

С. В. Богаченко, А. О. Титюк, А. В. Радкевич, О. М. Савицький, А. С. Смирнов

Український державний університет науки і технологій

МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ НАДРУКОВАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ 3D ПРИНТЕРУ

У статті розглядаються сучасні підходи до моніторингу технічного стану будівель та споруд, споруджених із застосуванням технології 3D-друку. Особлива увага приділяється концептуальним підходам впровадження систем моніторингу на основі Інтернету речей, що дозволяє здійснювати постійний збір даних як на етапі нового будівництва, так і під час експлуатації об'єктів. Такий підхід надає можливість оперативно виявляти дефекти та пошкодження, контролювати відповідність фактичних параметрів проектним вимогам та прогнозувати терміни безпечної експлуатації конструкцій. Розглянуті концепції також передбачають трансформацію будівельної інформаційної моделі в цифровий двійник, що в свою чергу дозволяє візуалізувати технічний стан, моделювати поширення дефектів, проводити віртуальні випробування та оцінювати ефективність ремонту. Запропоновані підходи створюють основу для інтелектуального управління сучасним будівництвом.

Ключові слова: діагностика, моніторинг технічного стану конструкцій, 3D-друк, інтернет речей

Постановка проблеми

Будівельна сфера та пов'язані з нею інженерні напрямки проходять значну трансформацію завдяки технологіям тривимірного друку. За останні два десятиліття ці технології пройшли шлях від використання виключно для створення прототипів до повноцінного виготовлення інженерних елементів та конструкцій, які застосовуються у будівництві. Якщо на початковому етапі можливості 3D-друку обмежувалися невеликими деталями з полімерів і металів, то сьогодні технологія дозволяє зводити масштабні об'єкти з цементобетонних сумішей, композитних матеріалів та навіть біополімерів.

Використання 3D-друку у будівництві має низку переваг: скорочення часу виконання робіт, зниження обсягів відходів та більш раціональне використання ресурсів, зменшення вартості реалізації проєктів, можливість створення складних просторових та архітектурних форм.

Водночас широке впровадження 3D-друкованих будівельних конструкцій стримується низкою об'єктивних чинників. Одним з найважливіших серед них є недостатня кількість систематизованих даних про довгострокову експлуатаційну надійність та безпечність таких споруд. Процес формування елементів та конструкцій має принципові відмінності від класичного бетонування. Пошарове нанесення матеріалу, залежність якості від режимів друку (швидкість екструзії, температура, вологість, розмір сопла), а також можливі технологічні відхилення призводять до появи внутрішніх порожнин,

мікротріщин та розшарувань. Наявність даних дефектів може істотно впливати на міцність, тріщиностійкість і довговічність конструкцій. Відповідно своєчасне виявлення дефектів, контроль відповідності фактичних параметрів проектним вимогам і прогнозування строків безпечної експлуатації мають ключове значення для запобігання аварійним ситуаціям, підвищення економічної ефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботах останніх років систематизовано основні типи дефектів, які характерні для конструкцій виготовлених за допомогою 3D-друку:

- анізотропія матеріалу – міцність та інші механічні властивості можуть значно відрізнятись в залежності від напрямку навантаження відносно площини друку. Цей ефект особливо виражений у цементних та полімерних 3D-друкованих матеріалах [1, 2];

- холодні шви – це місця з'єднання між послідовними шарами матеріалу, де може спостерігатися слабка адгезія, якщо час між нанесенням шарів перевищує оптимальний або якщо умови навколишнього середовища несприятливі [3]. Холодні шви є потенційними зонами розшарування та зниженої міцності;

- неоднорідність та внутрішні порожнини – нерівномірне ущільнення, проблеми з екструзією, повітряні бульбашки можуть призвести до утворення внутрішніх пустот та зон з різною пористістю, що впливає на загальну цілісність конструкції;

- вплив фібри та армування – інтеграція армування (наприклад, розсіяного фібрового армування, композитних стержнів) у 3D-друковані конструкції все ще досліджуються, а їх взаємодія з надрукованим матеріалом потребує моніторингу.

