до редакції / Received 27.03.2026
Прийнята до друку / Accepted 24.04.2026
Опубліковано / Published 29.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Постолатій М.О., Білошицький М.В.

Вступ

У сучасних соціально-економічних умовах розвитку України будівельний сектор набуває стратегічного значення як один із ключових рушійних напрямків для відновлення інфраструктури, житлового фонду та виробничих потужностей. Реалії сьогодення обумовлюють необхідність впровадження інноваційних матеріалів та технологій, орієнтованих на підвищення енергоефективності, зниження матеріалоемності та собівартості зведення об'єктів. У цьому контексті особливої актуальності набуває розроблення нових композиційних матеріалів з покращеними теплотехнічними та фізико-механічними характеристиками, що відповідають сучасній нормативній базі.

Одним із перспективних напрямів є застосування легких теплоізоляційних бетонів, зокрема пінополістиролбетону, який поєднує пористу цементну матрицю з гранулами спіненого полістиролу. Завдяки низькій теплопровідності, міцності та технологічності виготовлення пінополістиролбетон широко використовується для зведення огорожувальних конструкцій та енергоефективних стінових блоків. Крім того, матеріал дозволяє зменшити навантаження на фундаменти та скоротити витрати на транспортування і монтаж, що є важливим з огляду на економічну доцільність відновлювальних робіт. Але у зв'язку з відносно невисокими показниками міцності та неоднорідністю пористої структури є актуальним пошук ефективних модифікаційних добавок, здатних цілеспрямовано впливати на формування мікроструктури цементного каменю, характер міжфазної взаємодії та кінцеві експлуатаційні властивості композиту.

Аналіз

Особливий інтерес сьогодні викликає застосування вуглецевих наповнювачів, введення яких приводить до:

– підвищення міцності та зносостійкості – за рахунок армувального ефекту та формування просторової структурної сітки в матриці матеріалу.

- зростання модуля пружності та твердості, при цьому можливе зниження відносного подовження при розриві при високих концентраціях наповнювача.
- покращення стійкості до ультрафіолетового випромінювання та атмосферних впливів, оскільки технічний вуглець поглинає УФ-промені.
- підвищення електропровідності (за достатньої концентрації), що дозволяє отримувати антистатичні та струмопровідні матеріали.
- зміни реологічних властивостей – збільшення в'язкості розплаву або суміші, що впливає на технологічність переробки.

Загалом за даними сучасних зарубіжних досліджень, [1] введення вуглецевих добавок у цементні композити сприяє модифікації мікроструктури, ущільненню цементного каменю та зміні кінетики гідратаційних процесів, що загалом може позитивно відобразитися на міцнісних і функціональних характеристиках матеріалу.

Введення наповнювачів на основі вуглецю має низку позитивних впливів. Однак як показують проведені дослідження - надмірно високий вміст створює точки концентрації напруги та дефекти, що серйозно може погіршувати міцність і в'язкість композитного матеріалу.

Основними матеріалами для більшості досліджень є перероблене вуглецеве волокно (матеріал, що додається для армування, покращуючи міцність на згин) та безпосередньо технічний вуглець (дрібнодисперсний матеріал, який покращує мікроструктуру пор бетону та знижує водопоглинання).

