

УДК 691.32/.34(045)

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.37.14>

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАРАМЕТРІВ МОДИФІКАЦІЇ БЕТОНУ ВУГЛЕЦЕВИМИ НАНОТРУБКАМИ

Лапенко Олександр Іванович¹, Гришко Павло Іванович²

¹ доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва, Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна, e-mail: oleksandr.lapenko@npp.kai.edu.ua, orcid: 0000-0002-2029-0792

² аспірант кафедри комп'ютерних технологій будівництва, Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна, e-mail: 8999413@stud.kai.edu.ua, orcid: 0009-0002-6784-2387

Анотація. Метою статті є комплексний аналіз та систематизація наукових даних щодо впливу ключових параметрів модифікації важкого конструкційного бетону вуглецевими нанотрубками (ВНТ) на його механічні характеристики. Роботу спрямовану на узагальнення проведених раніше досліджень із цього питання та виявлення ключових закономірностей для найбільш поширеного типу бетону в будівництві.

Методологія. Дослідження базується на методах теоретичного аналізу та узагальнення результатів 22 експериментальних робіт. Проаналізовано вплив таких параметрів, як тип, форма і геометричні розміри ВНТ, їх концентрація у цементній матриці, способи диспергування, а також вплив водоцементного відношення та хімічних добавок на ефективність модифікації.

Результати. Установлено, що ефективність модифікації є багатофакторним процесом. Виконано аналіз результатів випробувань партій зразків модифікованого бетону на стиск і на розтяг. Визначено, що оптимальною з погляду механічних властивостей є концентрація ВНТ у діапазоні 0,05–0,15% від маси цементу, тоді як її перевищення може призводити до агрегації наночастинок та зниження міцності. Підтверджено, що застосування ультразвукової обробки у поєднанні з полікарбоксилатними суперпластифікаторами є одним із найбільш дієвих методів для досягнення рівномірного розподілу ВНТ. Визначено, що короткі (< 10 мкм) та довгі (≥ 10 мкм) нанотрубки по-різному впливають на міцність: довгі можуть бути більш ефективними для міцності на стиск, тоді як короткі – для міцності на розтяг.

Наукова новизна. На відміну від існуючих оглядів, які аналізують вплив модифікації нанотрубками на різні типи цементних композитів, наукова новизна цієї роботи полягає у цілеспрямованому аналізі та систематизації даних виключно для важкого конструкційного бетону. Такий сфокусований підхід дав змогу виявити специфічні для цього матеріалу закономірності, уточнити оптимальні діапазони концентрацій ВНТ та встановити ієрархію впливу ключових параметрів.

Практична значущість. Результати роботи є корисними для досліджень у галузі будівельного матеріалознавства. Вони дають змогу оптимізувати склад бетону для отримання покращених характеристик та уникнути використання завідомо неефективних рішень, що сприяє розробленню більш надійних та довговічних будівельних матеріалів.

Ключові слова: модифікований бетон, вуглецеві нанотрубки, міцність на стиск, міцність на розтяг, диспергування, концентрація ВНТ, суперпластифікатор, нанотехнології у будівництві, наноармування, тріщиностійкість, довговічність.

ВСТУП

Бетон є основним незамінним конструкційним матеріалом у сучасному будівництві, що зумовлює постійну актуальність пошуку шляхів підвищення його експлуатаційних характеристик. Зі зростанням вимог до надійності, довговічності та екологічності будівельних конструкцій наукова спільнота активно розвиває нові напрями в матеріалознавстві. Одним із найбільш перспективних є застосування нанотехнологій для модифікації структури бетону на мікро- та нанорівні [17; 20].

Використання вуглецевих нанотрубок (ВНТ) відкриває значні можливості для цілеспрямованої зміни властивостей цементних матеріалів [17; 20]. ВНТ завдяки своїм унікальним механічним властивостям та високому співвідношенню сторін виступають у ролі наноармуючих елементів. Численні дослідження підтверджують, що введення навіть незначної кількості ВНТ у структуру бетону здатне суттєво покращити не лише його міцність на стиск та розтяг, а й цілий комплекс ключових експлуатаційних показників.