Сучасні дослідження у сфері моніторингу технічного стану 3D-друкованих будівель зосереджені на інтеграції сенсорів безпосередньо в матеріал під час процесу друку або на використанні неруйнівних методів. До найбільш поширених вимірювальних засобів можна віднести:

- оптоволоконні датчики – широко застосовуються завдяки їхній хімічній інертності, малим розмірам та здатності вимірювати деформації і температуру по всій довжині. Вони можуть бути інтегровані в 3D-друковані шари під час або одразу після екструзії, що в свою чергу дозволяє виявляти холодні шви та зони концентрації напружень [4].

- п'єзоелектричні датчики – використовуються для активного або пасивного моніторингу. Методи акустичної емісії дозволяють виявляти та локалізувати мікротріщини, що розвиваються, реєструючи звукові хвилі, які вони генерують. Імпедансний метод використовує для вимірювання змін механічного імпедансу структури, що вказує на локальні пошкодження [5].

- самочутливі матеріали – модифікація матеріалу для 3D-друку (наприклад, цементного розчину) шляхом додавання провідних наповнювачів (вуглецеві нанотрубки, графен, вуглецеві волокна). Матеріал сам стає сенсором, де зміни електричного опору або ємності свідчать про утворення мікротріщин або деформацій [6, 7]. Це забезпечує розподілений моніторинг великих обсягів з мінімальною кількістю зовнішніх проводів.

- датчики вологості та температури – вбудовуються для контролю процесу гідратації цементу, виявлення зон підвищеної вологості (що може свідчити про проникнення води або підвищений ризик корозії арматури) та моніторингу впливу температурних перепадів.

Хоча моніторинг технічного стану конструкцій фокусується на безперервному моніторингу, традиційні методи неруйнівного контролю також можливо адаптувати для діагностики конструкцій, виготовлених за допомогою 3D-друку, на етапі будівництва та при періодичних обстеженнях:

- ультразвуковий контроль – використовується для виявлення внутрішніх дефектів, таких як пустоти, розшарування та оцінки якості міжшарових з'єднань, проте точність залежить від геометрії виробу, контакту датчиків та неоднорідності матеріалу. [8];

- термографія – тепловізійні камери можуть виявляти температурні аномалії на поверхні, які

вказують на внутрішні дефекти (наприклад, теплові мости, зони з різною теплопровідністю свідчать про пустоти або розшарування) [9, 10].

Мета статті

Метою проведених досліджень є розробка концепту довготривалого моніторингу технічного стану конструкцій будівель та споруд, споруджених за допомогою 3D-друку.

Виклад основного матеріалу

В сучасній будівельній індустрії розробка систем моніторингу технічного стану будівель та споруд ґрунтується на індивідуальному підході, що викликано великою кількістю архітектурних рішень. В рамках дослідження пропонується окреслити загальних концепт моніторингу технічного стану будівель та споруд споруджених за допомогою 3D друку. На рис. 1 схематично відображено послідовність впровадження та експлуатації системи моніторингу при новому будівництві.

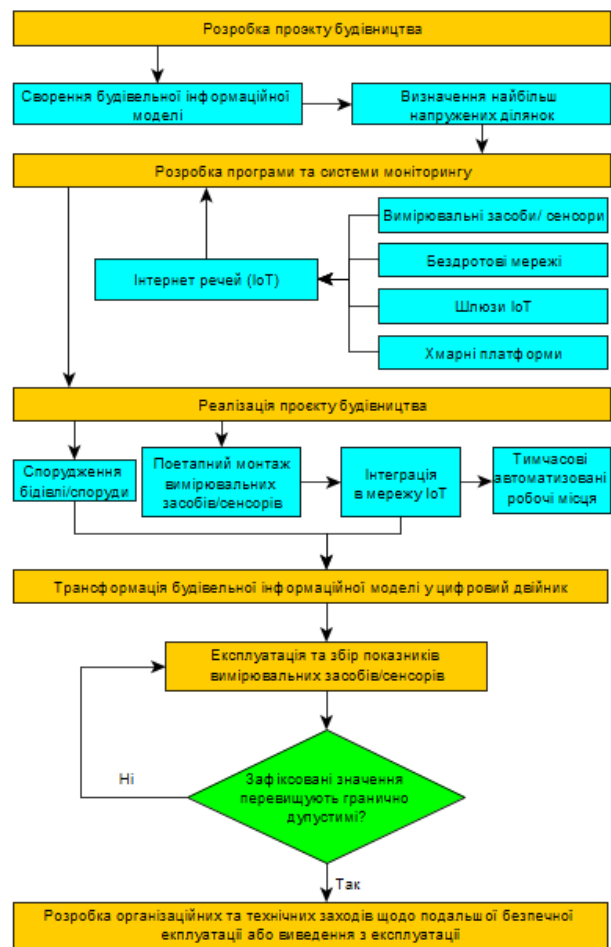


Рис. 1. Послідовність впровадження та експлуатації системи моніторингу технічного стану будівель та споруд при новому будівництві

Згідно запропонованої схеми (рис. 1) при проєктуванні будівель та споруд виконується інформаційне моделювання будівлі (BIM – Building Information Modeling). BIM – це процес створення та управління інформацією про будівельний об’єкт. Це не просто 3D-модель, а цифрове відображення фізичних та функціональних характеристик об’єкта.

З точки зору створення систем моніторингу технічного стану будівельних конструкцій на етапі проєктування будівельна інформаційна модель використовується для визначення найбільш напружених зон, після чого безпосередньо розробляються програма та система моніторингу. Розробка програми моніторингу на території України обумовлена нормою [11].

Сама система моніторингу розробляється на базі інтернет речей (IoT) в чотирьох рівнях.

На рівні сенсорів виконується безпосередній підбір необхідних сенсорів, контролерів та аналого-цифрових перетворювачів. Кожен сенсор або група сенсорів підключається до контролера, який збирає аналогові дані, оцифровує їх та проводить попередню обробку.

Мережевий рівень передбачає підбір протоколів передачі даних на основі енергоспоживання, обсягу даних та відстані. До найбільш поширених можна віднести: Long Range Wide Area Network (забезпечує великий радіус дії та низьке енергоспоживання), Narrowband IoT (використовує існуючу стільникову інфраструктуру, ефективний для передачі невеликих обсягів даних з низьким енергоспоживанням у зонах зі стабільним покриттям мобільного зв’язку), Zigbee/Bluetooth Low Energy (використовуються для коротких відстаней, наприклад, для зв’язку між сенсорами в межах однієї стіни або одного приміщення, що дозволяє формувати mesh-мережі), Wi-Fi (використовується для передачі значних обсягів даних на короткі відстані, часто від шлюзів IoT або для сенсорів, що потребують високої пропускної здатності та мають постійне джерело живлення).

Рівень шлюзів забезпечує агрегацію даних (збір даних від усіх сенсорів), фільтрацію (видалення шуму, дублікатів, невірних показань), нормалізацію (перетворення даних у стандартизований формат), локальний аналіз та виявлення аномалій (запуск алгоритмів для виявлення критичних подій або аномалій безпосередньо на шлюзі дозволяє реагувати на критичні зміни в реальному часі, зменшуючи затримки), зниження навантаження на мережу (на хмарний сервер передаються лише релевантні або агреговані дані, що зменшує трафік та витрати на передачу).

Рівень хмарних платформ є центральним сховищем, яке забезпечує: безпечне підключення

пристроїв, управління пристроями, маршрутизацію повідомлень.

Після узгодження всіх рівнів виконується безпосереднє спорудження будівлі або споруди з поетапним монтажем сенсорів та інтеграція в мережу IoT. На даному етапі можливе створення автоматизованих робочих місць для моніторингу технічного стану конструкцій в процесі будівництва, що в свою чергу сприяє ранньому виявленню дефектів будівництва.

Концептуальні засади впровадження системи моніторингу на етапі експлуатації будівлі (Рис.2) мають свої особливості та відмінності порівняно з впровадженням системи моніторингу під час нового будівництва.

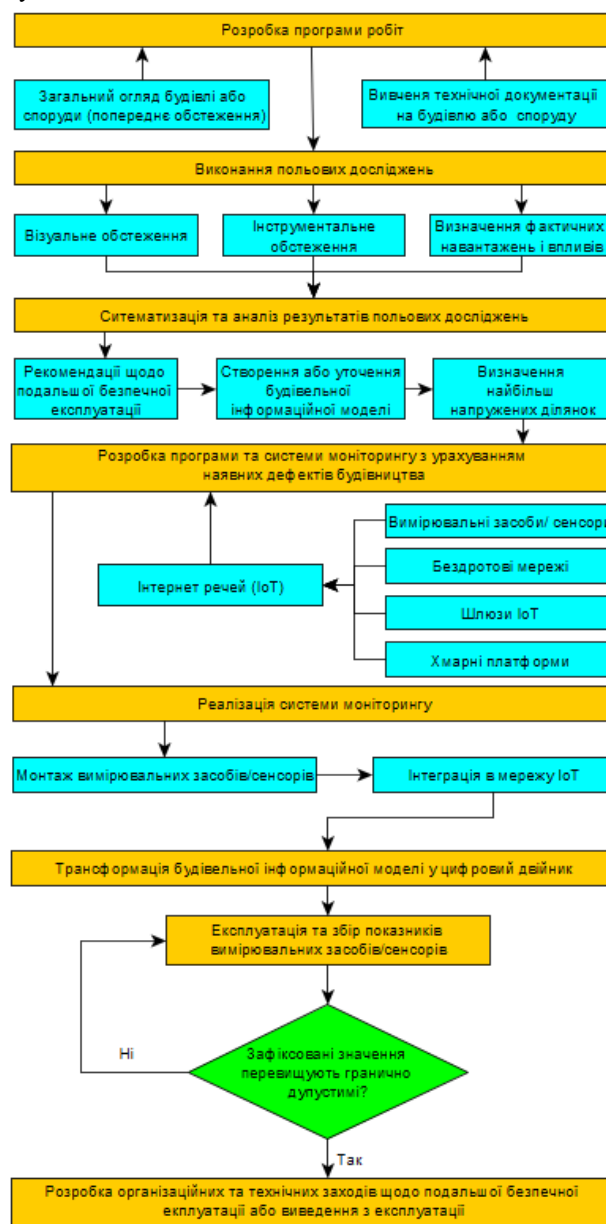


Рис. 2. Послідовність впровадження та експлуатації системи моніторингу технічного стану будівель та споруд, які експлуатуються

Основна відмінність при впровадженні системи моніторингу на етапі експлуатації будівлі або споруди полягає в значно більшому об'ємі підготовчих робіт, до яких входять:

- аналіз наявної технічної документації – детальне вивчення проєктної, виконавчої та експлуатаційної документації;
- попередній огляд будівлі або споруди виконується для загальної оцінки технічного стану, визначення потенційно небезпечних елементів і формування завдань для подальшого детального обстеження;
- розробка програми обстежень – формування плану дій із визначенням послідовності та методів обстеження, обсягу робіт і кількості інструментальних випробувань;
- польові роботи включають візуальне обстеження (фіксація дефектів і пошкоджень, попередній аналіз причин їх появи та уточнення переліку елементів для інструментальної перевірки) та інструментальне обстеження що базується на неруйнівних методах контролю;

- аналіз отриманих результатів – порівняння фактичні показники з нормативними та проєктними даними.

Всі підготовчі роботи, на території України, необхідно виконувати з дотриманням норм [11, 14]

На основі проведених робіт створюється або уточняється (за наявності) будівельна інформаційна модель та розробляється система моніторингу з урахуванням наявних дефектів будівництва. Наступним етапом є безпосереднє впровадження системи моніторингу – монтаж сенсорів та інтеграція в мережу IoT, створення тимчасових автоматизованих робочих місць при даній концепції не виконується.

З отриманням перших даних від сенсорів відбувається трансформація будівельної інформаційної моделі в цифрового двійника (рис. 3). Сучасна література чітко вказує, що будівельна інформаційна модель є невід'ємним фундаментом і стартовою точкою для створення цифрового двійника будівлі [12, 13]. Цифровий двійник – це динамічна віртуальна модель, яка підтримує зв'язок зі своїм фізичним аналогом.



Рис. 3. Трансформація будівельної інформаційної моделі в цифрового двійника

Ключові переваги використання цифрового двійника:

- візуалізація технічного стану конструкцій – дані від сенсорів можуть бути інтегровані безпосередньо в будівельну інформаційну модель у

реальному часі [15]. Це дозволяє візуалізувати зони з підвищеною деформацією, температурні аномалії, поширення тріщин або критичні значення вібрації.

- проведення віртуальних випробувань – можливість проводити віртуальні випробування з

урахуванням фактичного стану для прогнозування поведінки конструкції під різними навантаженнями: статичними, динамічними, кліматичними;

- моделювання поширення дефектів – при виявленні дефекту можливе прогнозування його поширення та вплив на загальну цілісність конструкції з часом, враховуючи дані реального часу та попередньо зафіксовані дані про деградацію матеріалів [16];

- оцінювання ефективності ремонтних робіт – можливість у віртуальному середовищі виконувати різні варіанти втручання (ремонт, посилення), щоб вибрати оптимальний із врахуванням витрат, часу, довговічності [17].

Технологія цифрового двійника є сучасним інструментом комплексного управління технічним станом будівель і споруд, споруджених із використанням технології 3D-друку та забезпечує інтеграцію даних, отриманих у процесі моніторингу, з аналітичними та прогнозними моделями. Це дозволяє в режимі реального часу оцінювати стан надрукованих конструкцій, відстежувати зміни їхніх фізико-механічних характеристик і прогнозувати можливі відхилення від проектних параметрів.

Крім зазначеного, застосування цифрового двійника сприяє підвищенню безпеки експлуатації, оптимізації технічного обслуговування, своєчасному виявленню дефектів і раціональному використанню матеріальних та енергетичних ресурсів.

Висновки

Запропоновано концептуальні підходи до моніторингу технічного стану будівель та споруд, споруджених за допомогою технології 3D-друку. Розглянуто особливості впровадження систем моніторингу на етапі будівництва та на етапі експлуатації.

В основі впровадження систем моніторингу лежить інтеграція будівельної інформаційної моделі з сенсорною системою збору показників, яка використовує технології ІоТ. Це дає змогу оперативно виявляти дефекти, контролювати відповідність фактичних параметрів проектним вимогам та прогнозувати строки безпечної експлуатації конструкцій. Також даний підхід забезпечує трансформацію будівельної інформаційної моделі в цифрового двійника.

Цифровий двійник дозволяє візуалізувати технічний стан, моделювати поширення дефектів, проводити віртуальні випробування й оцінювати ефективність ремонту. Це забезпечує ефективне управління життєвим циклом 3D-друкованих об'єктів, підвищуючи їхню безпеку та оптимізуючи використання ресурсів.

Література

1. Ngo, T. D. Kashani, A. Imbalzano, G. Nguyen, K. T., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196. 2018. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012> (дата звернення: 17.09.2025)
2. Roussel N. Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research*, 112, 76-85. 2018 URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.005> (дата звернення: 17.09.2025)
3. Wolfs R. J. M., Bos F. P., Salet T. A. M. Hardening and bond strength of 3D printed concrete: influence of the time interval between the successive layers. *Cement and Concrete Research*, 114, 134-143. 2018. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017> (дата звернення: 19.09.2025)
4. Ye XW, Su YH, Han JP. Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: a comprehensive review. *ScientificWorldJournal*. 2014:652329. 2014. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/652329> (дата звернення: 19.09.2025)
5. Bhalla S., Soh C. K. Structural health monitoring by piezo-impedance transducers. *Engineering Structures*, 26(13), 1947-1959. 2004. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(2004\)17:4\(154\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(2004)17:4(154)) (дата звернення: 19.09.2025)
6. Han B., Yu X. Ou J. *Smart and Multifunctional Concrete Toward a Sustainable Future*. Springer. P. 81–116. 2015
7. Wang L., Aslani F., Mukherjee A. Development of 3D printable self-sensing cementitious composites, *Construction and Building Materials*, Volume 337. 127601. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127601> (дата звернення: 21.09.2025)
8. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M., Correlation between destructive compression tests and non-destructive ultrasonic measurements on early age 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, 181, 2018. P 447-454. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.060> (дата звернення: 22.09.2025)
9. Gene S., Hojjat A. Infrared thermography for detecting defects in concrete structures. *Journal of civil engineering and management*. 24 2018. P. 508-515. URL: <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.6186> (дата звернення: 22.09.2025).
10. Lu Deng, Hui Zuo, Wei Wang, Chao Xiang, Honghu Chu. Internal Defect Detection of Structures Based on Infrared Thermography and Deep Learning. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 27. 2023. P 1136-1149. URL: <https://doi.org/10.1007/s12205-023-0391-7> (дата звернення: 23.09.2025).
11. ДСТУ 9273:2024 *Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їх технічного стану. Механічний опір та стійкість*. Київ: ДП УкрНДНЦ, 2024. 74 с.
12. Omrany H., Al-Obaidi K. M., Husain A., Ghaffarianhoseini A. Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review of Current Implementations, Enabling Technologies, and Future Directions. *Sustainability*, 15(14), 10908. 2023. URL: <https://doi.org/10.3390/su151410908> (дата звернення: 29.09.2025)
13. Wang, Y., Aslani F., Dyskin A., Pasterna E. Digital Twin Applications in 3D Concrete Printing. *Sustainability* 15, 2124. 2023. URL: <https://doi.org/10.3390/su15032124> (дата звернення: 29.09.2025)

14. DSTU B V.2.6-210:2016. Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються. Київ: Мінрегіон України, 2017. 71 с.
15. Chiachio M., Megia M., Chiachio J., Fernandez J., Jalón M. L., Structural digital twin framework: Formulation and technology integration. *Automation in Construction*, Volume 140, 104333. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104333> (дата звернення: 09.10.2025)
16. Torzoni M., Tezzele M., Mariani S., Manzoni A., Willcox Karen E., A digital twin framework for civil engineering structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Volume 418, Part B, 116584. 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116584> (дата звернення: 09.10.2025)
17. Saback V, Popescu C, Blanksvärd T, Täljsten B. Analysis of Digital Twins in the Construction Industry: Practical Applications, Purpose, and Parallel with other Industries. *Buildings*. 14(5):1361. 2024. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14051361> (дата звернення: 09.10.2025)

References

1. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196. 2018. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012> (дата звернення: 17.09.2025)
2. Roussel, N. Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research*, 112, 76-85. 2018 URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.005> (дата звернення: 17.09.2025)
3. Wolfs, R. J. M., Bos, F. P., & Salet, T. A. M. Hardening and bond strength of 3D printed concrete: influence of the time interval between the successive layers. *Cement and Concrete Research*, 114, 134-143. 2018. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017> (дата звернення: 17.09.2025)
4. Ye XW, Su YH, Han JP. Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: a comprehensive review. *ScientificWorldJournal*. 2014:652329. 2014. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/652329> (дата звернення: 17.09.2025)
5. Bhalla, S., & Soh, C. K. Structural health monitoring by piezo-impedance transducers. *Engineering Structures*, 26(13), 1947-1959. 2004. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(2004\)17:4\(154\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(2004)17:4(154)) (дата звернення: 17.09.2025)
6. Han, B., Yu, X., & Ou, J. *Smart and Multifunctional Concrete Toward a Sustainable Future*. Springer. P. 81-116. 2015
7. Lining Wang, Farhad Aslani, Abhijit Mukherjee, Development of 3D printable self-sensing cementitious composites, *Construction and Building Materials*, Volume 337, 127601. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127601> (дата звернення: 17.09.2025)
8. R.J.M. Wolfs, F.P. Bos, T.A.M. Salet, Correlation between destructive compression tests and non-destructive ultrasonic measurements on early age 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, 181, 2018. P. 447-454. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.060> (дата звернення: 17.09.2025)
9. Gene S., Hojjat A. Infrared thermography for detecting defects in concrete structures. *Journal of civil engineering and management*. 24 2018. P. 508-515. URL:

- <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.6186> (дата звернення: 17.09.2025).
10. Lu Deng, Hui Zuo, Wei Wang, Chao Xiang, Honghu Chu. Internal Defect Detection of Structures Based on Infrared Thermography and Deep Learning. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 27. 2023. P. 1136-1149. URL: <https://doi.org/10.1007/s12205-023-0391-7> (дата звернення: 17.09.2025).
11. DSTU 9273:2024 Nastanova shchodo obstezhennia budivel i sporud dlia vyznachennia ta otsiniuvannia yikh tekhnichnoho stanu. *Mekhanichniy opir ta stiikist*. Kyiv: DP UkrNDNTs, 2024. 74 s.
12. Omrany, H., Al-Obaidi, K. M., Husain, A., & Ghaffarianhoseini, A. (2023). Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review of Current Implementations, Enabling Technologies, and Future Directions. *Sustainability*, 15(14), 10908. URL: <https://doi.org/10.3390/su151410908> (дата звернення: 17.09.2025)
13. Wang, Y.; Aslani, F.; Dyskin, A.; Pasternak, E. Digital Twin Applications in 3D Concrete Printing. *Sustainability* 15, 2124. 2023. URL: <https://doi.org/10.3390/su15032124> (дата звернення: 17.09.2025)
14. DSTU B V.2.6-210:2016. Otsinka tekhnichnoho stanu stalevykh budivelnykh konstruksii, shcho ekspluatuiutsia. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2017. 71 s.
15. Torzoni M., Tezzele M., Mariani S., Manzoni A., Willcox Karen E., A digital twin framework for civil engineering structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Volume 418, Part B, 116584. 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116584> (дата звернення: 09.10.2025)
16. Chiachio M., Megia M., Chiachio J., Fernandez J., Jalón M. L., Structural digital twin framework: Formulation and technology integration. *Automation in Construction*, Volume 140, 104333. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104333> (дата звернення: 09.10.2025)
17. Saback V, Popescu C, Blanksvärd T, Täljsten B. Analysis of Digital Twins in the Construction Industry: Practical Applications, Purpose, and Parallel with other Industries. *Buildings*. 14(5):1361. 2024. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14051361> (дата звернення: 09.10.2025)

Автор: БОГАЧЕНКО Сергій Вікторович

доктор філософії, старший науковий співробітник кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій,

Serhii BOHACHENKO,

PhD (Tech), Senior Research of the Department of reinforced concrete and masonry structures, Ukrainian State University of Science and Technologies E-mail - bohachenko.serhii@pdaba.edu.ua ID ORCID: 0000-0002-1697-2547

Автор: ТИТЮК Анатолій Олександрович

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій

Anatolii TYTIUK,

PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor Department of reinforced concrete and masonry

structures,
Ukrainian State University of Science and Technologies
E-mail - anatol.tytiuk@pdaba.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4927-370X>

Автор: РАДКЕВИЧ Анатолій Валентинович
доктор технічних наук, професор, професор
кафедри будівельного виробництва та геодезії,
Український державний університет науки і
технологій
Anatolii RADKEVYCH,
Dr. Sc. (Tech.), Professor, Professor of the Department
of Construction Operation and Geodesy,
Ukrainian State University of Science and Technologies
E-mail - anatolij.radkevich@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6325-8517>

Автор: САВИЦЬКИЙ Олександр Миколайович
кандидат технічних наук, старший науковий
співробітник кафедри залізобетонних та кам'яних
конструкцій,
Український державний університет науки і

технологій,
Oleksandr SAVYTSKYI,
PhD (Tech), Research Officer of the Department of
reinforced concrete and masonry structures,
Ukrainian State University of Science and Technologies
E-mail - san.stroitel@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7032-295X>

Автор: СМІРНОВ Антон Сергійович
доктор філософії, науковий співробітник
Лабораторії досліджень атомних та теплових
електростанцій,
Український державний університет науки і
технологій
Anton SMYRNOV,
PhD (Tech), Research of the Thermal and Nuclear
Power Plants Research Laboratory,
Ukrainian State University of Science and Technologies
E-mail - smyrnov.anton@pdaba.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2500-2323>

STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF 3D-PRINTED STRUCTURES

S. Bohachenko, A. Tytiuk, A. Radkevych, O. Savytskyi, A. Smyrnov

Ukrainian State University of Science and Technologies

The article examines modern approaches to the structural health monitoring of buildings and structures constructed using 3D printing technology. Special attention is paid to the conceptual approaches for implementing monitoring systems based on the internet of things, which allows for continuous data collection both at the new construction stage and during the facilities' operation. This approach provides the opportunity to promptly detect defects and damage, control the compliance of actual parameters with design requirements, and forecast the safe operational life of structures. The concepts considered also involve the transformation of the building information model into a digital twin, which in turn enables the visualization of the technical condition, modeling the propagation of defects, conducting virtual testing, and evaluating the effectiveness of repairs. The proposed approaches create the foundation for the intelligent management of modern construction.

Keywords: diagnostics, structural health monitoring, 3D printing, Internet of Things

Стаття отримана: 30.10.2025

Стаття опублікована: 19.12.2025

Стаття пройшла рецензування: 19.11.2025