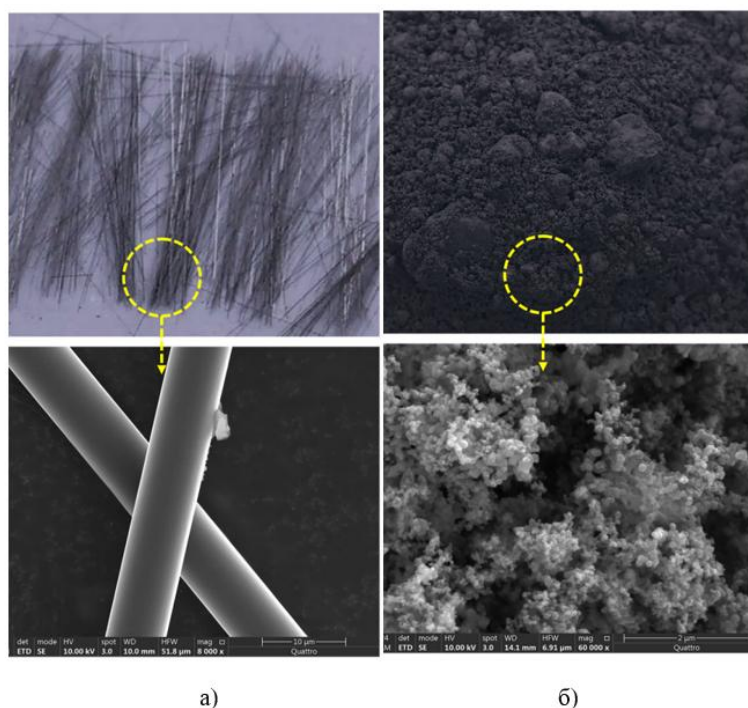


Рисунок 1 – Цифрові фотографії та результати мікроскопічного аналізу морфології сировинних матеріалів: а) - перероблене вуглецеве волокно; б) - технічний вуглець [1]

Як показують дослідження [2,3] добавки на основі порошку (ТВ) мають явні переваги перед своїми волокнистими аналогами. Значним обмеженням для використання волокнистих добавок є їх схильність до агломерації під час змішування, що потенційно поставити під загрозу механічні характеристики композиту.

Найменші частинки технічного вуглецю мають складну структуру, що складається з псевдографітового кристалічного вуглецю і аморфного вуглецю [1]. Частинки ТВ складаються з ланцюжок і складають складні розгалужені графітові структури. На поверхні частинок ТВ утворюються різноманітні функціональні групи: гідроксильні, карбонатні і тд.. З літературних даних [6] відомо, поверхня частинок володіє шорсткістю, за рахунок наповзань одного шару на інший, що в подальшому при використанні ТВ як наповнювача забезпечить щільність та міцність новоутвореного матеріалу. Грубо кажучи, ТВ можна рахувати бетонов'язучою речовиною, тобто непереривною матрицею, яка заповнює міжзернистий простір суміші крупного і мілкового

заповнювача, а також склеює і робить монолітом зерна каркасу. Основні фізико-технічні характеристики технічного вуглецю наведено у таблиці 1 [4].

Наведені в таблиці 1 [5]. фізико-технічні характеристики свідчать про суттєву відмінність марок технічного вуглецю за дисперсністю та поверхнево-хімічними показниками: зокрема, марки П245 і П234 характеризуються найбільшими значеннями питомої зовнішньої поверхні — відповідно 109 ± 4 та 98 ± 4 м²/г — і йодного числа — 121 ± 6 та 105 ± 6 г/кг. Розвинена поверхня частинок технічного вуглецю визначає його потенційну ефективність як дисперсного мікронаповнювача цементної матриці, оскільки за належного диспергування він може сприяти ущільненню мікроструктури та зменшенню дефектності цементного каменю. Для пінополістиролбетонних блоків такий структуроутворювальний ефект є особливо важливим, оскільки гранули ППС забезпечують зниження густини й теплопровідності матеріалу, але водночас формують неоднорідну систему.

Аналіз сучасних досліджень свідчить, що модифікація пінополістиролбетонних композицій технічним вуглецем сприяє підвищенню їх фізико-механічних характеристик, зокрема міцності на стиск та тріщиностійкості. Позитивний ефект обумовлений ущільненням цементного тіста та структурною оптимізацією міжфазної контактної зони між цементним каменем і гранулами пінополістиролу. Дисперсні частинки технічного вуглецю виконують функцію мікронаповнювача, зменшуючи капілярну пористість, покращуючи адгезійну взаємодію компонентів та забезпечуючи формування більш однорідної, когезійно зв'язаної та структурно стабільної системи.