Зокрема, ВНТ перешкоджають утворенню та поширенню мікротріщин, що призводить до підвищення тріщиностійкості та енергії руйнування бетону [4; 9; 22]. Зафіксовано покращення зчеплення бетону з арматурою: дослідження показали збільшення міцності зчеплення на 36% за дозування 0,03% ВНТ, що є важливим для залізобетонних конструкцій [6; 8; 19; 25]. Є дані про підвищення стійкості до агресивних середовищ, зокрема на кислотну, сульфатну та хлоридну атаки, що напряму впливає на довговічність конструкцій [4; 26; 27]. Окрім того, дослідження демонструють, що ВНТ можуть підвищувати вогнестійкість бетону [15].

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Наукові публікації останнього десятиліття демонструють значний інтерес до теми модифікації цементних систем за допомогою ВНТ. Слід відзначити оглядову роботу [20], де аналізується вплив ВНТ на різні типи бетону, та оглядову роботу [17], де систематизовано вплив ВНТ на широкий діапазон цементних матеріалів. Проте узагальнення даних для широкого класу бетонів не завжди дає змогу виявити специфічні закономірності для важкого конструкційного бетону, який є основним будівельним матеріалом, на чому і фокусується дана робота.

Важливо зазначити, що ефективність модифікації ВНТ є вищою для цементних паст та розчинів, аніж для бетонів. У бетоні

наявність крупного заповнювача створює додаткові перешкоди для рівномірного розподілу наночастинок і збільшує кількість зон контакту «заповнювач – матриця», що може дещо знижувати кінцевий приріст міцності порівняно з дрібнозернистими системами [24].

Ефективність модифікації визначається трьома основними механізмами [4; 5; 8]:

- Ефект заповнення (filler effect): ВНТ заповнюють нанопори у цементній матриці, роблячи її щільнішою [16].

- Ефект центрів кристалізації (nucleation effect): нанотрубки слугують додатковими зародками для росту кристалів гідратів силікатів кальцію (C-S-H) [5].

- Мостовий ефект (bridging effect): ВНТ діють як наноарматура, перекриваючи мікротріщини [4; 5; 8].

Проблематика модифікації полягає у значній варіативності результатів. Існують дослідження, де не вдалося досягти позитивного ефекту, або навіть спостерігалось зниження міцності, що вказує на складність технологічного процесу та недостатню дослідженість цього питання [24; 25].

МЕТА

Метою статті є аналіз та систематизація результатів наукових досліджень щодо впливу ключових параметрів модифікації важкого конструкційного бетону ВНТ на його механічні властивості. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- Проаналізувати вплив типу, форми та геометричних розмірів ВНТ на міцнісні характеристики бетону.

- Визначити оптимальні діапазони концентрації ВНТ, узагальнивши дані експериментів.

- Оцінити ефективність різних способів диспергування ВНТ у цементній матриці.

- Дослідити вплив водоцементного відношення та хімічних добавок.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На основі аналізу відібраних 22 експериментальних досліджень [1–3; 5–16; 18; 19; 21; 24–27] було систематизовано вплив основних параметрів модифікації. Спільним для всіх досліджень була наявність експериментальних випробувань зразків модифікованого бетону на міцність на стиск і на розтяг (розколювання). Загальна кількість відібраних результатів випробувань партій зразків модифікованого бетону на стиск становить 81, на розтяг (розколювання) – 57. У всіх дослідженнях бетонна суміш складалася з портландцементу, дрібного і крупного заповнювача та

добавок у вигляді нанотрубок. Найчастіше використовувався крупний заповнювач із максимальною фракцією до 20 мм. У більшості досліджень для покращення диспергування нанотрубок і рухливості бетонної суміші використовувалися суперпластифікатори.

Тип, форма і розміри ВНТ

Для модифікації бетону переважно використовуються багаточислові ВНТ (БВНТ) через їх значно нижчу вартість порівняно з одношаровими [20]. У всіх розглянутих дослідженнях застосовувалися БВНТ.

За типом нанотрубки можуть бути у чистому вигляді (pristine) або функціоналізовані (наприклад, групами -COOH, -OH). Функціоналізація покращує диспергування, але може вносити структурні дефекти [5; 7]. Установлено різноспрямований вплив хімічної модифікації ВНТ (табл. 1). Функціоналізовані нанотрубки ефективніші для міцності на стиск завдяки утворенню міцніших хімічних зв'язків із цементною матрицею. Проте для міцності на розтяг кращі результати показують чисті ВНТ, імовірно, через їх вищу власну міцність, що дає змогу ефективніше «зшивати» мікротріщини.

