

## **ЦИФРОВА РЕКОНСТРУКЦІЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОШКОДЖЕНИХ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ ДАНИХ ЗД-СКАНУВАННЯ: КОНЦЕПЦІЯ «ГЕОМЕТРІЯ + ВЛАСТИВОСТІ»**

**Анотація.** *Актуальність.* Масштабні руйнування інфраструктури в Україні та необхідність оцінки залишкового ресурсу будівель вимагають нових підходів до діагностики, що поєднують швидкість ЗД-сканування з глибиною матеріалознавчого аналізу. Класичні методи обстеження не забезпечують суцільної картини розподілу деградації матеріалів у конструкції. *Мета.* Розробити концептуальні засади методики цифрової реконструкції, що базується на інтеграції геометричних даних ЗД-сканування з алгоритмами прогнозування локальних фізико-механічних властивостей матеріалів (міцності, модуля пружності) для створення достовірних розрахункових моделей. *Методика.* Застосовано методи системного аналізу дефектів будівельних матеріалів, аналітичний огляд методів неруйнівного контролю та комп'ютерного моделювання. Запропоновано підхід до кореляції візуальних та геометричних ознак пошкоджень, отриманих із хмар точок, зі змінами мікроструктури та макромеханічних характеристик бетону та арматури. *Результати.* Визначено чотири ключові групи дефектів, що ідентифікуються методами ЗД-сканування, та встановлено їх зв'язок із деградацією властивостей матеріалів. Обґрунтовано концепцію «Геометрія + Властивості», яка передбачає картування полів пошкоджень (тріщин, термічної деструкції) безпосередньо на скінченно-елементну сітку. Проаналізовано можливості інтеграції програмних комплексів для обробки геометрії (CloudCompare, Revit) із системами інженерного аналізу (ANSYS, LIRA-SAPR) через вокселізацію та параметричне моделювання. *Висновки.* Запропонована методика дозволяє перейти від візуальної фіксації руйнувань до автоматизованого прогнозування залишкової несучої здатності, враховуючи неоднорідність властивостей матеріалів у пошкоджених зонах.

**Ключові слова:** цифрова реконструкція, ЗД-сканування, фізико-механічні властивості, деградація бетону, корозія, FEM-моделювання, матеріал.

**Посилання для цитування:** Пімахов М. В. Цифрова реконструкція та прогнозування фізико-механічних властивостей пошкоджених будівель на

© М. В. Пімахов, 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією [CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk)

основі даних 3D-сканування: концепція «геометрія + властивості». *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2026. Вип. 40. С. 237-245. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-015>

## **Вступ**

Відновлення інфраструктури України в умовах післявоєнного періоду вимагає вирішення складних інженерних задач, пов'язаних з оцінкою залишкового ресурсу конструкцій, що зазнали впливу екстремальних навантажень: ударних хвиль, високотемпературного нагріву (пожеж), вібрацій та корозійного середовища. Ключовою проблемою є те, що матеріал конструкцій (бетон, сталь, цегла) у пошкоджених будівлях стає неоднорідним. Наприклад, в одній частині колони бетон може зберігати проектну міцність, а в іншій – втратити її на 50–70% через мікротріщини або дегідратацію цементного каменю [1].

Сучасні методи 3D-сканування (лазерне сканування, фотограмметрія) дозволяють отримати високоточну геометричну копію об'єкта. Однак для матеріалознавця та конструктора інформація про геометрію сама по собі є недостатньою. Необхідно знати, як змінилися фізико-механічні властивості матеріалу в кожній точці цієї конструкції або будівлі. Існуючий розрив між геометричним моделюванням (CAD/BIM) та фізичним моделюванням матеріалів (CAE) ускладнює точний розрахунок надійності.

У цій статті пропонується концепція поєднання аналізу геометрії з прогнозуванням змінених властивостей матеріалів, що дозволить створити цифрові моделі нового рівня достовірності.

## **Мета роботи**

Розробити концептуальні засади методики цифрової реконструкції, що базується на інтеграції геометричних даних 3D-сканування з алгоритмами прогнозування локальних фізико-механічних властивостей матеріалів (міцності, модуля пружності) для створення достовірних розрахункових моделей.

## **Методика досліджень**

Застосовано методи системного аналізу дефектів будівельних матеріалів, аналітичний огляд методів неруйнівного контролю та комп'ютерного моделювання. Запропоновано підхід до кореляції візуальних та геометричних ознак пошкоджень, отриманих із хмар точок, зі змінами мікроструктури та макромеханічних характеристик бетону та арматури.