Таблиця 1

Основні фізико-технічні характеристики технічного вуглецю

Показник	Марка									
	П245	П234	П345	П324	П514	П701	П702	П705	П803	Т900
1. Питома геометрична поверхня, м ² /г	-	-	90-100	75-82	50-57	-	-	-	-	-
2 Питома зовнішня поверхня., м ² /г	109±4	98±4	-	-	-	-	-	-	-	-
3. Йодне число, г/кг	121±6	105± 6	-	84±6	43±4	-	-	-	-	-
4. Питома адсорбційна поверхня, м ² /г	119±5	109± 5	не більше 150	84±4	-	-	-	-	-	-
5. Абсорбція дибутілфталату, см ³ /Ю00 г	103 ± 5	101 ± 4	-	100 ± 5	100 ± 5	100 ± 5	100 ± 5	100 ± 5	100 ± 5	-
6. рН водяної суспензії	6 - 8 (6,5 - 8,5)	6 - 8	3,7 - 4,5	7 - 9	6 - 8	9 - 11	7 - 9	7,5 - 9,5	7 - 9	-
7. Масовая доля втрат при 105 °С, %, не більше	0,9	0,9 (0,4)	1,5	0,9 (0,5)	0,9	0,35	0,5	0,5	0,5	0,4
8. Зольність, %, не більше	0,45	0,45 (0,3)	0,05	0,45 (0,3)	0,45	0,48	0,50	0,30	0,45	0,15
9. Масова частка залишку, %, не більше, після просіву через сито з сіткою:										
0045										
05	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
014	0,001	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
	0,02	0,02	0,004	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02
10. Масова частка пилу в гранульованому вуглеці, %, не більше	6	6	-	6	6	5	6	6	6	-
11. Насипна щільність гранульованого вуглецю, кг/м ³ у межах										
не менше	330 (310)	340 (320)	-	340 (330)	340	420	400	320 - 400	320 - 400	-

Нижче наведено таблиця взаємозалежності між вмістом ТВ та міцністю на стиск.

Таблиця 2

Вплив ТВ на міцність [5]

Вміст ТВ (%)	Збільшення міцності на стиск (%)
2	+2,56
5	++7,33
8	8,68
10	-12,09
12	-23,88

Вище наведені дані свідчать про нелінійний характер впливу технічного вуглецю на міцність цементного композиту: у діапазоні вмісту 2–8 % спостерігається поступове зростання міцності на стиск від 2,56 до 8,68 %, тоді як за вмісту 10–12 % показник знижується на 12,09–23,88 % відносно контрольного складу. Така закономірність може свідчити про те, що раціональне дозування сприяє ущільненню цементної матриці, однак за надлишкового вмісту можуть агломеруватися [7], підвищувати структурну неоднорідність і формувати локальні дефекти.

За результатами дослідження [8], дані неруйнівного контролю і випробувань на міцність при стиску показали покращення характеристик бетонних зразків із вмістом технічного вуглецю 2, 5 та 8 %. Водночас введення технічного вуглецю негативно позначилося на міцності при розколювальному розтягу: для складу з 2 % добавки її значення зменшилося на 5 %, а подальше збільшення вмісту ТВ на кожні 2 % супроводжувалося додатковим зниженням цього показника приблизно на 4 %. Міцність при згині зразків із вмістом ТВ 2, 5, 8 та 10 % також була нижчою порівняно з контрольними зразками, що автори пов'язують із можливим підвищенням крихкості цементного композиту внаслідок введення вуглецевого наповнювача.

Аналізуючи вище наведені теоретичні та експериментальні дані [8] можемо сформувати у табличній формі аналітичну оцінку ефективності вмісту технічного вуглецю за відносним коефіцієнтом міцності при стиску.

Таблиця 3

Аналітична оцінка вмісту технічного вуглецю

Вміст ТВ, %	Зміна міцності при стиску, %	Відносний коефіцієнт міцності K_f	Вміст ТВ, %	Зміна міцності при стиску, %
0	0,00	1,000	100,00	Контрольний склад
2	+2,56	1,026	102,56	Незначний позитивний ефект
5	+7,33	1,073	107,33	Виражений позитивний ефект
8	+8,68	1,087	108,68	Найбільший зафіксований приріст
10	-12,09	0,879	87,91	Різка погіршення міцності
12	-23,88	0,761	76,12	Суттєве погіршення міцності

Висновок

Проведений аналіз літературних даних підтверджує доцільність застосування технічного вуглецю як високодисперсного мікронаповнювача цементної матриці у складі легких бетонних композитів. Його потенційний вплив пов'язаний із заповненням мікропор, ущільненням структури цементного каменю та можливим покращенням стану міжфазної контактної зони між цементною матрицею і гранулами пінополістиролу. Фізико-технічні характеристики різних марок технічного вуглецю свідчать, що ефективність його використання у складі пінополістиролбетонних блоків може залежати від питомої поверхні, адсорбційної активності, рН водної суспензії, зольності та насипної щільності. Марки з більш розвиненою поверхнею, зокрема П245 і П234, є перспективними для подальшого експериментального оцінювання як дисперсні модифікатори цементної матриці.

Зниження міцності при збільшенні вмісту технічного вуглецю понад 8 % може бути пов'язане з агломерацією високодисперсних частинок, погіршенням однорідності розподілу добавки у суміші та формуванням локальних структурних дефектів. Крім того, згідно з літературними даними, введення ТВ може супроводжуватися зниженням міцності при розколювальному розтягу та згині, що необхідно враховувати під час розроблення складу блоків.

Для пінополістиролбетонних блоків діапазон вмісту технічного вуглецю 5–8 % доцільно прийняти як орієнтовний для подальшої експериментальної перевірки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Liangliang Wei, Chenxi Xiao, Bixuan Yang, Shouwang Hu, Yu Zheng Effect of Hybrid Carbon-Based Fillers on Electrical and Mechanical Performance of Strain-Hardening Cementitious Composites (SHCCs) Buildings 2026, 16(2), 267; <https://doi.org/10.3390/buildings16020267>
- [2] Швець В.В., Постолатій М.О. «Розробка високоефективного будівельного блоку з використанням пінополістиролу, технічного вуглецю та піноутворювача», Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. № 1, с. 51–56., 2023.
- [3] Sheikh, T. M. et al. The mechanics of carbon-based nanomaterials as cement reinforcement—a critical review. Constr. Build. Mater. 303, 124441, 2021.
- [4] Dong, S., Li, L., Ashour, A., Dong, X. & Han, B. Self-assembled 0D/2D nano carbon materials engineered smart and multifunctional cement-based composites. Constr. Build. Mater. 272, 121632, 2021.
- [5] В. В. Швець, М. О. Постолатій, і М. Я. Жилівський, «Вдосконалення теплотехнічних характеристик легкобетонних виробів шляхом використання технічного вуглецю», СучТехнБудів, вип. 36, вип. 1, с. 71–75, Сер 2024.
- [6] Інтернет джерело: <https://xtpigment.com/top-5-performance-benefits-of-carbon-black-in-concrete-applications/>
- [7] Goldman A., Bentur A. The Influence of Microfillers on Enhancement of Concrete Strength. Cement and Concrete Research. 1993. Vol. 23, No. 4. P. 962–972. DOI: 10.1016/0008-8846(93)90050-J.
- [8] Jeyashree T. M., Chitra G. Experimental Studies on Concrete Elements Using Waste Carbon Black as Filler Material. Asian Journal of Civil Engineering (BHRC). 2017. Vol. 18, No. 1. P. 21–30.

REFERENCES

- [1] Liangliang Wei, Chenxi Xiao, Bixuan Yang, Shouwang Hu, Yu Zheng Effect of Hybrid Carbon-Based Fillers on Electrical and Mechanical Performance of Strain-Hardening Cementitious Composites (SHCCs) Buildings 2026, 16(2), 267; <https://doi.org/10.3390/buildings16020267>
- [2] Shvets, V. V., & Postolatiy, M. O. “Development of a High-Performance Building Block Using Expanded Polystyrene, Carbon Black, and a Foaming Agent,” Modern Technologies, Materials, and Structures in Construction. No. 1, pp. 51–56, 2023.
- [3] Sheikh, T. M. et al. The mechanics of carbon-based nanomaterials as cement reinforcement—a critical review. Constr. Build. Mater. 303, 124441, 2021.
- [4] Dong, S., Li, L., Ashour, A., Dong, X., & Han, B. Self-assembled 0D/2D nano carbon materials engineered smart and multifunctional cement-based composites. Constr. Build. Mater. 272, 121632, 2021.
- [5] V. V. Shvets, M. O. Postolatiy, and M. Ya. Zhilovskyi, “Improvement of thermal characteristics of lightweight concrete products through the use of carbon black,” SuchTechBudiv, vol. 36, no. 1, pp. 71–75, Aug 2024.
- [6] Online source: https://xtpigment.com/top-5-performance-benefits-of-carbon-black-in-concrete-applications/?utm_source=chatgpt.com.
- [7] Goldman A., Bentur A. The Influence of Microfillers on Enhancement of Concrete Strength. Cement and Concrete Research. 1993. Vol. 23, No. 4. P. 962–972. DOI: 10.1016/0008-8846(93)90050-J.
- [8] Jeyashree T. M., Chitra G. Experimental Studies on Concrete Elements Using Waste Carbon Black as Filler Material. Asian Journal of Civil Engineering (BHRC). 2017. Vol. 18, No. 1. P. 21–30.

Постолатій Маріанна Олександрівна – аспірант кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету. E-mail: marianna.postolatii@gmail.com.

Білошицький Микола Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва, урбаністики та просторового планування Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. E-mail: stadnik_mykola@vsau.vin.ua, ORCID 0000-0002-9935-4161.

M. Postolatii
M. Biloshytskyi

FEATURES OF THE EFFECT OF TECHNICAL CARBON ON THE FORMATION OF THE STRUCTURE AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF EXPANDED POLYSTYRENE CONCRETE BLOCKS

Vinnitsa National Technical University

A working hypothesis is proposed for the development of a new thermal insulation building material based on cement (C), expanded polystyrene (EPS), carbon black (CB), and a foaming agent (FA). The relevance of lightweight composite concretes under the current conditions of reconstruction and modernization of Ukraine’s construction industry is substantiated. Special attention is paid to improving energy efficiency, reducing material consumption, lowering the dead weight of structures, and increasing the durability and thermal performance of building materials. The application of innovative lightweight composites

is considered a promising direction for sustainable and resource-efficient construction technologies.

The structural features and properties of expanded polystyrene concrete as an effective material for energy-efficient building envelopes are analyzed. The advantages of combining a cement matrix with lightweight polymer fillers are considered, allowing a balance between thermal insulation and sufficient mechanical strength. The influence of carbon black on the structure formation of cement composites is investigated. It is established that carbon black contributes to the densification of the cement stone microstructure, improves the interphase contact zone between the binder and filler, and enhances the physical and mechanical properties of the composite. The advantages of carbon black as a dispersed microfiller capable of increasing compressive strength, density, crack resistance, and structural homogeneity are identified.

The positive characteristics of expanded polystyrene as a lightweight thermal insulation filler are highlighted, particularly its ability to reduce density and improve thermal resistance. The role of the foaming agent in forming a porous structure and reducing composite weight is also examined. Based on the analysis of current studies, it is established that the optimal carbon black content ensures the formation of a homogeneous, stable, and durable composite system with improved thermal and експлуатаційними properties.

Keywords: *energy efficiency, construction industry, lightweight concrete, expanded polystyrene, expanded polystyrene concrete, carbon black, density, strength, thermal conductivity, wear resistance, electrical conductivity, carbon fiber composites.*

Marianna Postolatii – post graduate student of the department of construction, urban and architecture of Vinnytsia national technical university. E-mail: marianna.postolatii@gmail.com.

Mykola Biloshytskyi – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction, Urbanism and Spatial Planning of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. E-mail: stadnik_mykola@vsau.vin.ua, ORCID 0000-0002-9935-4161.