За формою застосування БВНТ представлені на ринку у вигляді порошку або водної суспензії. Дані (табл. 1) свідчать, що лабораторне диспергування порошкових нанотрубок значно ефективніше за готові промислові суспензії. Це підтверджується вищим приростом міцності як на стиск, так і на розтяг. Основні переваги лабораторного методу – можливість оптимізації процесу та уникнення агломерації під час зберігання.

Щодо розміру нанотрубок їх умовно класифіковано як «довгі» (довжина ≥ 10 мкм) та «короткі» (довжина < 10 мкм) [17]. Аналіз показує (табл. 1), що довгі трубки дещо ефективніше підвищують міцність на стиск, тоді як короткі значно переважають під час роботи на розтяг.

Концентрація ВНТ

Концентрація ВНТ є ключовим параметром модифікації; 18 із 22 розглянутих досліджень вивчали вплив різних концентрацій нанотрубок. Аналіз графіків (рис. 1, 2) показує, що найбільш ефективні значення концентрації ВНТ становлять від 0,05% до 0,15% від маси цементу. Перевищення цього оптимального діапазону здебільшого призводить до зниження міцності через утворення агломератів, які діють як дефекти структури [2; 10; 13]. Наприклад, дослідження [2] встановило пік міцності при 0,25% ВНТ, після чого показники знижувалися. Існують поодинокі дослідження з дуже високими концентраціями (вище 1%) [15], проте через малу кількість таких робіт цей діапазон не можна вважати достатньо дослідженим. Також дослідження [23] показало аномально високий приріст міцності, тому ці дані були виключені зі статистики для уникнення викривлення тренду.

Способи диспергування ВНТ та вплив добавок

Якісне диспергування є головним технологічним завданням, оскільки незадовільний розподіл ВНТ може бути основною причиною погіршення властивостей бетону [24; 25]. Основними методами є ультразвукова обробка та застосування поверхнево-активних речовин (ПАР).

Ультразвукова обробка (сонікація) – найпоширеніший фізичний метод, що використовувався в усіх розглянутих дослідженнях із порошковими ВНТ. Високочастотні звукові хвилі руйнують агломерати ВНТ. Ефективність сонікації залежить від її тривалості та потужності: недостатня обробка не руйнує агломерати, тоді як надмірна може пошкодити самі нанотрубки [10].

Для стабілізації диспергованих ВНТ застосовують ПАР. Найбільшу ефективність демонструють суперпластифікатори на основі полікарбоксилатного ефіру (ПКЕ) [3; 13; 14].

Таблиця 1

Вплив характеристик ВНТ на приріст міцності бетону

Характеристика ВНТ	К-сть випробувань на стиск	Середній приріст міцності на стиск, %	К-сть випробувань на розтяг	Середній приріст міцності на розтяг, %
За типом				
Чисті (Pristine)	66	+11.4%	52	+19.5%
Функціоналізовані	15	+16.0%	5	+10.8%
За формою				
Порошок	61	+15.0%	43	+21.0%
Суспензія	20	+8.7%	14	+11.7%
За розміром				
Довгі (≥ 10 мкм)	43	+14.3%	31	+16.0%
Короткі (< 10 мкм)	28	+12.3%	23	+21.6%

