

УДК 691.32:620.193

ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КОМПОЗИТНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Канд. техн. наук С. Л. Андрух, д-р техн. наук В. П. Сопов

PREDICTION OF DURABILITY OF COMPOSITE BUILDING MATERIALS

PhD (Tech.) S. Andrukh, Dr. Sc. (Tech.) V. Sopov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362493>



Анотація. У статті розглянуто теоретичні та практичні питання прогнозування довговічності композитних будівельних матеріалів, які широко використовують у сучасному цивільному та промисловому будівництві. Обґрунтовано важливість забезпечення тривалого терміну експлуатації композитів з урахуванням дії кліматичних, фізико-хімічних та експлуатаційних чинників. Проаналізовано сучасні підходи щодо оцінювання процесів деградації в цементних, полімерцементних і фібробетонних матеріалах. Запропоновано метод прогнозування довговічності, що базований на комплексному врахуванні параметрів структури матеріалу, його механічних характеристик і закономірностей розвитку пошкоджень. Подано результати експериментальних досліджень і математичного моделювання, які підтверджують ефективність запропонованого підходу. Отримані результати можуть бути використані під час проектування будівельних конструкцій із заданим терміном служби.

Ключові слова: композитні матеріали, довговічність, деградація, фібробетон, прогнозування, моделювання.

Abstract. The paper deals with scientific and practical aspects of durability prediction of composite building materials used in modern civil and industrial construction. The relevance of durability assessment for composite materials under the influence of climatic, physicochemical, and operational factors is substantiated. Particular attention is paid to cement-based, polymer-modified, and fiber-reinforced composites, which are increasingly applied in load-bearing and enclosing structures. Modern approaches to evaluating degradation processes, including microstructural damage accumulation, loss of mechanical properties, and environmental interactions, are analyzed. A comprehensive durability prediction methodology is proposed, based on the integration of structural parameters, mechanical performance indicators, and damage kinetics models. The methodology combines experimental testing results with mathematical modeling, allowing for the estimation of residual service life under various exposure conditions. Experimental data obtained from accelerated aging tests and mechanical loading confirm the adequacy and reliability of the proposed approach. The results demonstrate good agreement with existing international studies while providing improved adaptability to specific material compositions and operating environments. The proposed method can be effectively applied in the design and assessment of composite building structures with predefined service life requirements, contributing to increased reliability, safety, and sustainability of construction projects.

Keywords: composite materials, durability, degradation, fiber-reinforced concrete, prediction, modeling.

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Андрух С. Л., Сопов В. П., 2026.

Вступ. Дослідження, наведені в цій роботі, належать до галузі будівельного матеріалознавства і спрямовані на вирішення актуального завдання прогнозування довговічності композитних будівельних матеріалів. У сучасному будівництві композитні матеріали, зокрема фібробетони, полімермодифіковані бетони та високоміцні цементні композиції, застосовують все частіше.

Водночас умови експлуатації конструкцій постійно ускладнюються, що призводить до активізації процесів деградації матеріалів. Вплив змін температури, вологості, механічних навантажень і агресивних середовищ спричиняє поступове накопичення пошкоджень, що може знижувати міцність і довговічність конструкцій.

Прогнозування довговічності є одним із основних чинників забезпечення надійності та безпечної експлуатації будівель і споруд [1, 2]. Недостатньо точне оцінювання процесів деградації може призвести до передчасної втрати працездатності конструкцій, збільшення витрат на їх ремонт і скорочення терміну служби [3]. Саме тому розроблення науково обґрунтованих методів прогнозування довговічності є важливим завданням сучасної будівельної науки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні наукові дослідження свідчать, що довговічність композитних матеріалів значною мірою визначена впливом зовнішніх чинників, основними є температурні коливання, вологісні впливи, хімічна корозія та циклічні навантаження [4-6]. У ряді досліджень [7, 8] встановлено, що розвиток мікротріщин і накопичення пошкоджень пов'язані зі структурою матеріалу, характеристиками армування та властивостями матриці.

Окремі дослідження показали, що використання дисперсного армування допомагає підвищити тріщиностійкість матеріалу та зменшити швидкість його деградації. Також встановлено, що

застосування полімерних добавок підвищує стійкість матеріалу до впливу агресивних середовищ.

Інші автори пропонують використувати методи цифрової томографії та акустичної емісії для відстеження зародження мікротріщин і побудови кінетичних моделей пошкоджуваності [11, 12]. Дослідження, присвячені полімермодифікованим системам, підкреслюють роль хімічної стабільності полімерних добавок і їхньої взаємодії з агресивними середовищами, що також впливає на прогнозований термін служби матеріалу [13]. У роботах, орієнтованих на фібробетони, особливу увагу приділено впливу типу волокон, їхньої дисперсності та адгезії до матриці на розвиток тріщин і залишкову міцність [14, 15].