## **Результати дослідження**

Взаємозв'язок дефектів, що фіксуються скануванням, зі зміною властивостей матеріалів ґрунтується на гіпотезі про існування кореляції

між зовнішніми геометричними та візуальними ознаками, зафіксованими у цифровій «хмарі точок», та внутрішніми структурними змінами та властивостями матеріалу. Для вивчення цього зв'язку виділяються чотири групи дефектів, де така кореляція є найбільш вираженою.

Першою з таких груп є геометричні деформації та напружено-деформований стан. Лазерне сканування дозволяє фіксувати прогини балок, плит перекриття та відхилення колон від вертикалі з точністю до міліметрів. З точки зору механіки матеріалів, наявність залишкових пластичних деформацій є надійним свідченням того, що матеріал у відповідній зоні конструкції перейшов межу пружності. У матеріалознавчому аспекті це означає, що в зонах формування пластичних шарнірів залізобетону відбувається незворотне розкриття мікротріщин та деструкція стиснутої зони бетону. Ці процеси призводять до локального зниження модуля пружності ( $E$ ) та зміни характеру діаграми деформування « $\sigma$ - $\epsilon$ ». На основі цих даних формується прогноз: використовуючи точні дані про кривизну зігнутого елемента, отримані з 3D-скану, можна зворотним шляхом розрахувати діючі напруження та оцінити ступінь деградації жорсткості перерізу [2].

Другою критично важливою групою дефектів є тріщиноутворення та деградація суцільності. Тріщини, як фізичні розриви суцільності матеріалу, ефективно фіксуються сучасними сканерами та методами фотограмметрії, здатними виявляти їх за шириною розкриття всього від 0,1 – 0,3 мм. У матеріалознавчому аспекті ширина та густина тріщин прямо корелюють зі зниженням ефективної площі робочого перерізу та міцності матеріалу на розтяг ( $R_{br}$ ). Крім безпосереднього механічного послаблення (рис. 1), наявність тріщин створює шляхи для проникнення вологи та агресивних середовищ, що прискорює карбонізацію бетону та забезпечує доступ кисню до арматури, ініціюючи корозійні процеси. На основі цих спостережень створюється прогноз: детальне картування сітки тріщин на поверхні дозволяє застосувати принципи механіки руйнування (Fracture Mechanics) для корекції тензора жорсткості матеріалу в скінченно-елементній моделі, що значно підвищує адекватність чисельного аналізу несучої здатності пошкодженої конструкції.

Третя група дефектів – це локальні руйнування конструкцій, такі як відколи захисного шару бетону або вибоїни (каверни), мають чітку маніфестацію у даних 3D-сканування, де вони детектуються як характерні порожнечі в об'ємній хмарі точок. З матеріалознавчої точки зору, крім прямого геометричного зменшення ефективної площі робочого перерізу, такі пошкодження зазвичай супроводжуються утворенням розширеної «зони впливу», що проникає вглиб матеріалу.

У цій зоні, часто викликаній ударними динамічними навантаженнями (наприклад, від уламків снарядів або вибухової хвилі), формуються скупчення мікротріщин, що додатково послаблюють структуру. На основі таких спостережень формується прогноз: автоматизований аналіз сканування, що дозволяє точно розрахувати обсяг втраченого матеріалу, може бути використаний для прямого коригування ключових геометричних характеристик перерізу, таких як площа ( $A$ ) та момент інерції ( $I$ ), у відповідній розрахунковій схемі конструкції, що забезпечує більш реалістичну оцінку її несучої здатності.

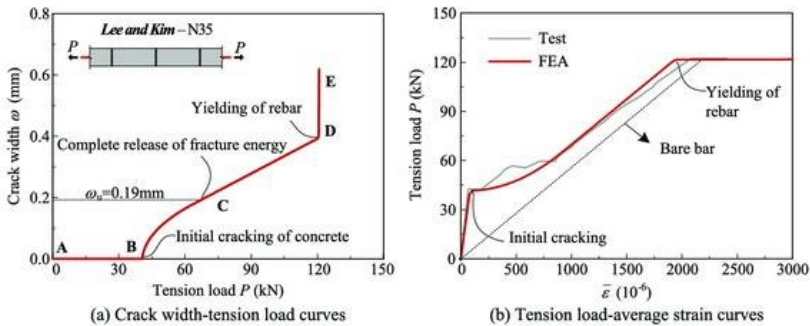


Рисунок 1 – Приклад прогнозування ширини тріщини для залізобетонних конструкцій [3]

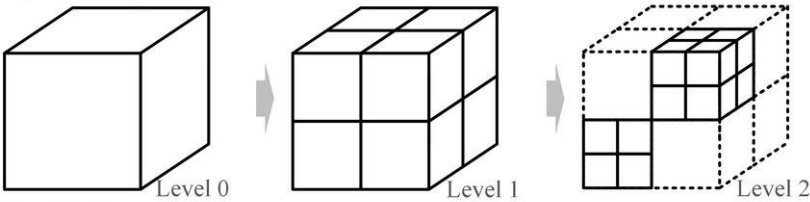
Окремою, найбільш складною для діагностики групою дефектів є зміни структури матеріалу, викликані інтенсивним термічним впливом, зокрема під час пожежі. Під дією високих температур бетон зазнає видимих змін кольору – від рожевого відтінку через сірий до білуватого, що відображає глибокі хімічні перетворення, такі як зневоднення гідроксиду кальцію та розклад мінеральних заповнювачів. У матеріалознавчому аспекті існує чітка емпірична кореляція між температурою нагріву, характерною зміною кольору поверхні бетону та різким зниженням його залишкової міцності на стиск ( $R_b$ ). Наприклад, нагрівання понад  $500^\circ\text{C}$  може призвести до втрати понад 50% початкової міцності. На основі цього зв'язку формується практичний прогноз: із застосуванням комбінованого аналізу даних хмари точок, а саме інформації про колір (значення RGB) та інтенсивність відбиття лазерного променя (параметр Intensity), можна провести об'єктивне зонування конструкції за ступенем термічного пошкодження. Кожній визначеній зоні можна програмно призначити індивідуально знижені розрахункові характеристики міцності та модуля пружності, що є критично важливим для точної оцінки залишкового ресурсу будівлі після пожежі.

Концепція інтеграції програмних засобів «Геометрія + Властивості» орієнтована на створення наскрізного ланцюжка передачі даних між програмними комплексами, які працюють з геометричним представленням об'єкта, та системами, що займаються розрахунком його інженерних властивостей.

Реалізація цього підходу починається з етапу аналізу геометрії та дефектів, який також відомий як Scan-to-Mesh. На цьому етапі використовуються спеціалізовані програми для обробки хмар точок, такі як CloudCompare, Leica Cyclone або RealityCapture. Основні завдання цього етапу включають очищення даних від шумів, класифікацію поверхонь та найважливіше – сегментацію дефектів. Для цього можуть застосовуватися алгоритми машинного навчання (ML), здатні автоматично ідентифікувати та виділяти на хмарі точок зони з аномальною геометричною шорсткістю, що свідчить про механічні пошкодження, або зони зі специфічним спектральним відгуком (кольором), який є ознакою термічного впливу (пожежі) чи корозії [4]. Результатом успішної обробки стає полігональна сіткова модель (Mesh), у якій кожному елементарному полігону присвоєно специфічний атрибут, що класифікує тип виявленого дефекту (наприклад, «Тріщина», «Відкол», «Пошкодження від пожежі 2 рівня»).

Наступним та ключовим етапом концепції є матеріалознавче картування (Property Mapping), мета якого – перетворити описові атрибути дефектів на кількісні фізико-механічні характеристики матеріалу. Основним інструментом тут є використання воксельної моделі (Voxel Grid). Суть підходу полягає в перетворенні детальної хмари точок або полігональної сітки в об'ємну регулярну сітку, що складається з елементарних кубічних осередків – вокселів (рис. 2). Ключова ідея полягає в тому, що властивості матеріалу  $P$ , такі як міцність на стиск або модуль пружності, у кожному конкретному вокселі визначаються як функція від набору параметрів, зафіксованих при скануванні  $S$ . Ці параметри включають геометричні відхилення ( $S_{geometry}$ ), спектральні характеристики кольору ( $S_{color}$ ) та інтенсивність відбиття лазерного променя ( $S_{intensity}$ ). Таким чином, формується залежність:  $P_i = f(S_{geometry}, S_{color}, S_{intensity})$ . Наприклад, для зони, пошкодженої вогнем, розрахункова залишкова міцність бетону ( $R_{b,residual}$ ) може бути визначена як добуток початкової міцності ( $R_{b,initial}$ ) на коефіцієнт  $k_{temp}$ , який, у свою чергу, виводиться на основі колориметричного аналізу даних хмари точок для даної області. Цей підхід дозволяє створювати просторово-неоднорідну цифрову модель матеріалу, де кожна її точка має власні, обґрунтовані експериментальними кореляціями, механічні властивості.

## Space decomposition



## Voxelization

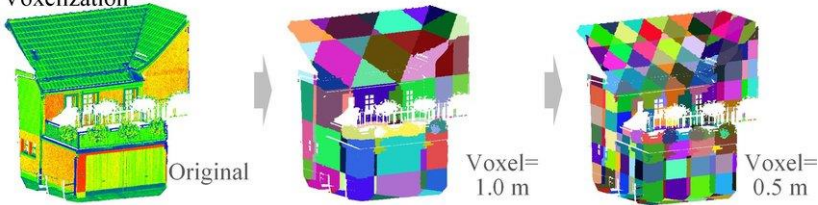


Рисунок 2 – Узагальнена схема реконструкції будівель та інфраструктури з хмар точок (огляд підходів) [5]

Третім етапом реалізації концепції є експорт сформованої моделі з просторово розподіленими властивостями матеріалу у професійне середовище для скінченно-елементного аналізу (CAE/FEM), таке як ANSYS, ABAQUS, LIRA-SAPR або SCAD. Однак на цьому шляху виникає технічна проблема, пов'язана з тим, що стандартні формати обміну будівельною інформацією (наприклад, IFC) погано пристосовані для передачі даних про неоднорідність властивостей матеріалів всередині конструкції, оскільки традиційно розрахункові моделі оперують однорідними об'єктами. Для подолання цього обмеження пропонується рішення у вигляді використання спеціальних скриптів, які створюються на базі візуальних середовищ програмування, таких як Dynamo для платформи Revit або Grasshopper для Rhino. Ці скрипти працюють як посередники, здатні транслювати точні геометричні координати вокселів разом із прив'язаними до них фізико-механічними параметрами безпосередньо у відповідні вузли скінченно-елементної сітки в розрахунковому комплексі. Такий підхід принципово змінює логіку аналізу, дозволяючи виконувати розрахунок несучої здатності конструкції не як однорідного ізотропного тіла, а як гетерогенної системи, що враховує локальне ослаблення матеріалу в зонах виявлених дефектів, що забезпечує значно вищу адекватність результатів моделювання [6].

Перспективи подальшого розвитку та застосування запропонованої методики безпосередньо пов'язані з інтеграцією штучного інтелекту (ШІ). Поєднання матеріалознавчих фізичних моделей з потужними

інструментами машинного навчання відкриває шлях до повної автоматизації всього процесу оцінки. Особливо перспективним вважається навчання глибоких нейронних мереж на великих масивах парних даних, що складаються з лабораторних результатів механічних випробувань кернів, відібраних безпосередньо з пошкоджених конструкцій, та відповідних цим зонам тривимірних сканів. Такий набір даних дозволить створити комплексну модель типу «End-to-End» (від початку до кінця), де на вхід системи буде подаватися «сиря» хмара точок, отримана з лазерного сканера, а на виході буде автоматично генеруватися детальна карта розподілу залишкової міцності або інших властивостей по всій конструкції. Це дозволить повністю усунути етап ручного налаштування емпіричних залежностей та інтерпретації дефектів, зробивши процес оцінки технічного стану швидшим, об'єктивнішим і масштабованим.

### **Висновки**

1. Розроблена концепція «Геометрія + Властивості», яка поєднує аналіз геометрії з прогнозуванням змінених властивостей матеріалів. Це дозволить створити цифрові моделі нового рівня достовірності, що є критично необхідним для коректної оцінки пошкоджених будівель.

2. Встановлено, що дані лазерного сканування (геометрія, інтенсивність, колір) містять непряму інформацію про фізико-механічний стан матеріалів. Аналіз кольору дозволяє оцінити ступінь температурної деструкції бетону, а аналіз мікрогеометрії поверхні – виявити корозію та тріщиноутворення.

3. Застосування воксельних моделей дозволяє трансформувати ці дані в просторово-розподілену карту механічних властивостей (міцність, модуль пружності). Це забезпечує перехід від усереднених розрахунків до моделювання реальної гетерогенної структури пошкодженого матеріалу, що підвищує точність оцінки залишкового ресурсу конструкцій.

### **Перелік посилань**

1. Клименко В.З., Белов І.Д. Випробування конструкцій, обстеження та моніторинг будівель і споруд: підручник. Київ: Кондор, 2015. URL: [https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2022/Klimenko\\_2015\\_572.pdf](https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2022/Klimenko_2015_572.pdf)

2. Mengiste E., Garcia de Soto B., Hartmann T. Automated integration of as-is point cloud information with as-planned BIM for interior construction. *International Journal of Construction Management*, 2023. <https://doi.org/10.1080/15623599.2023.2211487>

3. Yu X., Shi C., Wei J., Duan L. Whole-process crack width prediction of reinforced concrete structures considering bonding deterioration. *Engineering Structures*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.060>.

4. Zonouz S.M., Badarne D., Yu H. 3D vision-based structural masonry damage

detection. arXiv:2308.16380, 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.16380>

5. Xu Y., Stilla U. Toward Building and Civil Infrastructure Reconstruction From Point Clouds: A Review on Data and Key Techniques. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (JSTARS)*, 2021. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3060568>.

6. Jia J., Gao J., Wang W., Ma L., Li J., Zhang Z. An Automatic Generation Method of Finite Element Model Based on BIM and Ontology. *Buildings*, 2022, 12(11), 1949. <https://doi.org/10.3390/buildings12111949>

## References

1. Klimenko, V. Z., & Bielov, I. D. (2015). *Vyprobuvannia konstruksii, obstezhennia ta monitorynh budivel i sporud*. Kondor. Available from: [https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2022/Klimenko\\_2015\\_572.pdf](https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2022/Klimenko_2015_572.pdf)

2. Mengiste, E., Garcia de Soto, B., & Hartmann, T. (2023). Automated integration of as-is point cloud information with as-planned BIM for interior construction. *International Journal of Construction Management*, <https://doi.org/10.1080/15623599.2023.2211487>

3. Yu, X., Shi, C., Wei, J., & Duan, L. (2017). Whole-process crack width prediction of reinforced concrete structures considering bonding deterioration. *Engineering Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.060>.

4. Zonouz, S. M., Badarne, D., & Yu, H. (2023). 3D vision-based structural masonry damage detection. arXiv:2308.16380. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.16380>

5. Xu, Y., & Stilla, U. (2021). Toward Building and Civil Infrastructure Reconstruction From Point Clouds: A Review on Data and Key Techniques. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (JSTARS)*. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3060568>.

6. Jia, J., Gao, J., Wang, W., Ma, L., Li, J., & Zhang, Z. (2022) An Automatic Generation Method of Finite Element Model Based on BIM and Ontology. *Buildings*, 12(11), 1949. <https://doi.org/10.3390/buildings12111949>

**M. V. Pimakhov**<sup>1,\*</sup>, Ph. D. Student, ORCID 0009-0004-1984-5676

<sup>1</sup> *Dnipro University of Technology*

\* *Corresponding author: Pimakhov.M.V@nmu.one*

## DIGITAL RECONSTRUCTION AND PREDICTION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF DAMAGED BUILDINGS BASED ON 3D SCANNING DATA: THE "GEOMETRY + PROPERTIES" CONCEPT

**Abstract.** *Relevance.* Large-scale destruction of infrastructure in Ukraine and the need to assess the residual resource of buildings require new approaches to diagnostics that combine the speed of 3D scanning with the depth of material science analysis. Classical examination methods do not provide a complete picture of the distribution of material degradation in the structure. *Purpose.* To develop conceptual principles of a digital reconstruction methodology based on the integration of geometric data of 3D

scanning with algorithms for predicting local physical and mechanical properties of materials (strength, elastic modulus) to create reliable computational models. *Methodology.* Methods of systemic analysis of defects in building materials, analytical review of non-destructive testing methods and computer modeling were applied. An approach to the correlation of visual and geometric signs of damage obtained from point clouds with changes in the microstructure and macromechanical characteristics of concrete and reinforcement was proposed. *Results.* Four key groups of defects identified by 3D scanning methods were determined, and their relationship with the degradation of material properties was established. The concept of "Geometry + Properties" was substantiated, which involves mapping damage fields (cracks, thermal destruction) directly onto a finite element mesh. The possibilities of integrating software packages for geometry processing (CloudCompare, Revit) with engineering analysis systems (ANSYS, LIRA-SAPR) through voxelization and parametric modeling are analyzed. *Conclusions.* The proposed method allows moving from visual fixation of damage to automated prediction of residual bearing capacity, taking into account the heterogeneity of material properties in damaged areas.

**Key words:** digital reconstruction, 3D scanning, physical and mechanical properties, concrete degradation, corrosion, FEM modeling, material.

**For citation:** Pimakhov, M. V. (2026). Digital reconstruction and prediction of physical and mechanical properties of damaged buildings based on 3D scanning data: the "geometry + properties" concept. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 40. 237-245. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-015>

*Рукопис надійшов до редакції / Received 18.02.2026*

*Рекомендовано до друку / Accepted 28.05.2026*

*Опубліковано / Published 30.05.2026*