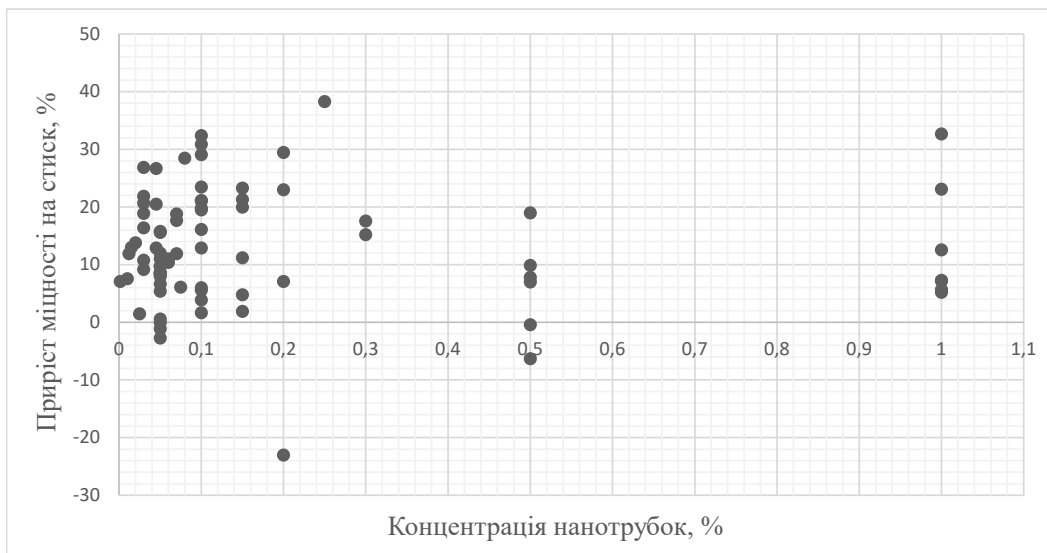


Рис. 1. Вплив концентрації нанотрубок на приріст міцності на стиск

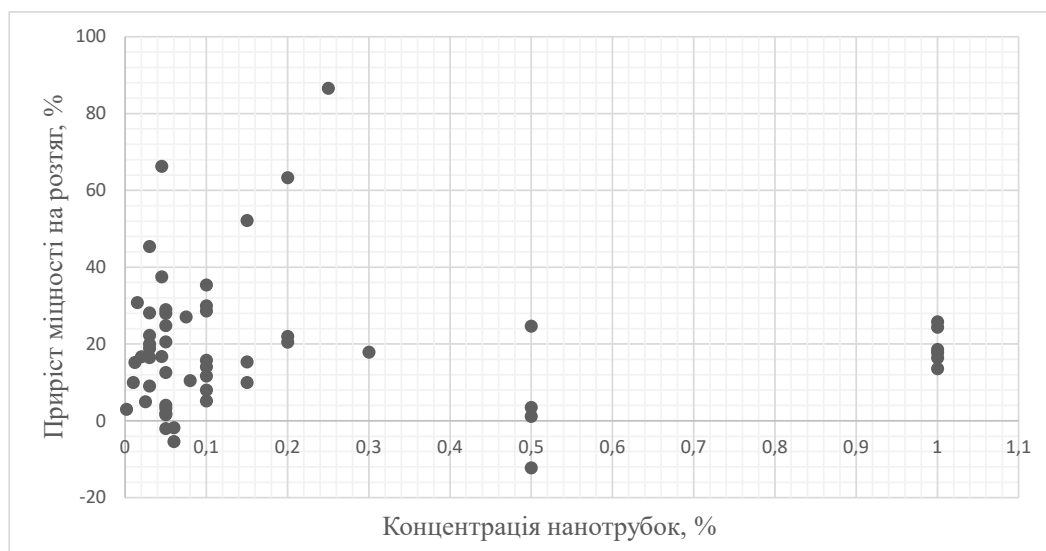


Рис. 2. Вплив концентрації нанотрубок на приріст міцності на розтяг

Також успішно використовуються ПАР на основі сульфованого нафталіну [1]. Найкращий результат дає поєднання ультразвукової обробки суспензії ВНТ разом із суперпластифікатором [3; 13]. Для спрощення процесу доцільно використовувати готові водні суспензії ВНТ, стабілізовані виробником [5; 7]. Як альтернативний метод було запропоновано попереднє диспергування ВНТ у спирті (ізопропанолі), що забезпечило приріст міцності на стиск до 23% [21].

Вплив водоцементного відношення (В/Ц)

Для аналізу впливу водоцементного відношення на механічні властивості модифікованого ВНТ бетону було проаналізовано 74 випробування партій зразків бетону на стиск і 50 на розтяг за різних значень водоцементного

відношення. Як показують узагальнені дані в табл. 2, цей вплив є різним для міцності на стиск та розтяг.

Для міцності на стиск найбільший середній приріст, що становить 14.09%, спостерігається за найнижчого В/Ц ~ 0.35 (≤ 0.38). За збільшення В/Ц до ~ 0.45 приріст міцності падає до найнижчого значення у 8.88%, а потім дещо зростає до 11.63% за В/Ц ~ 0.50 .

Для міцності на розтяг виявлено іншу закономірність: максимальний приріст у 24.72% досягається за В/Ц в діапазоні ~ 0.40 (0.39–0.43). Як за нижчих (~ 0.35), так і за вищих (≥ 0.45) значень В/Ц ефективність модифікації для міцності на розтяг є значно нижчою.

Таблиця 2

Вплив В/Ц на середній приріст міцності бетону

Водоцементне відношення	Кількість випробувань на стиск	Середній приріст міцності на стиск, %	Кількість випробувань на розтяг	Середній приріст міцності на розтяг, %
~0.35 (≤ 0.38)	15	14.09	6	15.28
~0.40 (0.39–0.43)	19	13.68	14	24.72
~0.45 (0.44–0.49)	14	8.88	10	15.12
~0.50 (≥ 0.50)	26	11.63	20	10.87

Ці результати частково узгоджуються з висновками досліджень [7; 14], що модифікація ефективніша у бетонах із нижчим В/Ц. Це можна пояснити тим, що такі бетони вимагають застосування суперпластифікаторів, які сприяють кращому диспергуванню ВНТ, а більш щільна матриця дає змогу нанотрубкам ефективніше виконувати свої функції. Водночас аналіз показує, що оптимальне В/Ц залежить від виду міцності, що досліджується.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз систематизував знання про вплив ключових параметрів на ефективність модифікації важкого конструкційного бетону ВНТ. Установлено, що ефективність є комплексною характеристикою, яка залежить від взаємопов'язаного впливу типу, розмірів, концентрації нанотрубок, методу їх диспергування та складу цементної матриці.

1. Ключовими факторами є концентрація ВНТ та якість їх диспергування. Найбільш стабільний та ефективний результат для важкого бетону досягається за концентрації ВНТ у діапазоні 0,05–0,15% від маси цементу.

2. Найбільш дієвим методом диспергування є ультразвукова обробка водної суспензії ВНТ у поєднанні з полікарбоксилатним суперпластифікатором.

3. Вплив геометричних розмірів ВНТ є неоднозначним і являє собою компроміс між армуючою здатністю та схильністю до агломерації. Вибір оптимальних розмірів ВНТ має корелювати з можливостями технології диспергування.

4. Ефективність модифікації ВНТ вища у бетонах із нижчим водоцементним відношенням, що частково пов'язано з обов'язковим застосуванням суперпластифікаторів у таких сумішах.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Ahmed I., Khitab A., Ahmed S. Effect of Multi-walled Carbon Nanotubes on Mechanical Behavior of Concrete. *6th Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering (ACE 2018)*. GSTF,

2018. P. 427–431. URL: <http://dx.doi.org/10.17515/resm2024.86ma1119rs>

[2] Bhaskar A.V., Shanmugasundaram M. The Optimum Dosage of the Multiwalled Carbon Nanotubes for Improving the Mechanical Properties of Concrete. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2019. Vol. 7, no. 6. P. 591–598.

[3] Bodnarova L., Jarolim T. Study the effect of carbon nanoparticles in concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 385. 012006. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/385/1/012006>

[4] Bogas J.A., Ahmed H.H., Diniz T. Influence of Cracking on the Durability of Reinforced Concrete with Carbon Nanotubes. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 4. 1672. URL: <https://doi.org/10.3390/app11041672>

[5] Carriço A., Bogas J.A., Hawreen A. Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 164. P. 121–133. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.221>

[6] Hassan A., Elkady H., Shaaban I.G. Effect of adding carbon nanotubes on corrosion rates and steel-concrete bond. *Scientific reports*. 2019. Vol. 9, no. 1. 6285. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42761-2>

[7] Hawreen A., Bogas J.A., Kurda R. Mechanical characterization of concrete reinforced with different types of carbon nanotubes. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2019. Vol. 44, no. 10. P. 8361–8376. URL: <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04096-y>

[8] Irshidat M.R. Bond strength evaluation between steel rebars and carbon nanotubes modified concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2021. Vol. 14. e00477. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00477>

[9] Khitab A., Ahmad S., Khushnood R.A. Fracture toughness and failure mechanism of high performance concrete incorporating carbon nanotubes. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2017. Vol. 42. P. 238–248. URL: <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.42.26>

[10] Lu S., Zuo T., Wang Z. Effects of CNTs/PVA on Concrete Performance: Strength, Drying Shrinkage, and Microstructure. *Materials*. 2025. Vol. 18, no. 11. 2535. URL: <https://doi.org/10.3390/ma18112535>

[11] Madhavi T.C., Pavithra P., Singh S.B. Effect of Multiwalled Carbon Nanotubes On Mechanical Properties of Concrete. *International Journal of Scientific Research*. 2013. Vol. 2, no. 6. P. 166–168. URL: <http://dx.doi.org/10.15373/22778179/JUNE2013/53>

[12] Mohammadyan-Yasouj S.E., Ghaderi A. Experimental investigation of waste glass powder, basalt

fibre, and carbon nanotube on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 252. 119115. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119115>

[13] Mohsen M.O., Alansari M., Taha R. Impact of CNTs' treatment, length and weight fraction on ordinary concrete mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 264. 120698. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120698>

[14] Mudasir P., Naqash J.A. Relationship between Water Cement Ratio and Characteristic Properties of Multi Walled Carbon Nano Tube Reinforced Concrete. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2020. Vol. 8, no. 6. P. 333–339. URL: <https://doi.org/10.35940/ijrte.F7472.038620>

[15] Pachideh G., Gholhaki M., Moshtaghi S.M. An Investigation on the Effect of High Temperatures on the Mechanical Properties and Microstructure of Concrete Containing Multiwalled Carbon Nanotubes. *Materials Performance and Characterization*. 2018. Vol. 7, no. 5. P. 896–912. URL: <https://doi.org/10.1520/MPC20180061>

[16] Qissab M.A., Abbas S.T. Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Mechanical Properties of Concrete. *Al-Nahrain University, College of Engineering Journal (NUCEJ)*. 2016. Vol. 19, no. 2. P. 194–201.

[17] Ramezani M., Kim Y.H., Sun Z. Mechanical properties of carbon-nanotube-reinforced cementitious materials: database and statistical analysis. *Magazine of Concrete Research*. 2019. Vol. 72, no. 15. P. 786–809. URL: <https://doi.org/10.1680/jmacr.19.00093>

[18] Rashmi R., Padmapriya R. Mechanical and durability characteristics of multiwalled carbon nano tube in concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 872. 012110. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/872/1/012110>

[19] Reis E.D., Gatuingt F., Poggiali F.S. J. Influence of carbon nanotubes and cement reduction on the bond strength of steel bars in concrete: An experimental investigation. *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 461. 139940. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.139940>

[20] Reis E.D., Borges L.A., Camargos J.S.F. A systematic review on the engineering properties of concrete with carbon nanotubes. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2023. Vol. 45, no. 8. 411. URL: <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04117-w>

[21] Reis E.D., Resende H.F., Christoforo A.L. Assessment of physical and mechanical properties of concrete with carbon nanotubes pre-dispersed in cement. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 89. 109255. URL: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109255>

[22] Shi X., Liu X. Bond behavior of steel rebar in concrete modified by GO-MWCNTs composite. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 57. 104886. URL: <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104886>

[23] Suchorzewski J., Prieto M., Mueller U. An experimental study of self-sensing concrete enhanced with multi-wall carbon nanotubes in wedge splitting test and DIC. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 262. 120871. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120871>

[24] Sun X. Enhancement of the piezoresistive and mechanical properties of cement-based composites

filled with CNTs/GO and nano-SiO₂ sprayed steel fibers. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 385. 131463. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131463>

[25] Taha A., Alnahhal W., Irshidat M. Effect of carbon nanotubes on the bonding mechanism of non-corrosive reinforcements to concrete. *Structures*. 2024. Vol. 60. 105952. URL: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105952>

[26] Vijayabhaskar A., Shanmugasundaram M. Mechanical and Durability Properties of Concrete with Multiwalled Carbon Nanotubes. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7, no. 3.2. P. 350–353.

[27] Yang K. Enhanced performance and mechanisms of cement-based composites with CNTs and nano-silica under sulfate attack. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 84. 108428. URL: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108428>

REFERENCES

[1] Ahmed, I., Khitab, A., Ahmed, S., Arshad, M.T., & Qureshi, L.A. (2018). Effect of Multi-walled Carbon Nanotubes on Mechanical Behavior of Concrete. In *6th Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering (ACE 2018)* (pp. 427–431). GSTF. <http://dx.doi.org/10.17515/resm2024.86ma1119rs> [in English].

[2] Bhaskar, A.V., & Shanmugasundaram, M. (2019). The Optimum Dosage of the Multiwalled Carbon Nanotubes for Improving the Mechanical Properties of Concrete. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 7(6), 591–598 [in English].

[3] Bodnarova, L., & Jarolim, T. (2018). Study the effect of carbon nanoparticles in concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 385, 012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/385/1/012006> [in English].

[4] Bogas, J.A., Ahmed, H.H., & Diniz, T. (2021). Influence of Cracking on the Durability of Reinforced Concrete with Carbon Nanotubes. *Applied Sciences*, 11(4), 1672. <https://doi.org/10.3390/app11041672> [in English].

[5] Carriço, A., Bogas, J.A., Hawreen, A., & Guedes, M. (2018). Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 164, 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.221> [in English].

[6] Hassan, A., Elkady, H., & Shaaban, I.G. (2019). Effect of adding carbon nanotubes on corrosion rates and steel-concrete bond. *Scientific reports*, 9(1), 6285. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42761-2> [in English].

[7] Hawreen, A., Bogas, J.A., & Kurda, R. (2019). Mechanical characterization of concrete reinforced with different types of carbon nanotubes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(10), 8361–8376. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04096-y> [in English].

[8] Irshidat, M.R. (2021). Bond strength evaluation between steel rebars and carbon nanotubes modified concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00477. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00477> [in English].

[9] Khitab, A., Ahmad, S., Khushnood, R.A., Rizwan, S.A., Ferro, G.A., Restuccia, L., Ali, M., & Mehmood, I. (2017). Fracture toughness and failure mechanism of high performance concrete incorporating carbon nanotubes. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 42, 238–248. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.42.26> [in English].

[10] Lu, S., Zuo, T., Wang, Z., & Yan, S. (2025). Effects of CNTs/PVA on Concrete Performance: Strength, Drying Shrinkage, and Microstructure. *Materials*, 18(11), 2535. <https://doi.org/10.3390/ma18112535> [in English].

[11] Madhavi, T.C., Pavithra, P., Singh, S.B., Vamsi Raj, S.B., & Paul, S. (2013). Effect of Multiwalled Carbon Nanotubes On Mechanical Properties of Concrete. *International Journal of Scientific Research*, 2(6), 166–168. <http://dx.doi.org/10.15373/22778179/JUNE2013/53> [in English].

[12] Mohammadyan-Yasouj, S.E., & Ghaderi, A. (2020). Experimental investigation of waste glass powder, basalt fibre, and carbon nanotube on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 252, 119115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119115> [in English].

[13] Mohsen, M.O., Alansari, M., Taha, R., Senouci, A., & Abutaqa, A. (2020). Impact of CNTs' treatment, length and weight fraction on ordinary concrete mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 264, 120698. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120698> [in English].

[14] Mudasir, P., & Naqash, J.A. (2020). Relationship between Water Cement Ratio and Characteristic Properties of Multi Walled Carbon Nano Tube Reinforced Concrete. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(6), 333–339. <https://doi.org/10.35940/ijrte.F7472.038620> [in English].

[15] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshtaghi, S.M. (2018). An Investigation on the Effect of High Temperatures on the Mechanical Properties and Microstructure of Concrete Containing Multiwalled Carbon Nanotubes. *Materials Performance and Characterization*, 7(5), 896–912. <https://doi.org/10.1520/MPC20180061> [in English].

[16] Qissab, M.A., & Abbas, S.T. (2016). Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Mechanical Properties of Concrete. *Al-Nahrain University, College of Engineering Journal (NUCEJ)*, 19(2), 194–201 [in English].

[17] Ramezani, M., Kim, Y.H., & Sun, Z. (2019). Mechanical properties of carbon-nanotube-reinforced cementitious materials: database and statistical analysis. *Magazine of Concrete Research*, 72(15), 786–809. <https://doi.org/10.1680/jmacr.19.00093> [in English].

[18] Rashmi, R., & Padmapriya, R. (2020). Mechanical and durability characteristics of multiwalled

carbon nano tube in concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 872, 012110. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/872/1/012110> [in English].

[19] Reis, E.D., Gatuingt, F., Poggiali, F.S.J., & Bezerra, A.C.S. (2025). Influence of carbon nanotubes and cement reduction on the bond strength of steel bars in concrete: An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 461, 139940. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.139940> [in English].

[20] Reis, E.D., Borges, L.A., Camargos, J.S.F., Gatuingt, F., Poggiali, F.S. J., & Bezerra, A.C.S. (2023). A systematic review on the engineering properties of concrete with carbon nanotubes. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(8), 411. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04117-w> [in English].

[21] Reis, E.D., Resende, H.F., Christoforo, A.L., Costa, R.M., Gatuingt, F., Poggiali, F.S.J., & Bezerra, A.C.S. (2024). Assessment of physical and mechanical properties of concrete with carbon nanotubes pre-dispersed in cement. *Journal of Building Engineering*, 89, 109255. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109255> [in English].

[22] Shi, X., & Liu, X. (2022). Bond behavior of steel rebar in concrete modified by GO-MWCNTs composite. *Journal of Building Engineering*, 57, 104886. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104886> [in English].

[23] Suchorzewski, J., Prieto, M., & Mueller, U. (2020). An experimental study of self-sensing concrete enhanced with multi-wall carbon nanotubes in wedge splitting test and DIC. *Construction and Building Materials*, 262, 120871. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120871> [in English].

[24] Sun, X. (2024). Enhancement of the piezoresistive and mechanical properties of cement-based composites filled with CNTs/GO and nano-SiO₂ sprayed steel fibers. *Construction and Building Materials*, 385, 131463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131463> [in English].

[25] Taha, A., Alnahhal, W., & Irshidat, M. (2024). Effect of carbon nanotubes on the bonding mechanism of non-corrosive reinforcements to concrete. *Structures*, 60, 105952. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105952> [in English].

[26] Vijayabhaskar, A., & Shanmugasundaram, M. (2018). Mechanical and Durability Properties of Concrete with Multiwalled Carbon Nanotubes. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 350–353 [in English].

[27] Yang, K. (2024). Enhanced performance and mechanisms of cement-based composites with CNTs and nano-silica under sulfate attack. *Journal of Building Engineering*, 84, 108428. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108428> [in English].

ABSTRACT

Lapenko O., Hryshko P. Analysis of the effectiveness of parameters for modifying concrete with carbon nanotubes.

Purpose. The purpose of this work is a comprehensive analysis and systematization of scientific data on the influence of key parameters of modifying heavyweight structural concrete with carbon nanotubes (CNTs) on its mechanical characteristics. The work aims to summarize previous research on this issue and identify key patterns for the most common type of concrete in construction.

Methodology. The research is based on methods of theoretical analysis and generalization of the results of 22 experimental works. The influence of parameters such as the type, form, and geometric dimensions of CNTs, their concentration in the cement matrix, dispersion methods, as well as the effect of the water-cement ratio and chemical additives on the effectiveness of the modification, were analyzed.

Results. It has been established that the effectiveness of modification is a multifactorial process. An analysis of the results of testing batches of modified concrete samples for compression and tension was performed. It was determined that the optimal concentration of CNTs, from the point of view of mechanical properties, is in the range of 0.05–0.15% by weight of cement, while exceeding it can lead to nanoparticle agglomeration and a decrease in strength. It is confirmed that the use of ultrasonic treatment in combination with polycarboxylate superplasticizers is one of the most effective methods for achieving uniform distribution of CNTs. It was determined that short ($< 10 \mu\text{m}$) and long ($\geq 10 \mu\text{m}$) nanotubes have different effects on strength: long ones can be more effective for compressive strength, while short ones are for tensile strength.

Scientific novelty. Unlike existing reviews that analyze the impact of nanotube modification on various types of cementitious composites, the scientific novelty of this work lies in the targeted analysis and systematization of data exclusively for heavyweight structural concrete. This focused approach allowed for the identification of patterns specific to this material, clarification of the optimal concentration ranges for CNTs, and establishment of a hierarchy of influencing key parameters.

Practical relevance. The results of the work are useful for research in the field of building materials science. They allow for the optimization of concrete composition to obtain improved characteristics and avoid the use of knowingly ineffective solutions, which contributes to the development of more reliable and durable building materials.

Keywords: modified concrete, carbon nanotubes, compressive strength, tensile strength, dispersion, CNT concentration, superplasticizer, nanotechnology in construction, nano-reinforcement, crack resistance, durability.

AUTHOR'S NOTE:

Lapenko Oleksandr, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Computer Technologies in Construction, State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine, e-mail: oleksandr.lapenko@npp.kai.edu.ua, orcid: 0000-0002-2029-0792.

Hryshko Pavlo, Postgraduate Student at the Department of Computer Technologies in Construction, State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine, e-mail: 8999413@stud.kai.edu.ua, orcid: 0009-0002-6784-2387.

Стаття подана до редакції 07.07.2025 р.

Стаття прийнята до опублікування 15.08.2025 р.

Стаття опублікована 30.10.2025 р.