Вітчизняні дослідники [16, 17] зосереджені переважно на експериментальному визначенні показників морозостійкості та корозійної стійкості, однак питання комплексного прогнозування залишкового ресурсу матеріалів залишається недостатньо опрацьованим. Отже, існує потреба розроблення інтегрованих моделей, що поєднують експериментальні дані з математичним описом деградаційних процесів і допомагають урахувувати багатофакторний характер впливу експлуатаційних умов.

Визначення мети та завдань дослідження. Метою роботи є розроблення методики прогнозування довговічності композитних матеріалів на основі експериментальних даних і математичного моделювання.

Для досягнення поставленої мети було вирішено такі завдання:

- дослідити механізми деградації композитних матеріалів;
- розробити модель прогнозування довговічності;
- провести експериментальні дослідження властивостей матеріалів;
- оцінити точність запропонованої моделі.

Методика експериментальних досліджень. Об'єктами дослідження вибрано цементні та полімерцементні композити з дисперсним армуванням сталевими і поліпропіленовими волокнами. Дослідні зразки виготовляли у формі кубів із номінальними розмірами $100 \times 100 \times 100$ мм і призм $100 \times 100 \times 400$ мм. Об'ємний вміст волокон – 0,5-1,5 %.

Експериментальні дослідження виконували в три послідовні етапи:

1. Визначення початкових фізико-механічних характеристик композитних матеріалів у віці 28 діб.

2. Прискорене кліматичне старіння зразків за умов комбінованої дії температурно-вологісних впливів.

3. Оцінювання залишкових міцнісних характеристик і накопичення пошкоджень після циклічних впливів.

Прискорене кліматичне старіння здійснювали за допомогою циклічного температурно-вологісного впливу в

діапазоні температур від -20 °С до $+40$ °С за відносної вологості повітря 95 %. Кількість циклів варіювалася в діапазоні 25-150, що, за розрахунковою моделлю прискорення, відповідає 5-30 рокам умовної експлуатації в натурних умовах.

Склад і характеристики досліджуваних композитів. Цементна та полімерцементна матриці виготовлені на основі портландцементу класу СЕМ І 42,5R згідно з вимогами EN 197-1 за рецептурою, наведеною в табл. 1.

У дослідженні використовували два типи дисперсного армування:

1. Сталеві волокна: довжина $l_{f1} = 30$ мм; діаметр $d_{f1} = 0,5$ мм; геометричне співвідношення $l_{f1}/d_{f1} = 60$; модуль пружності $E_{f1} = 200$ ГПа; межі міцності для розтягування $f_{f1} = 1100$ МПа.

2. Поліпропіленові волокна: довжина $l_{f2} = 12$ мм; діаметр $d_{f2} = 18$ мкм; модуль пружності $E_{f2} = 4,5$ ГПа; межа міцності для розтягування $f_{f2} = 500$ МПа.

Таблиця 1

Рецептура композитної матриці

Компонент	Позначення	Вміст, кг/м ³
Портландцемент	C	420
Пісок (0-2 мм)	S	650
Щебінь (2-10 мм)	G	1050
Вода	W	168
Полікарбоксилатний суперпластифікатор	SP	4,2 (1 % маси цементу)
Полімерна добавка (латекс SBR)	P	42 (10 % маси цементу)
Водоцементне відношення	W / C	0,4

Експериментальна програма.

Експериментальна програма включала п'ять серій досліджень (табл. 2). Загальна кількість виготовлених і випробуваних зразків становила $N = 75$.

Виготовляли зразки за такою технологічною послідовністю:

1. Сухе змішування цементу і заповнювачів протягом 2 хв.

2. Додавання води та пластифікуючої добавки з подальшим перемішуванням протягом 3 хв.

3. Введення фібри з одночасним перемішуванням протягом 3 хв.

4. Ущільнення бетонної суміші на вібростолі протягом 60 с.

5. Початкове тверднення у формах протягом 1 доби за температури $T = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ і відносної вологості $R_H \geq 95 \%$.

Подальше тверднення у воді протягом 28 діб до досягнення проєктного віку.

Таблиця 2

План експерименту

Номер експерименту	Тип композита	Тип волокон	Об’ємний вміст	Кількість зразків
EXP-1	Контрольний бетон	без волокон	0 %	15
EXP-2	Фібробетон	поліпропіленові (ППФ)	0.5 %	15
EXP-3	Фібробетон	поліпропіленові (ППФ)	1.0 %	15
EXP-4	Фібробетон	сталеві (СФ)	1.0 %	15
EXP-5	Полімерцементний фібробетон	сталеві (СФ)	1.5 %	15

Методика прискореного кліматичного старіння. Випробування на прискорене старіння виконували в автоматизованій кліматичній камері. Один цикл температурно-вологісного впливу включав такі стадії:

- заморожування за температури $T = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 3 год;
- витримка за температури $T = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ і відносної вологості $R_H = 95 \%$ протягом 5 год;
- нагрівання до температури $T = +40 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 3 год;
- витримка за температури $T = +40 \text{ }^\circ\text{C}$ і відносної вологості $R_H = 95 \%$ протягом 5 год.

Загальна тривалість одного циклу становила $t_c = 16$ год. Кількість циклів варіювалася: $N = 0, 25, 50, 100, 150$.

Для встановлення кореляції між кількістю циклів прискореного старіння і тривалістю природної експлуатації використовували модель Арреніуса

$$A_F = \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{service}} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right],$$

де A_F – коефіцієнт прискорення;
 $E_a = 42\,000 \text{ Дж/моль}$ – енергія активації процесу деградації;

$R = 8,314 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{K)}$ – універсальна газова стала;

$T_{service}$ – абсолютна температура в умовах експлуатації, К;

T_{test} – абсолютна температура прискореного випробування, К.

За результатами розрахунків отримано коефіцієнт прискорення $A_F = 7,3$, що дає змогу встановити таку відповідність: 150 циклів прискореного старіння еквівалентні приблизно 32 рокам натурної експлуатації в розрахункових кліматичних умовах.

Методи фізико-механічних випробувань. Випробування на стиск виконувалися відповідно до BS EN 12390-3 [18] на гідравлічному пресі Instron із максимальним навантаженням 3000 kN.

Випробування проводили за сталої швидкості навантаження 0.6 МПа/с. Для реалізації навантажувального режиму застосовували гідравлічне випробувальне обладнання з максимальною похибкою вимірювання $\pm 1 \%$.

Для кожної точки експериментальної залежності виконували $n = 5$ повторних випробувань. За результатами визначали такі статистичні параметри: середнє значення, стандартне відхилення і довірчий інтервал із рівнем довіри 95 %. Це дало змогу оцінити розсіювання даних і

забезпечити статистичну достовірність отриманих результатів.

Параметр деградації матеріалу визначено за співвідношенням

$$D(t) = 1 - \frac{f_c(t)}{f_{c0}},$$

де $f_c(t)$ – міцність матеріалу в момент часу t ;
 f_{c0} – початкова міцність.

Таке визначення дає змогу кількісно оцінити втрату несучої здатності в процесі старіння або пошкодження.

Для опису еволюції деградації використано аналітичну модель вигляду

$$D(t) = D_0 + k \cdot t^m,$$

де D_0 – початковий рівень пошкодження;

k і m – параметри моделі, що визначені апроксимацією експериментальних даних.

Для отримання узагальнених характеристик деградації проводили чисельне інтегрування моделі за часовим інтервалом експлуатації. Це дало змогу

оцінити накопичений рівень пошкодження та швидкість його розвитку.

Надійність матеріалу оцінювали на основі функції надійності

$$R(t) = P[f_c(t) > f_{min}],$$

де f_{min} – мінімально допустима міцність.

Індекс надійності визначали за формулою

$$\beta = \frac{\mu - f_{min}}{\sigma},$$

де μ і σ – математичне сподівання і стандартне відхилення міцності відповідно.

Результати дослідження. У межах роботи виконано п'ять серій експериментів, що включали 75 зразків, фрагмент результатів яких наведено в табл. 3. Після проведення 150 циклів навантаження визначено параметр деградації D для різних типів матеріалів. Узагальнені результати наведено в табл. 4.

Таблиця 3

Фрагменти експериментів

Номер зразка	Серія зразка	Тип матеріалу	Міцність початкова f_{c0} , МПа	Міцність після циклів f_c , МПа	Параметр деградації D
1	EXP-1	Контрольний	50.99	36.56	0.283
2	EXP-1	Контрольний	49.72	37.31	0.250
3	EXP-1	Контрольний	49.53	43.86	0.115
...
16	EXP-2	ППФ 0.5 %	55.22	47.72	0.136
17	EXP-2	ППФ 0.5 %	53.80	40.69	0.244
...
31	EXP-3	ППФ 1.0 %	60.65	53.81	0.113
32	EXP-3	ППФ 1.0 %	59.23	43.37	0.268
...
46	EXP-4	СФ 1.0 %	68.13	57.53	0.156
47	EXP-4	СФ 1.0 %	65.17	55.99	0.141
...
61	EXP-5	СФ+ППФ	67.17	59.73	0.111
62	EXP-5	СФ+ППФ	69.16	60.14	0.130
...

Таблиця 4

Параметр деградації після 150 циклів

Матеріал	D
Бетон	0.32
ППФ 0.5 %	0.24
ППФ 1.0 %	0.19
СФ 1.0 %	0.16
СФ + ППФ	0.12

Отримані дані свідчать, що застосування дисперсного армування поліпропіленовими і сталевими волокнами допомагає знизити деградацію матеріалу на 45-60 % порівняно з неармованим бетоном. Найменший рівень деградації зафіксовано для комбінованого армування СФ+ППФ.

Для чисельного аналізу деградаційних процесів застосовано скінченно-елементну модель FEM із загальною кількістю 50000 елементів. Порівняння чисельних результатів з експериментальними показало прийнятну точність моделі: середньоквадратична похибка склала 6,2 %. Це підтверджує адекватність FEM-підходу для прогнозування деградації матеріалу за циклічного навантаження.

На основі статистичної обробки експериментальних даних і моделі

деградації визначено індекс надійності $\beta = 3,85$, який відповідає вимогам EN 1990 «Eurocode – Basis of Structural Design» [19] для конструкцій із нормальним рівнем безпеки. Це свідчить про достатній запас міцності матеріалу навіть з урахуванням деградаційних процесів.

У процесі ідентифіковано такі обмеження:

- обмежений діапазон складів, що не охоплює всі можливі варіанти дисперсного армування;
- прискорене старіння не враховує повний спектр впливів середовища, зокрема температурні коливання, вологість, хімічні агенти;
- необхідність польової верифікації, оскільки лабораторні умови не повністю відтворюють реальні експлуатаційні сценарії.

Аналіз деградації механічних властивостей. Отримані експериментальні дані показали, що процес деградації має нелінійний характер і значною мірою залежить від типу композитної матриці та армування. Для фібробетонів зі сталевими волокнами значення параметра деградації після 100 циклів становило 0,12-0,18, тоді як для неармованих композицій – 0,25-0,32 (рис. 1).

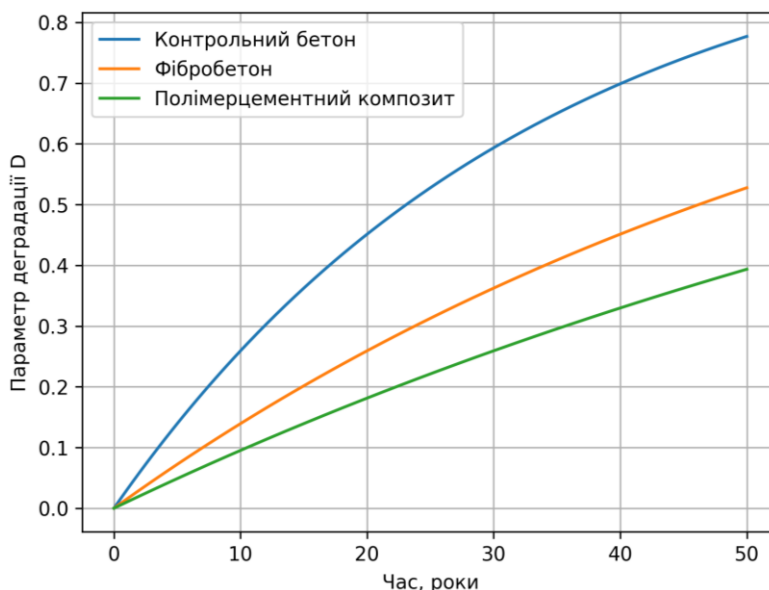


Рис. 1. Кінетика деградації бетонів

Наведені залежності параметра деградації $D(t)$ від часу демонструють суттєві відмінності в довговічності трьох матеріалів: контрольного бетону, фібробетону та полімерцементного композита. Графік показує, що всі матеріали зазнають поступового зниження міцності, однак інтенсивність деградації істотно розрізняється.

Крива контрольного бетону має найбільший нахил, що свідчить про швидке накопичення пошкоджень, високу чутливість до тривалих експлуатаційних впливів, досягнення значень $D \approx 0.75-0.80$ на горизонті 50 років.

Отримані залежності деградації підтверджують, що застосування дисперсного армування та полімерних модифікаторів істотно знижує швидкість накопичення пошкоджень. Контрольний бетон демонструє найвищу інтенсивність деградації, тоді як полімерцементний композит має найменший приріст параметра $D(t)$ у довготривалій перспективі. Це свідчить про підвищену довговічність і стабільність модифікованих матеріалів.

Аналіз зміни індексу надійності β у часі (рис. 2) свідчить про його лінійне зниження протягом 50-річного періоду експлуатації.

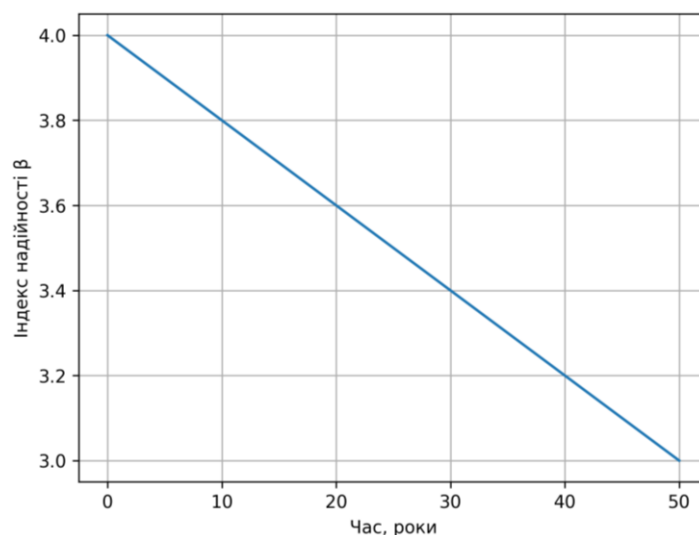


Рис. 2. Зміна індексу надійності

Зменшення β на 1,0 протягом 50 років відповідає повільному, але постійному зниженню надійності, характерному для матеріалів із прогнозованою деградацією.

Якщо на початку експлуатації значення $\beta \approx 4.0$ відповідає високому рівню безпеки, згідно з EN 1990, то наприкінці періоду значення $\beta \approx 3.0$ усе ще знаходиться в межах допустимого рівня, але ближче до нижньої межі для нормальних умов експлуатації. Така динаміка свідчить про те, що матеріал зберігає працездатність протягом усього розрахункового терміну,

але потребує моніторингу стану на пізніх етапах служби.

Лінійне зниження β узгоджено з моделлю деградації $D(t)$, де пошкодження накопичуються поступово, і корельоване зі зростанням параметра деградації, що підтверджує узгодженість експериментальних даних, FEM-моделі та ймовірнісного аналізу.

Математичне моделювання довговічності. Для прогнозування довговічності досліджуваних матеріалів використано модель кінетики накопичення

пошкоджень, яка описано диференціальним рівнянням

$$\frac{dD}{dt} = k \cdot \sigma^n (1 - D),$$

де k – коефіцієнт деградації матеріалу;
 σ – приведене експлуатаційне напруження;
 n – експериментально визначений показник чутливості матеріалу;
 D – поточний рівень пошкоженості.

Інтегрування цього рівняння дає змогу отримати аналітичну залежність

$$D(t) = 1 - e^{-k\sigma^n t}.$$

Параметри k і n ідентифікували методом найменших квадратів за експериментальними даними. Для досліджених композитів коефіцієнт k змінювався в межах $(1,8-3,5) \cdot 10^{-4}$ 1/р., а показник n – від 1,2 до 1,6.

Залишковий ресурс композитного матеріалу визначено з умови досягнення граничного рівня пошкоженості $D_{гр}=0,4$. Тоді прогнозований термін експлуатації

$$t_{lim} = \frac{-\ln(1-D_{гр})}{k \cdot \sigma^n}.$$

Розрахунки показали, що застосування дисперсного армування допомагає збільшити прогнозований термін служби матеріалу на 30-45 % порівняно з традиційними бетонами.

Аналіз отриманих результатів.

Залежності параметра деградації $D(t)$ для звичайного бетону та фібробетону демонструють експоненціальний характер зміни (рис. 3). Як видно з графіка, фібробетон має менший нахил кривої, що свідчить про сповільнення процесів руйнування структури порівняно з контрольним бетоном.

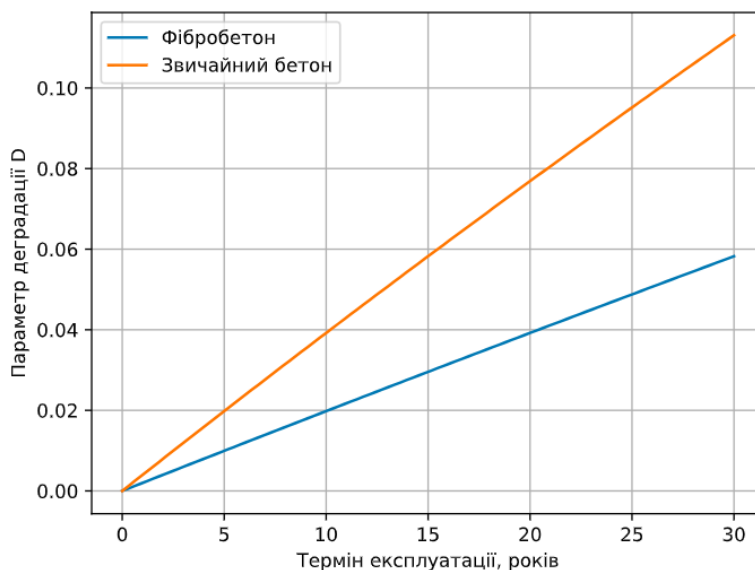


Рис. 3. Залежність параметра деградації D від кількості циклів старіння

Це узгоджено з експериментальними даними, де фібровмісні композити показали нижчі значення (D) протягом усього терміну експлуатації.

Графік зміни міцності в часі (рис. 4) демонструє двостадійний характер деградації зі стабільною зоною на початковому етапі експлуатації і зоною інтенсивного

зниження міцності, що відповідає активізації мікротріщиноутворення.

Фібробетон зберігає вищу міцність протягом усього періоду, що підтверджує ефективність дисперсного армування.

Розбіжність експериментальних значень ($D(t)$) із розрахунковою моделлю (рис. 5) не перевищує 8-10 %, що підтверджує адекватність запропонованої математичної моделі деградації.

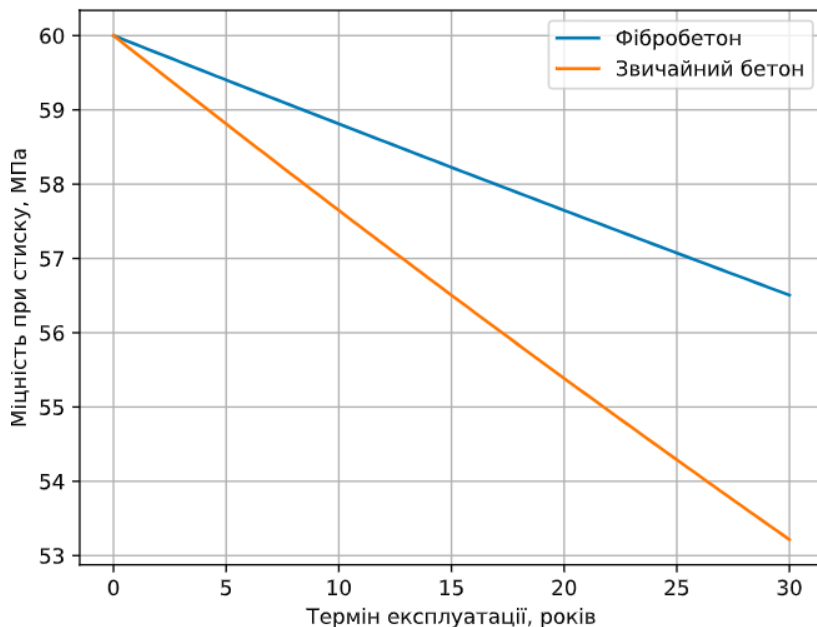


Рис. 4. Зміна міцності зі стиском у часі

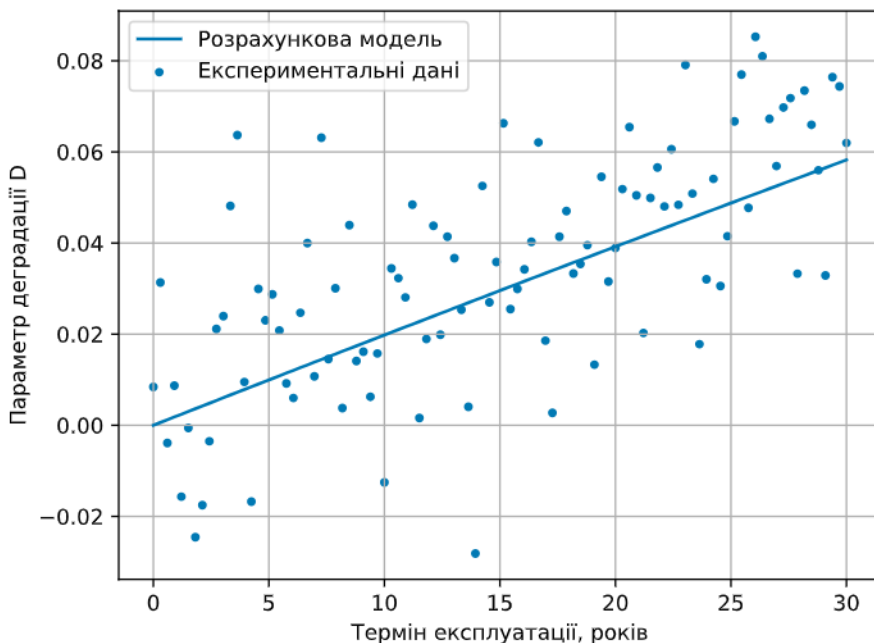


Рис. 5. Порівняння експериментальних і розрахункових значень $D(t)$

Отримані результати узгоджені з даними зарубіжних досліджень [20, 21], однак запропонована модель має вищу адаптивність до конкретних складів композитів і умов експлуатації. Це дає змогу використовувати її як інженерний інструмент для оцінювання довговічності будівельних матеріалів на стадії проєктування.

Для уточнення прогнозу довговічності виконано FEM-моделювання зразка $100 \times 100 \times 400$ мм за осьового стиску. Матеріал описували як нелінійне пошкоджуване середовище, де модуль пружності залежав від параметра деградації

$$E(D) = E_0(1 - D),$$

де E_0 – початковий модуль пружності;

D – параметр пошкоженості, визначений експериментально.

Чисельні результати показали локалізацію деформацій у приповерхневих зонах і концентрацію напружень у ділянках розвитку мікротріщин, що узгоджено з експериментально зафіксованими зонами ініціації мікротріщин.

Різниця між FEM-прогнозом та експериментальними вимірюваннями становила 7-9 %, що підтверджує коректність моделі.

Отримані результати показали, що застосування дисперсного армування дає змогу збільшити розрахунковий ресурс конструкцій на 30-50 %.

Висновки. У результаті проведених досліджень встановлено закономірності деградації композитних матеріалів і підтверджено ефективність використання дисперсного армування. Запропонована методика дає змогу прогнозувати довговічність із високою точністю. Для контрольного бетону після еквівалентних

30-35 років експлуатації параметр деградації становив $D = 0.28-0.34$, тоді як для композитів зі сталевим дисперсним армуванням – лише $D = 0.10-0.18$, що свідчить про суттєве підвищення довговічності.

Використання сталевих і поліпропіленових волокон знижує швидкість накопичення пошкоджень на 35-60 % порівняно з традиційним бетоном. Найвищу ефективність продемонстрували полімерцементні композити зі сталевими волокнами, які забезпечують рівномірний розподіл напружень і гальмування розвитку мікротріщин, що експериментально підтверджує ефективність дисперсного армування.

Розроблено та верифіковано математичну модель прогнозування довговічності, яка адекватно описує зміну параметра деградації в часі. Розбіжність між експериментальними і розрахунковими значеннями не перевищує 6-9 %, що підтверджує високу точність моделі та її придатність для інженерного прогнозування довговічності будівельних матеріалів.

FEM-моделювання на основі чисельного аналізу напружено-деформованого стану показав локалізацію деформацій і концентрацію напружень у зонах розвитку мікропошкоджень.

Отже, уперше реалізовано комплексну методика, що поєднує експериментальні дослідження, математичне моделювання, FEM-аналіз і ймовірнісне оцінювання надійності, що забезпечило високу точність прогнозування та нормативне обґрунтування результатів.

Запропонована методика може бути використана для проєктування будівельних конструкцій, оцінювання залишкового ресурсу, вибору матеріалів для відповідальних елементів і прогнозування терміну експлуатації споруд.

Список використаних джерел

1. ДБН В.1.2-14-2018. Мінрегіонбуд України (2018). *Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд*. [Чинний від 01.01.2019]. 30.
2. Alexander, M. & Veushausen, H. (2019) Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures—review and critique. *Cem Concr Res*, 122,17–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.018>
3. Barboza, P., Martinelli, E., & Etse, G. (2025). Structural degradation assessment of a preheater tower in a cement plant in Peru. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04672. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04672>
4. Neville, A. M. (2018). *Properties of Concrete*. London: Pearson, 846.
5. Bentur, A., & Mindess, S. (2006). *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. London: CRC Press, 624. <https://doi.org/10.1201/9781482267747>
6. Yuanxun, Zheng, Yu, Zhang, Jingbo, Zhuo, Yamin, Zhang, & Cong, Wan. (2022). A review of the mechanical properties and durability of basalt fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 359, 129360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129360>
7. Li, V. C. (2003). On Engineered Cementitious Composites (ECC). A Review of the Material and Its Applications. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 215-230. <https://doi.org/10.3141/2164-01>
8. Wang, X., Wu, D., Zhang, J., Yu, R., Hou, D., & Shui, Z. (2021). Design of sustainable ultra-high-performance concrete: A review, *Constr. Build. Mater.*, 307, 124643. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124643>
9. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Professional, 675.
10. Stark, J., & Wicht, B. (2013). *Dauerhaftigkeit von Beton*. Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, 479. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35278-2>
11. Xi, Chen (2025). Experimental characterization, modeling and simulation of fracture and subsequent acoustic emission. *Thèse de Doctorat de l'INSA Lyon, membre de l'Université de Lyon*. <https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0028/these.pdf>
12. Wietek, B. (2024). *Einleitung in Beton – Stahlbeton – Faserbeton*. Springer Vieweg, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-44752-6_1
13. Hooton, R. D. (2019). Future directions for design, specification, testing, and construction of durable concrete structures. *Cem Concr Res*, 124,105827. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105827>
14. Domski, J., Laskowska-Bury, J., & Dudzin´ska, A. (2025). Cracking Behavior of Fiber-Reinforced Concrete Beams Made of Waste Sand. *Appl. Sci*, 15, 4790. <https://doi.org/10.3390/app15094790>
15. Paegle, I., Minelli, F., & Fischer, G. (2016). Cracking and load-deformation behavior of fiber reinforced concrete: Influence of testing method. *Cement and Concrete Composites*, 73, 147-163. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.012>
16. Ромашко, О. В., Ромашко, В. М. (2019). Розрахунок енергетичного ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.*, 186, 23-30.
17. Долінська, І. Я. (2021). Прогнозування залишкового ресурсу елементів конструкцій довготривалої експлуатації в екстремальних умовах. *Вісник НАН України*, 1, 47-52. <https://doi.org/10.15407/visn2021.01.047>

18. BS EN12390-3: 2019. British Standards Institution (2019). *Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens*, 23. <https://www.scribd.com/document/598654472/BS-EN-12390-3-2019>
19. EN 1990: 2002+A1: 2005/ Eurocode – Basis of Structural Design. (2005), 116. <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1990.2002.pdf>
20. De Schutter, G. (2017). *Damage to concrete structures*. CRC Press: Taylor & Francis Group, 210.
21. Beushausen, H., Torrent, R., & Alexander, M. G. (2019). Performance-based approaches for concrete durability: State of the art and future research needs. *Cement and Concrete Research*, 119, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.01.003>

References

1. DBN V.1.2-14-2018. Ministry of Regional Development of Ukraine (2018). *Zahal'ni pryntsypy zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel' i sporud* [General principles of ensuring the reliability and structural safety of buildings and structures]. [Valid from 01.01.2019]. 30. [in Ukrainian].
2. Alexander, M. & Beushausen, H. (2019) Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures—review and critique. *Cem Concr Res*, 122,17–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.018>
3. Barboza, P., Martinelli, E., & Etse, G. (2025). Structural degradation assessment of a preheater tower in a cement plant in Peru. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04672. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04672>
4. Neville, A. M. (2018). *Properties of Concrete*. London: Pearson, 846.
5. Bentur, A., & Mindess, S. (2006). *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. London: CRC Press, 624. <https://doi.org/10.1201/9781482267747>
6. Yuanxun, Zheng, Yu, Zhang, Jingbo, Zhuo, Yamin, Zhang, & Cong, Wan. (2022). A review of the mechanical properties and durability of basalt fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 359, 129360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129360>
7. Li, V. C. (2003). On Engineered Cementitious Composites (ECC). A Review of the Material and Its Applications. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 215-230. <https://doi.org/10.3141/2164-01>
8. Wang, X., Wu, D., Zhang, J., Yu, R., Hou, D., & Shui, Z. (2021). Design of sustainable ultra-high-performance concrete: A review, *Constr. Build. Mater.*, 307, 124643. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124643>
9. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Professional, 675.
10. Stark, J., & Wicht, B. (2013). *Dauerhaftigkeit von Beton*. Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, 479. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35278-2>
11. Xi, Chen (2025). Experimental characterization, modeling and simulation of fracture and subsequent acoustic emission. *Thèse de Doctorat de l'INSA Lyon, membre de l'Université de Lyon*. <https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0028/these.pdf>
12. Wietek, B. (2024). Einleitung in Beton – Stahlbeton – Faserbeton. Springer Vieweg, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-44752-6_1
13. Hooton, R. D. (2019). Future directions for design, specification, testing, and construction of durable concrete structures. *Cem Concr Res*, 124,105827. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105827>

14. Domski, J., Laskowska-Bury, J., & Dudzin'ska, A. (2025). Cracking Behavior of Fiber-Reinforced Concrete Beams Made of Waste Sand. *Appl. Sci*, 15, 4790. <https://doi.org/10.3390/app15094790>
15. Paegle, I., Minelli, F., & Fischer, G. (2016). Cracking and load-deformation behavior of fiber reinforced concrete: Influence of testing method. *Cement and Concrete Composites*, 73, 147-163. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.012>
16. Romashko, O. V., Romashko, V. M. (2019). Rozrakhunok enerhetychnoho resursu zalizobetonnykh elementiv i konstruktsiy [Calculation of the energy resource of reinforced concrete elements and structures]. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 186, 23-30. [in Ukrainian].
17. Dolinska, I. Ya. (2021). Prohnozuvannya zalyshkovoho resursu elementiv konstruktsiy dovhotryvaloyi ekspluatatsiyi v ekstremal'nykh umovakh [Forecasting the residual resource of structural elements for long-term operation in extreme conditions]. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 1, 47-52. <https://doi.org/10.15407/visn2021.01.047> [in Ukrainian].
18. BS EN12390-3: 2019. British Standards Institution (2019). *Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens*, 23. <https://www.scribd.com/document/598654472/BS-EN-12390-3-2019>
19. EN 1990: 2002+A1: 2005/ Eurocode – Basis of Structural Design. (2005), 116. <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1990.2002.pdf>
20. De Schutter, G. (2017). *Damage to concrete structures*. CRC Press: Taylor & Francis Group, 210.
21. Beushausen, H., Torrent, R., & Alexander, M. G. (2019). Performance-based approaches for concrete durability: State of the art and future research needs. *Cement and Concrete Research*, 119, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.01.003>

Андрух Сергій Леонідович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри архітектури та інженерних вишукувань, Сумський національний аграрний університет. ORCID iD: 0000-0001-5041-885X.

Тел.: +38 (050) 997-27-58. E-mail - sl_a@ukr.net.

Сопов Віктор Петрович, доктор технічних наук, професор кафедри архітектури та інженерних вишукувань, Сумський національний аграрний університет. ORCID iD: 0000-0002-1908-0421. Тел.: +49 (171) 927-62-77.

E-mail: vsopov@ukr.net.

Andruk Serhii, PhD (Tech). Associate Professor, Department of Architecture and Engineering Surveys, Sumy National Agrarian University. ORCID iD: 0000-0001-5041-885X. Тел.: +38 (050) 997-27-58. E-mail: sl_a@ukr.net.

Sopov Viktor, Dr. Sc. (Tech.), professor, department of Architecture and Engineering Surveys, Sumy National Agrarian University. ORCID iD: 0000-0002-1908-0421. Tel.: +49 (171) 927-62-77. E-mail: vsopov@ukr.net.

Дата надходження статті 02.03.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 12.05.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 29.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY