

М. Р. Ханенко¹

В. В. Мартинюк¹

БЕТОН-КОНДЕНСАТОР: НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ В БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

¹Вінницький національний технічний університет

Анотація

У статті розглянуто новітню технологію створення суперконденсаторів на основі цементу, води та сажі (с³). Проаналізовано досягнення дослідників Массачусетського технологічного інституту (MIT) щодо збільшення щільності енергії таких систем у 10 разів завдяки оптимізації органічних електролітів та впровадженню нановуглецевих мереж. Обґрунтовано перспективи використання бетону як масивного накопичувача енергії для забезпечення потреб домогосподарств та інтеграції з відновлюваними джерелами.

Ключові слова:

бетон-конденсатор, суперконденсатор, накопичення енергії, сажа, відновлювані джерела енергії, структурний моніторинг.

Abstract

The article considers the latest technology of creating supercapacitors based on cement, water, and carbon black (с³). The achievements of researchers at the Massachusetts Institute of Technology (MIT) in increasing the energy density of such systems by 10 times due to the optimization of organic electrolytes and the introduction of nanocarbon networks are analyzed. The prospects of using concrete as a massive energy storage device to meet the needs of households and integrate with renewable energy sources are substantiated.

Keywords: concrete capacitor, supercapacitor, energy storage, carbon black, renewable energy sources, structural health monitoring.

Вступ. Перехід до відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергетика, вимагає створення масштабних і недорогих систем накопичення. Бетон є найпоширенішим будівельним матеріалом у світі, і його перетворення на суперконденсатор здатне вирішити проблему зберігання енергії без залучення додаткових площ.

Принцип дії бетону-конденсатора. Технологія електрон-провідного вуглецевого бетону (с³), розроблена в Массачусетському технологічному інституті (MIT), базується на суміші цементу, води та ультрадрібної сажі. Під час гідратації цементу утворюється розгалужена мережа пор, у яку інтегруються наночастинки вуглецю.

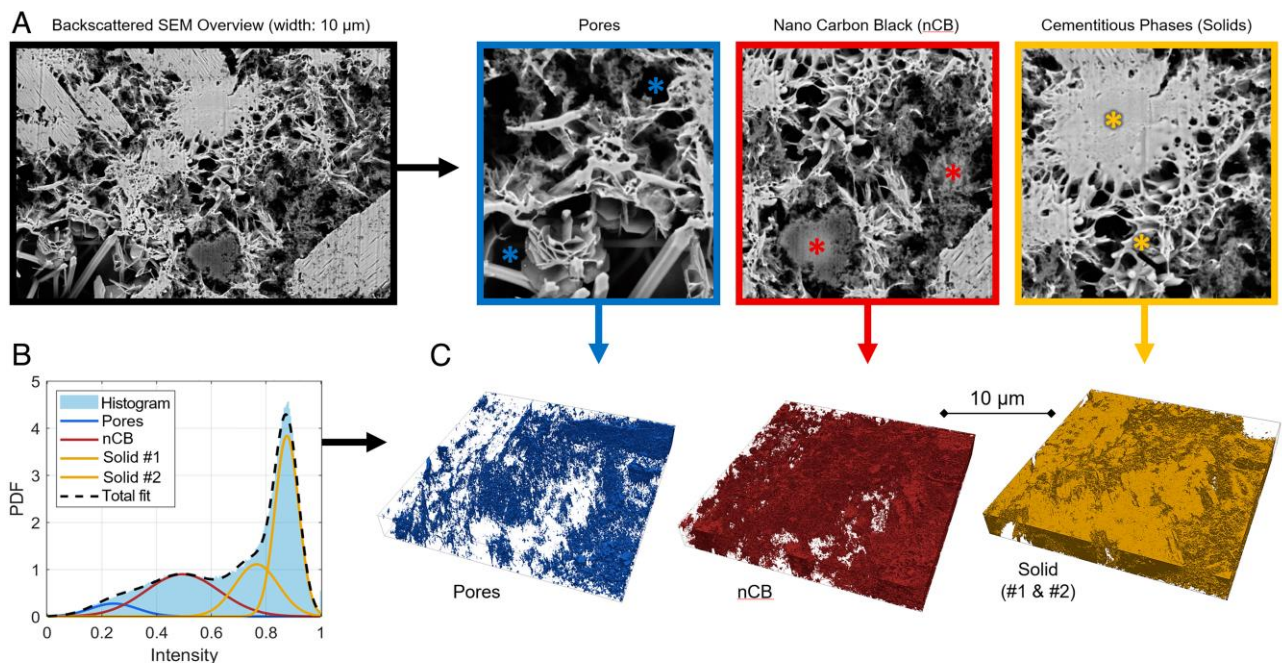


Рисунок 1 - Структура нановуглецевої мережі та фазовий розподіл у бетоні ec^3 [1]

Щоб перетворити цей матеріал на суперконденсатор, використовують два електроди з ec^3 , просочені електролітом і розділені мембраною. Енергія, що накопичується в такому конденсаторі, визначається класичною формулою:

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

де E — енергія (Дж), C — електрична ємність (Ф), V — напруга (В).

Збільшення ємності матеріалу. У 2025 році дослідники МІТ повідомили про революційне збільшення щільності енергії бетону-конденсатора у 10 разів порівняно з базовою версією 2023 року. Завдяки методу FIB-SEM томографії вчені візуалізували фрактальну структуру вуглецевої мережі на нанорівні. Це дозволило оптимізувати склад матеріалу: замість замочування готових електродів, тепер застосовуються органічні електроліти (солі четвертинного амонію та ацетонітрил), які додаються безпосередньо у воду під час замішування бетону ("cast-in electrolyte").

Таблиця 1 - Порівняння характеристик бетону-конденсатора ec^3

Покоління матеріалу	Необхідний об'єм для живлення будинку на добу	Щільність енергії на m^3
Прототип 2023 року	45 m^3	~ 0,72 МДж (0,2 кВт·год)
Оптимізований ec^3 (2025)	5 m^3	> 7,2 МДж (2,0 кВт·год)

Як видно з таблиці 1, нині достатньо 5 кубічних метрів бетону (об'єм стандартної стіни підвалу), щоб забезпечити домогосподарство електроенергією на цілу добу.

Структурний моніторинг. Окрім накопичення енергії, матеріал здатний до самодіагностики. Команда MIT створила 9-вольтову арку з ес^3 , яка живила світлодіод.

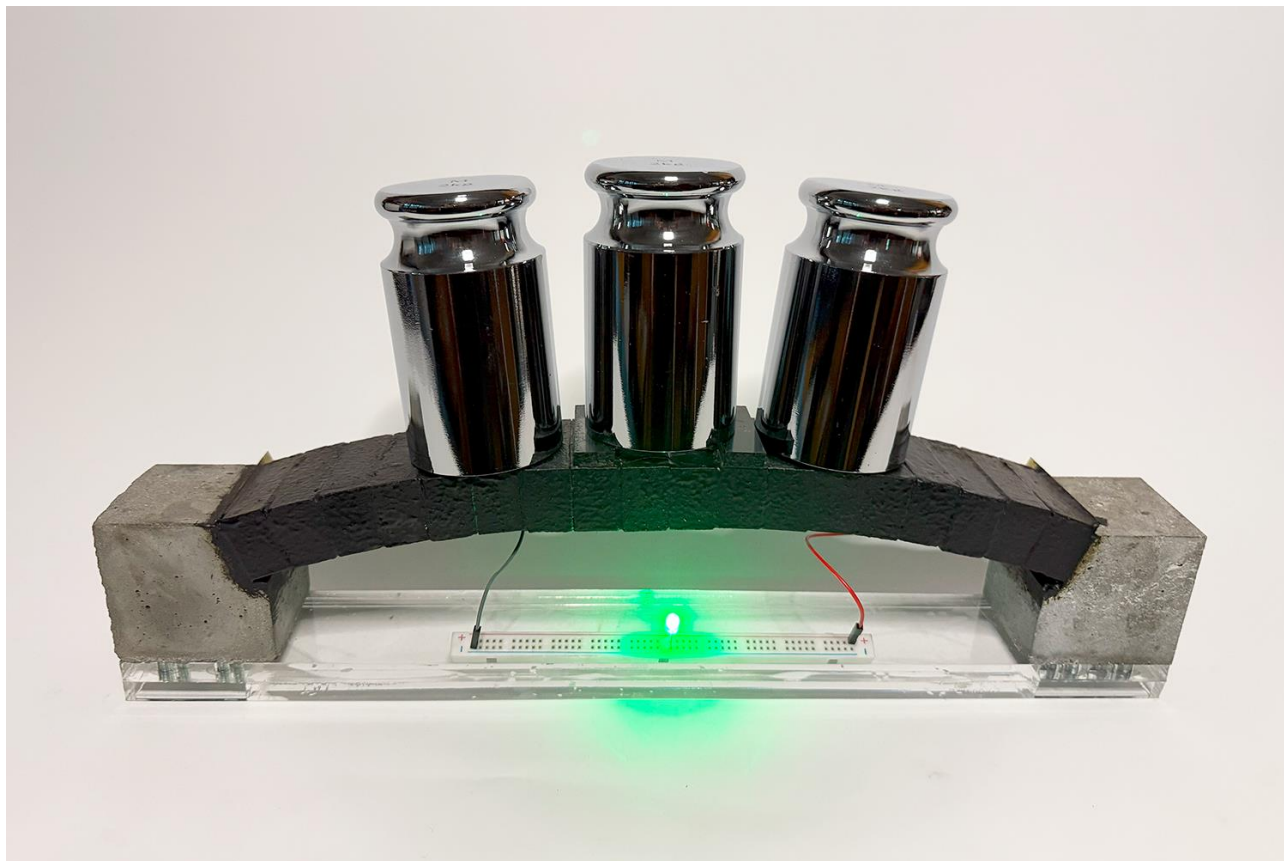


Рисунок 2 - Демонстрація роботи прототипу арки з ес^3 під навантаженням [2]

Під час прикладання механічного навантаження яскравість світлодіода змінювалася. Це доводить, що зміна електричного опору при деформації може слугувати інструментом для моніторингу цілісності конструкцій у реальному часі.

Висновки. Інтеграція масивних накопичувачів енергії безпосередньо у фундаменти, стіни та дороги дозволить згладжувати пікові навантаження в енергомережах, зберігаючи надлишки сонячної енергії вдень. Технологія ес^3 перетворює пасивні будівельні конструкції на активні елементи енергетичної інфраструктури майбутнього.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Chanut N. High energy density carbon–cement supercapacitors for architectural energy storage [Електронний ресурс] / N. Chanut, D. Stefaniuk, J. Weaver [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS). - 2025. - Vol. 122. - P. 1–9. - Режим доступу: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2511912122>
2. Concrete “battery” developed at MIT now packs 10 times the power [Електронний ресурс] // MIT News. - 2025. - Режим доступу до ресурсу: <https://cee.mit.edu/concrete-battery-developed-at-mit-now-packs-10-times-the-power/>

Ханенко Максим Русланович, студент групи ЗПІ-256, факультет інженерії програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, maksimkhanenk@gmail.com

Науковий керівник: Мартинюк Володимир Валерійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри загальної фізики Вінницького національного технічного університету, Вінниця, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua

Khanenko Maksym Ruslanovych, student of the Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, maksimkhanenk@gmail.com

Superior: Martynyuk Volodymyr Valeriyovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua