МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Центр заочної та дистанційної освіти

Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва

Допустити до захисту
Зав. кафедри БДМБ
д-р техн. наук, професор
_____ В. Яцун
«____» _____ 2026 р.

Кваліфікаційна магістерська робота

на тему:

«Удосконалення алгоритму розрахунку міцності згинаних залізобетонних елементів із корозійними пошкодженнями»

Керівник роботи:
к.т.н., доцент Дарієнко В. В.
_____

Консультант з охорони праці:
доцент Дарієнко В. В.
_____

Виконав студент гр. БІ-25мз,
спеціальності G19 Будівництво
та цивільна інженерія
_____ Андреєв О.В.

Кропивницький – 2026 рік

Підписано КЕП
Центральноукраїнський національний технічний університет
АНДРЕЄВ ОЛЕКСАНДР ВАЛЕНТИНОВИЧ
Сертифікат: 5E984D526F82F38F040000006BBA6A01DCE9BA07
Дійсний з 01.07.2026 14:36:12 по 02.07.2027 02:59:59

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут, факультет, відділення ЦЗДО
Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва
Освітній ступінь магістр
Спеціальність G19 «Будівництво та цивільна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри БДМБ,
д.т.н., проф. Яцун В.В.
_____
«____» _____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Андреєву Олександру Валентиновичу

1. Тема роботи: «Удосконалення алгоритму розрахунку міцності згинаних залізобетонних елементів із корозійними пошкодженнями», керівник роботи Дарієнко В.В., к.т.н., доцент, затверджені наказом вищого навчального закладу від “10” 08 2026 року № 25-13.

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 25.11.2027 р.

3. Вихідні дані до роботи: ДБН В.2.6-98:2009, ДСТУ Б В.2.6-156:2010, ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010, ДСТУ Б В.2.6-145:2010, ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016; кліматичні умови м. Кропивницький; робочий майданчик травильного відділення з балками 250×500 мм прольотом 6 м; наукові публікації з розрахунку кородованих залізобетонних елементів.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): вступ; стан проблеми корозійного пошкодження залізобетонних конструкцій; нормативна база та умови експлуатації; об'єкт дослідження та програма обстеження; удосконалений алгоритм розрахунку міцності пошкодженого перерізу; числові дослідження та прогноз несучої здатності; охорона праці; загальні висновки; general conclusions; список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу: мультимедійна презентація (26 слайдів).

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав (підпис, дата)	Завдання прийняв (підпис, дата)
Розділи 1–5	Дарієнко В.В., доцент		
Охорона праці	Дарієнко В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання «_10_» _____09_____ 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної магістерської роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1	Аналіз літературних джерел, огляд стану проблеми	01.09–14.09.2026	
2	Нормативна база, умови експлуатації, характеристика об'єкта	15.09–25.09.2026	
3	Розробка програми обстеження та вихідних даних	26.09–05.10.2026	
4	Розробка алгоритму і програми розрахунку	06.10–20.10.2026	
5	Числові дослідження, прогноз ресурсу, заходи відновлення	21.10–05.11.2026	
6	Розділ «Охорона праці»	06.11–12.11.2026	
7	Оформлення пояснювальної записки і презентації	13.11–20.11.2026	
8	Нормоконтроль, перевірка на академічний плагіат, рецензування	до 25.11.2026	
9	Захист кваліфікаційної магістерської роботи	за графіком ЕК	

Студент _____ Андреєв О.В.

Керівник роботи _____ Дарієнко В.В.

ВІДОМІСТЬ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кількість аркушів	Примітка
				Документація загальна		
				Знову розроблена		
А4		*1*		*Титульний аркуш*	*1*	
А4		*2*		*Завдання*	*2*	
А4		*3*		*Анотація*	*1*	
А4		*4*		*Abstract*	*1*	
А4		*5*	*МЗЗЕ 25.G19.02 ПЗ*	*Пояснювальна записка*	*60*	
				Зміст	*2*	
				Вступ	*3*	
				Розділ 1	*10*	
				Розділ 2	*4*	
				Розділ 3	*6*	
				Розділ 4	*7*	
				Розділ 5	*13*	
				Розділ 6	*7*	
				Загальні висновки	*2*	
				General conclusions	*2*	
				Список використаних джерел	*4*	
А4		*6*	*МЗЗЕ 25.G19.02 ІМ*	*Ілюстраційні матеріали (презентація)*	*26*	*слайдів*

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	*МЗЗЕ 25.G19.02 ВД*			
Розробив		*Андреєв О.В.*			*Удосконалення алгоритму розрахунку міцності згинаних залізобетонних елементів із корозійними пошкодженнями* *Відомість кваліфікаційної магістерської роботи*	*Літ.*	*Арк.*	*Аркушів*
Перевірив		*Дарієнко В.В.*				*М*	*1*	*1*
Реценз.						*ЦНТУ гр. БІ-25мз*		
Н. контр.		*Дарієнко В.В.*						
Затвердив		*Яцун В.В.*						

АНОТАЦІЯ

Андреєв О. В. Удосконалення алгоритму розрахунку міцності згинаних залізобетонних елементів із корозійними пошкодженнями. Кваліфікаційна магістерська робота за спеціальністю G19 «Будівництво та цивільна інженерія». Кропивницький : ЦНТУ, 2026.

Пояснювальна записка містить 60 с., 30 рис., 13 табл., 30 джерел.

Об'єкт дослідження – згинані залізобетонні елементи прямокутного перерізу, що експлуатуються в агресивних середовищах. Предмет дослідження – несуча здатність нормального перерізу з пошаровою зміною властивостей бетону стиснутої зони та зменшеною площею арматури.

Мета роботи – удосконалити алгоритм розрахунку міцності згинаних залізобетонних елементів із корозійними пошкодженнями на основі нелінійної деформаційної моделі чинних норм і застосувати його для оцінки ресурсу балок виробничої будівлі в м. Кропивницький.

У роботі проаналізовано механізми корозії бетону й арматури, класи впливу середовища та сучасні методи розрахунку кородованих елементів. Запропоновано алгоритм з безперервним профілем пошкодження k(y), виключенням зруйнованих волокон і визначенням граничного моменту як максимуму кривої «момент – кривизна». Числовими дослідженнями встановлено, що за глибини пошкодження 30 мм граничний момент знижується на 1,4–11,4 % залежно від класу бетону й діаметра арматури, а залежність втрат від коефіцієнта армування має мінімум. Для балки робочого майданчика травильного відділення визначено поточний коефіцієнт використання 0,83, детермінований ресурс 79,7 року та ймовірнісний (медіана 91,0, 5 %-квантиль 54,2 року), запропоновано технологію ремонту. Розроблено заходи з охорони праці з розрахунками стійкості вишки-тури, шуму, освітлення і повітрообміну.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЗАЛІЗОБЕТОН, КОРОЗІЯ БЕТОНУ, ДЕФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ, ГРАНИЧНИЙ ЗГИНАЛЬНИЙ МОМЕНТ, ПРОФІЛЬ ПОШКОДЖЕННЯ, ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС, МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО.

ABSTRACT

Andreiev O. V. Improvement of the algorithm for strength analysis of flexural reinforced concrete members with corrosion damage. Master's qualification thesis, specialty G19 Construction and Civil Engineering. Kropyvnytskyi : Central Ukrainian National Technical University, 2026.

The explanatory note contains 60 pages, 30 figures, 13 tables and 30 references.

The object of research is flexural rectangular reinforced concrete members operated in aggressive environments. The subject is the bearing capacity of a normal section with layer-wise degradation of compressed concrete and reduced reinforcement area.

The aim is to improve the algorithm for strength analysis of corroded flexural members on the basis of the nonlinear deformation model of the current Ukrainian standards and to apply it to service life assessment of beams of an industrial building in Kropyvnytskyi.

Corrosion mechanisms of concrete and steel, exposure classes and current methods of analysis of corroded members are reviewed. An algorithm with a continuous damage profile k(y), exclusion of crushed fibres and the ultimate moment defined as the maximum of the moment–curvature curve is proposed. Numerical studies show that a 30 mm damage depth reduces the ultimate moment by 1.4–11.4 % depending on concrete class and bar diameter, and the dependence of losses on the reinforcement ratio has a minimum. For a beam of a pickling shop platform the current utilisation factor is 0.83, the deterministic service life is 79.7 years and the probabilistic one has a median of 91.0 and a 5 % quantile of 54.2 years; a repair technology is proposed. Occupational safety measures with calculations of scaffold stability, noise, lighting and ventilation are developed.

KEYWORDS: REINFORCED CONCRETE, CONCRETE CORROSION, DEFORMATION MODEL, ULTIMATE BENDING MOMENT, DAMAGE PROFILE, RESIDUAL SERVICE LIFE, MONTE CARLO METHOD.

ЗМІСТ

ВСТУП 3
Розділ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ КОРОЗІЙНОГО ПОШКОДЖЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ 6
1.1 Види корозії бетону та їх механізми 6
1.2 Корозія арматури в бетоні 7
1.3 Класифікація агресивних середовищ 10
1.4 Первинний і вторинний захист залізобетону 11
1.5 Методи розрахунку пошкоджених залізобетонних елементів 13
1.6 Висновки до розділу 1 15
Розділ 2 НОРМАТИВНА БАЗА ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ У М. КРОПИВНИЦЬКИЙ 16
2.1 Нормативна база розрахунку 16
2.2 Кліматичні умови Кропивницького 17
2.3 Класи впливу середовища для конструкцій об'єкта 18
2.4 Висновки до розділу 2 19
Розділ 3 ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОГРАМА ОБСТЕЖЕННЯ 20
3.1 Характеристика об'єкта 20
3.2 Програма обстеження 21
3.3 Вихідні дані для розрахунку пошкодженого перерізу 23
3.4 Критерії оцінки технічного стану 24
3.5 Висновки до розділу 3 25
Розділ 4 УДОСКОНАЛЕНИЙ АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ ПОШКОДЖЕНОГО ПЕРЕРІЗУ 26
4.1 Основні передумови 26
4.2 Діаграми деформування бетону й арматури 27
4.3 Опис пошкодження стиснутої зони 28
4.4 Розрахункова схема та рівняння рівноваги 29

4.5 Блок-схема та програмна реалізація 30
4.6 Висновки до розділу 4 32
Розділ 5 ЧИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОГНОЗ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ .. 33
5.1 Вплив класу бетону і діаметра арматури 33
5.2 Вплив глибини пошкодження та способу її опису 36
5.3 Вплив коефіцієнта армування 37
5.4 Прогноз несучої здатності балки Б-1 у часі 39
5.5 Аналіз чутливості та ймовірнісна оцінка ресурсу 41
5.6 Заходи з відновлення та підсилення 43
5.7 Висновки до розділу 5 44
Розділ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ 46
6.1 Загальні положення 46
6.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників 46
6.3 Заходи безпеки за видами робіт 47
6.4 Розрахунок стійкості пересувної вишки-тури 48
6.5 Розрахунок шуму від одночасної роботи обладнання 49
6.6 Розрахунок місцевого освітлення та повітрообміну 50
6.7 Безпека в надзвичайних ситуаціях 51
6.8 Висновки до розділу 6 52
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 53
GENERAL CONCLUSIONS 55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 57

ВСТУП

Актуальність теми. Значна частина виробничих будівель України, зокрема і підприємств Кропивницького, зведена у 1960–1990-х роках зі збірного та монолітного залізобетону. Вік цих конструкцій нині становить 35–60 років, а умови їх роботи здебільшого відрізняються від проєктних: змінилися технологічні процеси, з'явилися нові агресивні речовини, частина приміщень тривалий час не опалювалася, покрівлі протікали. Унаслідок цього в балках, ригелях і плитах розвивається корозія бетону та арматури, причому найчастіше пошкоджується саме верхня, стиснута при згині, частина перерізу, на яку потрапляють проливи технологічних розчинів, конденсат і талі води.

Під час технічного обстеження інженер має відповісти на конкретне запитання: яку несучу здатність має пошкоджений елемент сьогодні і скільки років він ще може безпечно працювати. Чинні в Україні норми ДБН В.2.6-98:2009 [1] і ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [2] дозволяють розраховувати переріз за нелінійною деформаційною моделлю, однак не містять готових правил для бетону, властивості якого змінюються за висотою стиснутої зони. На практиці пошкоджений шар або повністю виключають із розрахунку, або вводять один усереднений понижувальний коефіцієнт. Обидва підходи не відображають реального розподілу пошкоджень і можуть давати як надмірний запас, так і переоцінку несучої здатності.

У зарубіжних дослідженнях останніх років [3–6] основну увагу приділено втраті перерізу і зчеплення арматури, а пошкодження бетону стиснутої зони, характерне для конструкцій з проливами кислот, розглядається значно рідше. Тому удосконалення алгоритму розрахунку міцності згинаних залізобетонних елементів із корозійними пошкодженнями відповідно до чинних в Україні норм є актуальним науково-практичним завданням.

Мета роботи – удосконалити алгоритм розрахунку міцності нормальних перерізів згинаних залізобетонних елементів із корозійним пошкодженням

стиснутої зони бетону і розтягнутої арматури на основі нелінійної деформаційної моделі та застосувати його для оцінювання залишкового ресурсу балок виробничої будівлі в м. Кропивницький.

Для досягнення мети поставлено такі **завдання**:

– проаналізувати механізми корозії бетону й арматури, класифікацію агресивних середовищ, способи захисту залізобетону та сучасні методи розрахунку пошкоджених елементів;

– визначити нормативну базу розрахунку й умови експлуатації конструкцій у кліматі Кропивницького;

– розробити програму обстеження та порядок отримання профілю пошкодження стиснутої зони;

– сформулювати удосконалений алгоритм розрахунку з безперервною функцією деградації бетону за висотою перерізу та реалізувати його програмно;

– виконати числові дослідження впливу класу бетону, діаметра арматури, коефіцієнта армування і глибини пошкодження на граничний згинальний момент;

– розробити модель зміни несучої здатності в часі, визначити детерміновано та ймовірнісно залишковий ресурс балки і запропонувати заходи відновлення;

– розробити заходи з охорони праці під час обстеження і ремонту з необхідними розрахунками.

Об'єкт дослідження – згинані залізобетонні елементи прямокутного перерізу, що експлуатуються в агресивних середовищах.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан і несуча здатність нормального перерізу з пошаровою зміною властивостей бетону стиснутої зони та зменшеною площею арматури.

Методи дослідження: аналіз і узагальнення літературних і нормативних джерел; нелінійна деформаційна модель залізобетону з поділом перерізу на волокна; чисельні методи (бісекція, пошук максимуму кривої «момент –

кривизна»); параметричне моделювання; регресійний аналіз; дифузійні моделі нейтралізації та корозії; статистичне моделювання методом Монте-Карло.

Наукова новизна одержаних результатів:

– запропоновано алгоритм, у якому міцність і гранична стисливість бетону задаються безперервною функцією глибини k(y), $\varepsilon_{cu}(y)$, а несуча здатність визначається як максимум кривої «момент – кривизна» з поступовим виключенням зруйнованих волокон;

– встановлено, що відносне зниження несучої здатності залежить не лише від глибини пошкодження, а й від класу бетону, діаметра арматури та коефіцієнта армування, причому залежність від армування має мінімум при $\rho \approx$ 0,5–0,9 %; показано, що одного параметра δ/x_0 недостатньо для надійного прогнозу втрат;

– поєднано розрахунок пошкодженої стиснутої зони з моделлю депасивації і втрати перерізу розтягнутої арматури та статистичним моделюванням, що дозволяє оцінювати залишковий ресурс з урахуванням розкиду вихідних даних.

Практичне значення полягає в тому, що алгоритм реалізовано у вигляді програми мовою Python, придатної для перевірочних розрахунків під час обстеження. Для балки Б-1 робочого майданчика травильного відділення визначено поточний граничний момент, прогнозний термін вичерпання несучої здатності та запропоновано технологію ремонту.

Апробація результатів. Основні результати роботи представлено на міжнародній науково-технічній онлайн-конференції «Наука, інженерія та технології: сучасні виклики й перспективи» (Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, 24–25 листопада 2026 р.).

Структура роботи. Кваліфікаційна магістерська робота складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків англійською та українською мовами і списку використаних джерел. Пояснювальна записка містить 60 с., 30 рис., 13 табл., 30 джерел.

Розділ 1
СТАН ПРОБЛЕМИ КОРОЗІЙНОГО ПОШКОДЖЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

1.1 Види корозії бетону та їх механізми

Корозія бетону – це сукупність фізико-хімічних процесів, які поступово руйнують цементний камінь і змінюють його структуру під дією зовнішнього середовища або внутрішніх реакцій. За механізмом руйнування цементного каменю розрізняють три види корозії (рис. 1.1); така класифікація прийнята і в навчальній літературі з залізобетонних конструкцій [7], і в міжнародних оглядах [8].

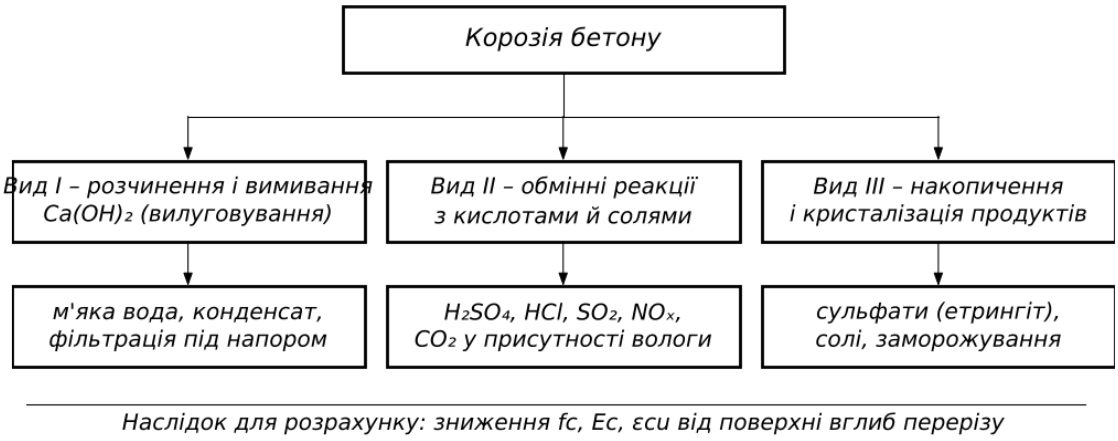

Рис. 1.1 Класифікація видів корозії бетону за механізмом руйнування

Корозія першого виду полягає в розчиненні та вимиванні гідроксиду кальцію $Ca(OH)_2$, який утворюється під час гідратації силікатів клінкеру. Розчинність $Ca(OH)_2$ становить близько 1,2 г/л, тому м'яка вода, конденсат або атмосферна волога, що фільтрують крізь бетон, поступово виносять вапно. Коли його втрати сягають 15–20 %, починається розкладання гідросилікатів і гідроалюмінатів кальцію, міцність бетону знижується, на поверхні з'являються білі висоли. Найнебезпечніший цей процес для тонкостінних конструкцій, через які фільтрує вода під напором.

Корозія другого виду розвивається під час обмінних реакцій між складовими цементного каменю та кислотами чи солями середовища. Кислі гази SO_2, NO_x, HCl і CO_2 у присутності вологи утворюють кислоти, які нейтралізують $Ca(OH)_2$. Продукти реакції – розчинні солі кальцію – вимиваються, а на поверхні залишається пухкий аморфний шар кремнезему та гідроксидів заліза й алюмінію. Саме такий механізм характерний для травильних, гальванічних і акумуляторних відділень машинобудівних заводів, де на перекриття регулярно потрапляють розчини сірчаної та соляної кислот.

Корозія третього виду пов'язана з накопиченням у порах малорозчинних продуктів, які кристалізуються зі збільшенням об'єму. Класичним прикладом є сульфатна корозія: сульфат-іони взаємодіють з алюмінатами цементного каменю, утворюючи гідросульфоалюмінат кальцію (етрингіт), об'єм твердої фази при цьому зростає у 2,0–2,5 раза. До цього ж виду відносять руйнування від кристалізації солей під час випаровування та від циклічного замерзання води в порах (лід займає приблизно на 9 % більший об'єм, ніж вода).

Біологічна корозія виникає під дією бактерій, мікроскопічних грибів і лишайників. Тіобактерії в каналізаційних колекторах окиснюють сірководень до сірчаної кислоти, а гриби виділяють органічні кислоти. За механізмом руйнування біокорозія поєднує ознаки другого і третього видів.

У реальних умовах різні види корозії діють одночасно і підсилюють один одного: вилуговування підвищує пористість, крізь яку легше проникають кислі гази, а кристалізація солей утворює мікротріщини, що прискорюють фільтрацію. Для розрахунку несучої здатності важливо, що всі три механізми мають однаковий за наслідками ефект – зниження міцності f_c, модуля пружності E_c і граничної стисливості ε_{cu} бетону, яке поширюється від поверхні вглиб перерізу.

1.2 Корозія арматури в бетоні

Сталь у щільному бетоні захищена пасивною оксидною плівкою, стабільною при pH порової рідини 12,5–13,5. Пасивність порушується двома шляхами: нейтралізацією (карбонізацією) захисного шару до pH менше 9–10 та

накопиченням хлорид-іонів понад критичну концентрацію [8]. Після депасивації на поверхні стрижня утворюються анодні та катодні ділянки, між якими через пори з електролітом протікає струм корозії. На анодних ділянках залізо переходить у розчин, на катодних кисень відновлюється до гідроксид-іонів. Продукти корозії займають у 2–6 разів більший об'єм, ніж вихідна сталь, тому створюють розпірний тиск. Уже за втрати радіуса стрижня в кілька десятків мікрометрів у захисному шарі з'являються поздовжні тріщини вздовж арматури, а згодом – відшарування бетону. Дослідження W. Yang, H. Baji і C.-Q. Li [9] показали, що за піттінгової (локальної) корозії час до появи тріщин на поверхні бетону відрізняється від часу, обчисленого для рівномірної корозії, тому вид корозії необхідно враховувати і під час прогнозу.

Розвиток корозії арматури зручно описувати двостадійною моделлю К. Туутті [10] (рис. 1.2). На стадії ініціювання агресивні агенти проникають крізь захисний шар, але видимих пошкоджень ще немає; тривалість цієї стадії t_0 залежить від товщини та щільності захисного шару. На стадії розвитку відбувається втрата перерізу стрижнів, погіршується зчеплення з бетоном, і несуча здатність елемента зменшується до граничного рівня.

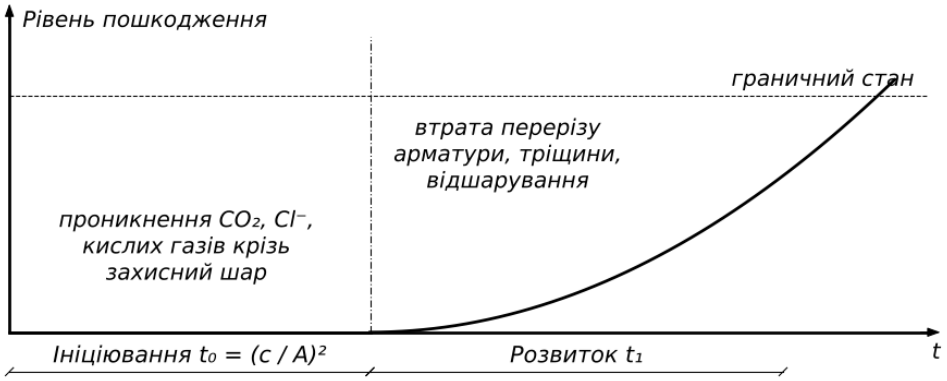

Рис. 1.2 Двостадійна модель розвитку корозійних пошкоджень (побудовано автором за моделлю Tuutti, 1982)

Глибина нейтралізованого шару в часі добре описується параболічною залежністю

$$x_н(t) = A \cdot \sqrt{t}, \qquad (1.1)$$

де A – константа швидкості нейтралізації, мм/рік^{0,5}, яка залежить від проникності бетону, вологості й концентрації кислих газів; t – тривалість експлуатації, роки.

Час депасивації арматури із захисним шаром c визначається з умови $x_н(t_0) = c$, тобто $t_0 = (c/A)^2$. Для захисного шару 40 мм за A = 2,0 мм/рік^{0,5}, характерного для сухих опалюваних приміщень, t_0 = 400 років, тобто депасивація практично не настає; за A = 4,0 – 100 років; за A = 6,5 – 37,9 року; за A = 9,0 – лише 19,8 року (рис. 1.3). Отже, саме величина A, яка у вологих приміщеннях з кислими газами зростає в кілька разів, визначає довговічність конструкції.

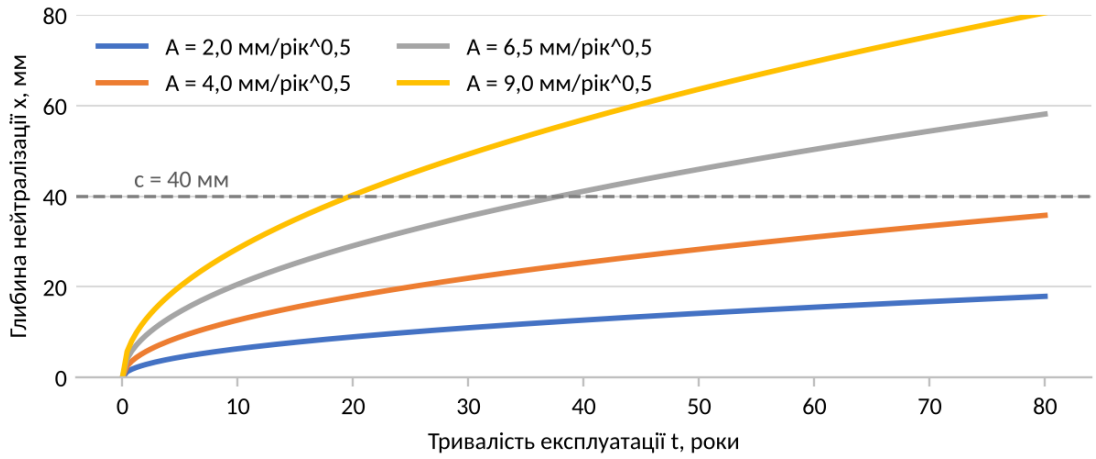

Рис. 1.3 Зростання глибини нейтралізації бетону за різних значень константи A (розрахунок автора за формулою (1.1))

Хлориди проникають у бетон переважно дифузією, і розподіл їх концентрації описується розв'язком другого закону Фіка для напівнескінченного тіла

$$C(x, t) = C_s \cdot [1 - \mathrm{erf}(x / (2 \cdot \sqrt{(D \cdot t)}))], \qquad (1.2)$$

де C_s – поверхнева концентрація; D – ефективний коефіцієнт дифузії; erf – функція помилок.

Для прикладу на рис. 1.4 прийнято C_s = 0,6 % маси цементу і $D = 1 \cdot 10^{-12}$ м^2/с (31,6 мм^2/рік), що відповідає щільному вологому бетону. На глибині 40 мм через 50 років концентрація становить 0,29 %, тобто ще не досягає критичного рівня 0,4 %, але за менш щільного бетону чи тоншого захисного шару поріг буде перевищено значно раніше.

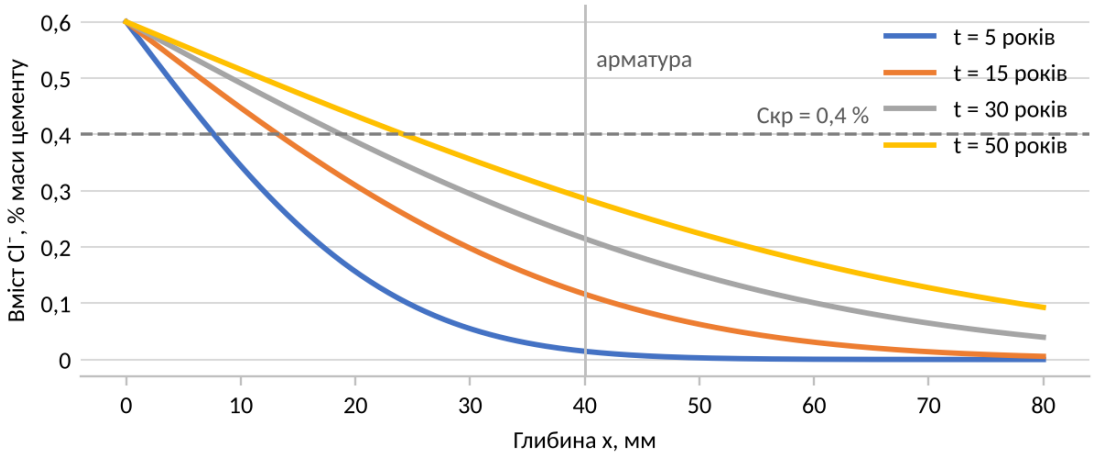

Рис. 1.4 Розподіл хлоридів за глибиною захисного шару в різні моменти часу (розрахунок автора за формулою (1.2))

1.3 Класифікація агресивних середовищ

Агресивні середовища поділяють за походженням, хімічною природою та агрегатним станом. За походженням вони бувають природні (ґрунтові та мінералізовані води, морське повітря) і техногенні. Техногенні середовища формуються міським господарством (стічні води, протиожеледні солі), промисловістю (викиди газів, технологічні розчини, пил) та сільським господарством (гноївка, аміак тваринницьких приміщень, мінеральні добрива). За хімічною природою розрізняють неорганічні середовища (кислоти, луги, солі, розчинні оксиди) та органічні (розчинники, нафтопродукти, жири, органічні кислоти).

Рідкі середовища найнебезпечніші: розчин безпосередньо контактує з цементним каменем, і швидкість корозії визначається концентрацією агента та його кислотністю. Тверді середовища (солі, пил, добрива) агресивні лише тоді, коли зволожуються і переходять у розчин; гігроскопічні речовини (аміачна селітра, хлорид кальцію) вбирають вологу з повітря навіть без прямого зволоження. Агресивність газових середовищ різко зростає з підвищенням відносної вологості повітря, особливо щодо арматури.

У чинних в Україні нормах ДСТУ Б В.2.6-145:2010 [11] і ДСТУ EN 206 [12] умови експлуатації описуються класами впливу середовища (табл. 1.1). Для

кожного класу встановлено мінімальний клас бетону, максимальне водоцементне відношення, мінімальну витрату цементу та товщину захисного шару, що дозволяє переходити від якісної оцінки агресивності до конкретних вимог до бетону.

Таблиця 1.1

Класи впливу середовища за ДСТУ EN 206 (узагальнено автором)

Група класів	**Вид впливу**	**Характерні умови**
X0	відсутність ризику корозії	бетон без арматури, сухе приміщення
XC1…XC4	корозія арматури від карбонізації	від сухого чи постійно вологого (XC1) до циклічного зволоження й висихання (XC4)
XD1…XD3	корозія від хлоридів неморського походження	помірна вологість (XD1) … циклічне зволоження розчинами солей (XD3)
XS1…XS3	корозія від хлоридів морської води	морське повітря … зона припливу й бризок
XF1…XF4	заморожування–відтавання	помірне водонасичення (XF1) … високе водонасичення з солями (XF4)
XA1…XA3	хімічна агресія ґрунтів і вод	слабо-, середньо- і сильноагресивне хімічне середовище

Для хімічної агресії класи XA1–XA3 встановлюють за граничними значеннями показників ґрунтових вод і ґрунтів (табл. 1.2). Для технологічних розчинів травильних відділень, у яких pH може бути нижчим за 4, норма вимагає спеціальних досліджень і, як правило, захисних покриттів.

Таблиця 1.2

Граничні значення показників хімічної агресії вод за ДСТУ EN 206

Показник	**XA1**	**XA2**	**XA3**
SO_4^{2-}, мг/л	≥ 200 і ≤ 600	> 600 і ≤ 3000	> 3000 і ≤ 6000
pH	≤ 6,5 і ≥ 5,5	< 5,5 і ≥ 4,5	< 4,5 і ≥ 4,0
CO_2 агресивний, мг/л	≥ 15 і ≤ 40	> 40 і ≤ 100	> 100 до насичення
NH_4^+, мг/л	≥ 15 і ≤ 30	> 30 і ≤ 60	> 60 і ≤ 100
Mg^{2+}, мг/л	≥ 300 і ≤ 1000	> 1000 і ≤ 3000	> 3000 до насичення

1.4 Первинний і вторинний захист залізобетону

Захист від корозії поділяють на первинний, що забезпечується під час проєктування й виготовлення конструкції, і вторинний, який застосовують, коли можливостей самого бетону недостатньо [11].

Первинний захист починається з вибору форми конструкції: поверхні мають бути без западин і горизонтальних полиць, де накопичуються рідини, слід передбачати ухили й водовідведення. Далі обирають вид цементу, щільність бетону, товщину захисного шару і вид арматури. Щільність бетону є найефективнішим чинником: зниження водоцементного відношення до 0,40–0,45 із застосуванням полікарбоксилатних суперпластифікаторів, введення мікрокремнезему або метакаоліну (5–10 % маси цементу), які зв'язують $Ca(OH)_2$ у стійкі гідросилікати, а також повітровтягувальних добавок для морозостійкості в рази зменшують проникність бетону [8]. Ефективними є і мігруючі інгібітори корозії арматури, які адсорбуються на поверхні сталі й гальмують анодний процес.

Вторинний захист охоплює:

– лакофарбові покриття на епоксидній, поліуретановій або акриловій основі товщиною 150–500 мкм;

– товстошарові покриття – полімерні мембрани, кислототривку футеровку цеглою або керамічною плиткою на силікатних чи епоксидних замазках;

– глибоке просочування бетону (силани, силоксани, кристалізуючі склади), яке гідрофобізує капіляри без утворення плівки;

– електрохімічні методи – катодний захист, реалкалізацію та знесолення захисного шару.

Порядок вибору засобів вторинного захисту встановлює ДСТУ Б В.2.6-145:2010 [11], а матеріали для ремонту й захисту бетону класифікує серія ДСТУ EN 1504 [13]. Для травильних відділень, де діють розчини сірчаної та соляної кислот, доцільним є комбінований захист: щільний бетон класу не нижче С30/37 з добавкою мікрокремнезему, гідроізоляційна мембрана та кислототривке облицювання підлоги з ухилами до трапів.

1.5 Методи розрахунку пошкоджених залізобетонних елементів

Для оцінювання несучої здатності конструкцій з корозійними пошкодженнями застосовують кілька підходів, які різняться точністю й трудомісткістю.

Метод граничних зусиль з прямокутною епюрою напружень у бетоні [14, 15] найпростіший. Пошкоджений шар у ньому або повністю виключають, зменшуючи робочу висоту, або зменшують розрахунковий опір усього стиснутого бетону. Площу арматури приймають за фактичним залишковим діаметром. Метод не дозволяє врахувати неоднорідність властивостей за висотою.

Нелінійна деформаційна модель [1, 2] базується на гіпотезі плоских перерізів, повних діаграмах «напруження – деформація» бетону й арматури та умовах рівноваги. Її теоретичні засади і практику застосування викладено в посібнику А. М. Бамбури та співавторів [16], покроковий приклад розрахунку плити наведено О. Петрухою [17]. Норми допускають і спрощені білінійні діаграми бетону й арматури, що дає змогу розв'язувати задачі міцності нормальних перерізів без складних ітерацій [2]. Н. К. Височан і Ю. А. Якименко [18] на основі лінеаризованих діаграм «момент – кривизна» розробили практичний метод розрахунку рам з урахуванням повзучості і тріщиноутворення; розбіжність з експериментом не перевищила близько 10 %. Модель природно узагальнюється на переріз, у якому кожне волокно має власні характеристики, тому саме вона є основою для розрахунку пошкоджених елементів.

Емпіричні та напівемпіричні моделі пов'язують зниження міцності з відсотком втрати маси сталі. J. Rodriguez та ін. [19] за випробуваннями балок зі штучно прискореною корозією запропонували враховувати зменшення площі стрижнів і втрату зчеплення; Y. Du та ін. [20] встановили, що межа текучості кородованих стрижнів зменшується приблизно на 0,5 % на кожний відсоток втрати маси. D. Coronelli і P. Gambarova [3] сформулювали рекомендації з

моделювання кородованих балок методом скінченних елементів з урахуванням зчеплення. На рис. 1.5 порівняно, як ці підходи впливають на розрахунковий граничний момент балки однакового перерізу.

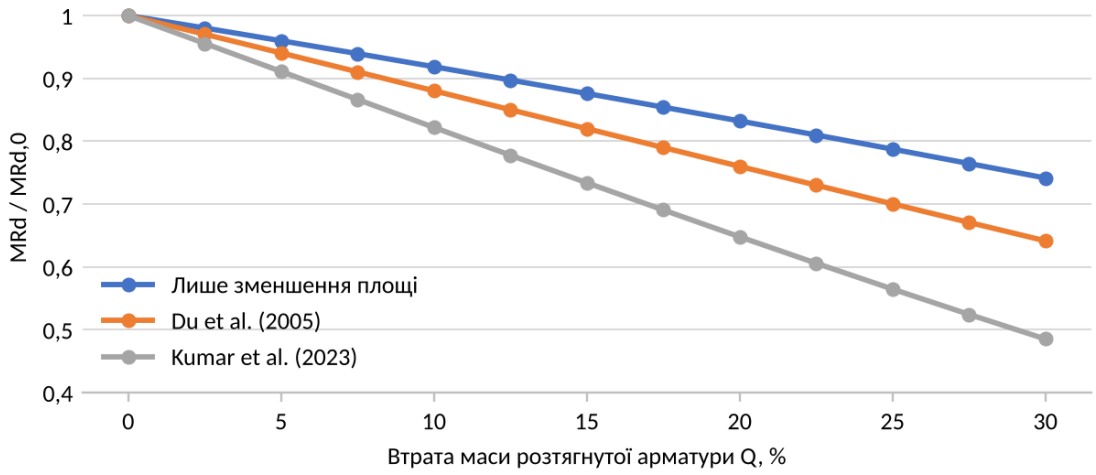

Рис. 1.5 Відносний граничний момент балки 250×500 мм залежно від втрати маси розтягнутої арматури за різними моделями зниження межі текучості (розрахунок автора за моделями Du et al., 2005, і Kumar et al., 2023)

За втрати маси 10 % граничний момент зменшується на 10,3 % лише через зменшення площі, на 15,0 % з урахуванням зниження межі текучості за [20] і на 22,2 % за коефіцієнтом 1,24 % на відсоток втрати, використаним у [21]. За втрати 30 % розбіжність між моделями сягає 26 % від початкового моменту. Отже, вибір моделі деградації сталі суттєво впливає на результат, і його слід обґрунтовувати даними обстеження.

Скінченно-елементні моделі дозволяють найповніше відтворити поведінку кородованих конструкцій. A. Kagermanov і I. Markovic [4] проаналізували техніки моделювання – від стрижневих волоконних елементів до тривимірних моделей з контактом «арматура – бетон» – і показали, що для оцінки несучої здатності достатньо волоконних моделей з модифікованими законами матеріалів. A. Bossio, S. Imperatore і M. Kioumarsi [22] нелінійним скінченно-елементним аналізом встановили, що за рівномірної корозії граничний згинальний момент зменшується приблизно лінійно із втратою маси, а піттінгова корозія спричиняє квазіпараболічне падіння і вже за втрати близько

5 % змінює характер руйнування. Прості аналітичні моделі з урахуванням зчеплення порівняно з розрахунком у пакеті ATENA в [21]. N. Jiang та ін. [5] запропонували модель для нерівномірної корозії, а R. Kumar та ін. [6] – прогноз залишкової згинальної несучої здатності методами машинного навчання.

Імовірнісні методи розглядають швидкості корозії та характеристики матеріалів як випадкові величини і визначають імовірність відмови в часі. Систематичний огляд L. S. Moreira та ін. [23] показав, що більшість таких робіт присвячено втраті перерізу арматури, тоді як деградація бетону стиснутої зони враховується рідко.

Отже, удосконалення доцільно спрямувати на поєднання деформаційної моделі з безперервним описом пошкодження бетону, урахування корозії арматури і прогнозу в часі, доповненого простим статистичним моделюванням, при збереженні постановки, зрозумілої інженеру-обстежувачу.

1.6 Висновки до розділу 1

1. Корозія бетону всіх трьох видів призводить до зниження міцності, модуля пружності та граничної стисливості поверхневого шару, тобто до пошарової неоднорідності стиснутої зони згинаних елементів.

2. Корозія арматури розвивається у дві стадії; тривалість стадії ініціювання визначається відношенням товщини захисного шару до константи нейтралізації, $t_0 = (c/A)^2$, і для c = 40 мм змінюється від 400 до 20 років при зростанні A від 2 до 9 мм/рік^{0,5}.

3. Агресивність середовищ доцільно оцінювати класами впливу за ДСТУ Б В.2.6-145:2010 і ДСТУ EN 206, а для захисту застосовувати щільний бетон з мінеральними добавками, мембрани та футеровку.

4. Наявні методи розрахунку переважно враховують втрату перерізу арматури; неоднорідність бетону стиснутої зони, корозія арматури і зміна стану в часі в одній інженерній моделі поєднуються рідко. Звідси завдання роботи: розробити такий алгоритм, реалізувати його програмно, дослідити вплив основних параметрів і застосувати для прогнозу ресурсу реальної конструкції.

Розділ 2

НОРМАТИВНА БАЗА ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ У М. КРОПИВНИЦЬКИЙ

2.1 Нормативна база розрахунку

Розрахункові положення роботи ґрунтуються на ДБН В.2.6-98:2009 [1], ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [2] і ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010 [15]; вимоги до надійності – на ДБН В.1.2-14:2018; обстеження – на ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 [24]; кліматичні дані – на ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [25]; класи впливу середовища і ремонтні матеріали – на [12, 13]. Головні положення, що визначають розрахунок, такі:

– класи бетону задаються за характеристичною циліндричною міцністю f_{ck} (C16/20, C25/30 тощо), а розрахункова міцність $f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$, $\gamma_c = 1{,}5$;

– параметри діаграми бетону (f_{cm}, E_{cm}, ε_{c1}, ε_{cu1}) визначаються за таблицею 3.1 ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010;

– арматура – зварюваний прокат А500С з $f_{yk} = 500$ МПа, $f_{yd} = 435$ МПа, $E_s = 200$ ГПа;

– надійність визначається з урахуванням класу наслідків будівлі; для виробничого корпусу прийнято клас CC2;

– технічний стан оцінюється за чотирма категоріями ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 [24].

У таблиці 2.1 наведено характеристики бетонів, прийнятих у числових дослідженнях. Їх обчислено програмою за формулами таблиці 3.1 Єврокоду 2 [15], що виключає похибки ручного переписування.

Таблиця 2.1

Характеристики бетонів за ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010 (обчислено автором)

Клас	f_{ck}, МПа	f_{cd}, МПа	f_{cm}, МПа	E_{cm}, ГПа	ε_{c1}, ‰	ε_{cu1}, ‰	k
C12/15	12	8,00	20	27,1	1,77	3,50	2,52
C16/20	16	10,67	24	28,6	1,87	3,50	2,35
C20/25	20	13,33	28	30,0	1,97	3,50	2,21
C25/30	25	16,67	33	31,5	2,07	3,50	2,07
C30/37	30	20,00	38	32,8	2,16	3,50	1,96
C35/45	35	23,33	43	34,1	2,25	3,50	1,87
C40/50	40	26,67	48	35,2	2,32	3,50	1,79
C45/55	45	30,00	53	36,3	2,40	3,50	1,72
C50/60	50	33,33	58	37,3	2,46	3,50	1,66

Коефіцієнт k у таблиці – параметр криволінійної діаграми (формула (4.1)); зі зростанням класу він зменшується, тобто діаграма стає ближчою до лінійної, а пластична ділянка коротшає. Ця властивість суттєво впливає на чутливість перерізу до пошкодження, що показано в розділі 5.

2.2 Кліматичні умови Кропивницького

Кропивницький розташований у центральній частині України, у долині р. Інгул, у степовій зоні з помірно континентальним кліматом. За ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [25] середньорічна температура повітря становить 8,1 °C, найхолодніший місяць – січень (−4,9 °C), найтепліший – липень (+20,4 °C) (рис. 2.1).

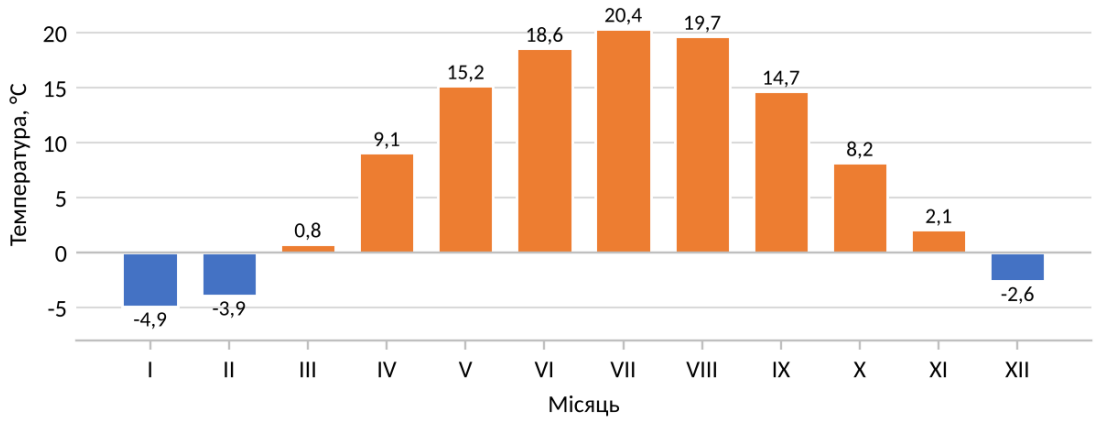

Рис. 2.1 Середньомісячна температура повітря в Кропивницькому (побудовано автором за даними ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010)

Для корозійних процесів кліматичні дані мають таке значення:

– чотири місяці на рік (грудень – березень, з урахуванням березня з температурою +0,8 °C) середня температура близька до нуля або від'ємна, тому зволожені поверхні конструкцій неопалюваних приміщень зазнають багаторазового заморожування і відтавання (класи XF1–XF3);

– у холодний період відносна вологість повітря висока, і в неопалюваних та періодично опалюваних виробничих приміщеннях на холодних поверхнях конструкцій випадає конденсат, у якому розчиняються кислі гази;

– у теплий період (травень – вересень, 14,7–20,4 °C) швидкість хімічних реакцій і корозії арматури у вологому бетоні найбільша;

– лесоподібні суглинки з високим рівнем ґрунтових вод у долинах Інгулу та Сугоклеї спричиняють капілярне підсмоктування вологи в нижні частини колон і фундаментів.

Інтенсивність нейтралізації залежить від вологості: максимальна швидкість карбонізації спостерігається при помірній вологості бетону, тоді як у вологому бетоні дифузія CO_2 сповільнюється, але різко зростає швидкість корозії вже депасивованої арматури [8]. Для внутрішніх зон з технологічними кислими газами в роботі прийнято розрахункову константу нейтралізації $A = 6{,}5$ мм/рік^{0,5}; на об'єкті її визначають фенолфталеїновою пробою (розділ 3), а вплив її відхилення оцінено аналізом чутливості (підрозділ 5.5).

2.3 Класи впливу середовища для конструкцій об'єкта

За ДСТУ EN 206 [12] та ДСТУ Б В.2.6-145:2010 [11] для конструкцій робочого майданчика травильного відділення визначено класи впливу середовища (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Класи впливу середовища для конструкцій травильного відділення

Конструкція, поверхня	**Клас впливу**	**Обґрунтування**	**Вимоги до нового бетону**
Верхня грань балок і плита під ваннами	XA2	проливи розчинів H_2SO_4 і HCl	C30/37, В/Ц ≤ 0,50, сульфатостійкий цемент, захисне покриття
Нижня грань балок (повітря цеху)	XC3 / XC4	вологе повітря, періодичний конденсат	C25/30, c ≥ 35 мм
Те саме з парами кислот	XA1	кислі гази у вологому повітрі	C30/37, мігруючий інгібітор
Колони біля підлоги	XF3 + XD2	миття підлог, розчини солей, замерзання при простоях	C30/37, повітровтягування 4–6 %

Фактичні конструкції об'єкта виготовлені з бетону класу B25 за проєктом 1988 р., що відповідає приблизно C20/25. Отже, вже на етапі зведення клас бетону не відповідав сучасним вимогам для класу XA2, що пояснює інтенсивну корозію стиснутої зони.

2.4 Висновки до розділу 2

1. Розрахунок пошкоджених елементів виконується за нелінійною деформаційною моделлю ДБН В.2.6-98:2009, ДСТУ Б В.2.6-156:2010 і ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010; характеристики бетонів обчислюються програмою за формулами норм.

2. Клімат Кропивницького із середньорічною температурою 8,1 °C, від'ємними температурами грудня – лютого та високою вологістю холодного періоду посилює агресивність кислих газів щодо арматури та спричиняє морозне руйнування зволоженого бетону.

3. Для верхньої грані балок травильного відділення встановлено клас впливу XA2, для нижньої – XC3/XC4 та XA1; фактичний бетон C20/25 не відповідає мінімальним вимогам для цих класів.

Розділ 3

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОГРАМА ОБСТЕЖЕННЯ

3.1 Характеристика об'єкта

Об'єктом дослідження прийнято одноповерхову виробничу будівлю машинобудівного підприємства в м. Кропивницький, зведену в 1988 р. Для числового прикладу узагальнено типові для таких будівель конструктивні рішення і характер пошкоджень. Будівля прольотом 18 м, довжиною 36 м і висотою до низу кроквяних конструкцій 7,2 м має каркас із залізобетонних колон і ферм. У травильному відділенні влаштовано монолітний залізобетонний робочий майданчик на відмітці +3,600, на якому встановлено ванни травлення сталевих деталей у розчинах сірчаної та соляної кислот (рис. 3.1).

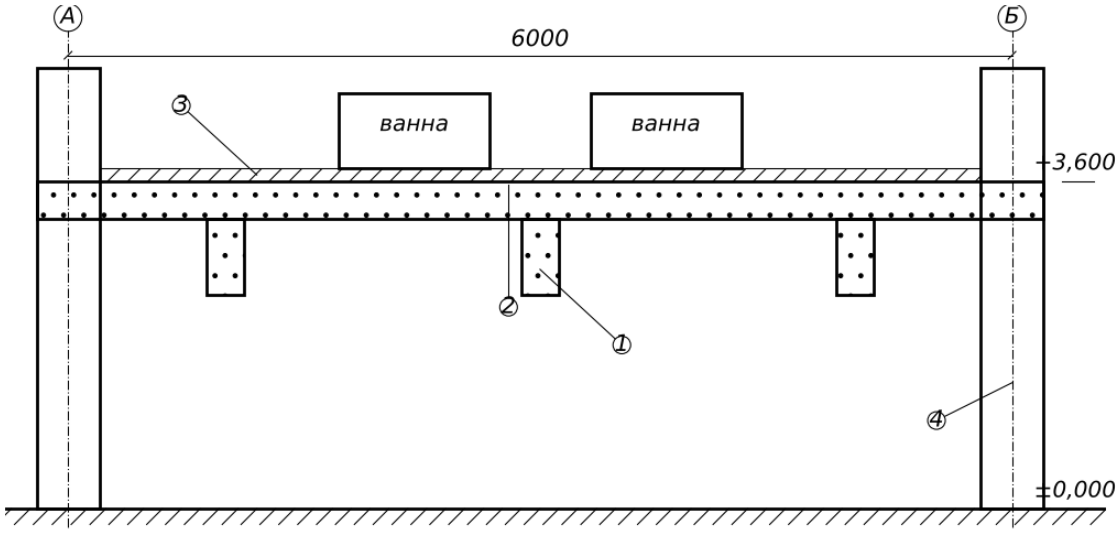

Рис. 3.1 Схематичний розріз робочого майданчика травильного відділення: 1 – балка Б-1; 2 – зона пошкодження стиснутої грані; 3 – кислототривке покриття; 4 – колона

Майданчик складається з монолітної плити товщиною 120 мм і балок Б-1 перерізом 250×500 мм прольотом 6,0 м з кроком 3,0 м. Балки армовані 4Ø20 у розтягнутій зоні та 2Ø10 у стиснутій зоні (у розрахунку прийнято характеристики А500С), захисний шар нижньої арматури – 40 мм, відстань від

верхньої грані до центра стиснутої арматури – 40 мм. Бетон балок – В25 (≈ С20/25).

За 38 років експлуатації кислототривке покриття майданчика неодноразово руйнувалося, і розчини кислот потрапляли на плиту та верхні грані балок у зоні примикання ванн. Крім того, повітря відділення містить пари сірчаної кислоти, SO_2 та HCl, а відносна вологість у зимовий період висока.

Розрахункові навантаження на балку Б-1 зібрано з урахуванням вантажної площі завширшки 3,0 м (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Навантаження на балку Б-1, кН/м

Вид навантаження	**Характеристичне**	**γ_f**	**Розрахункове**
Монолітна плита 120 мм з покриттям підлоги	12,30	1,1	13,53
Власна вага ребра балки 250×380 мм	2,38	1,1	2,62
Кислототривка футеровка та гідроізоляція	1,80	1,3	2,34
Технологічне обладнання (ванни травлення)	9,00	1,2	10,80
Корисне навантаження на майданчик	6,00	1,2	7,20
Разом	31,48		36,49

Максимальний розрахунковий згинальний момент у прольоті

$$M_{Ed} = q_d \cdot l^2 / 8 = 36{,}49 \cdot 6{,}0^2 / 8 = 164{,}2 \text{ кН·м}. \quad (3.1)$$

3.2 Програма обстеження

Обстеження виконують відповідно до ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 [24] у три етапи (рис. 3.2).



Рис. 3.2 Етапи обстеження залізобетонних конструкцій з корозійними пошкодженнями

Перший етап – попереднє обстеження. Вивчають проєктну та виконавчу документацію, журнали ремонтів, відомості про технологічний процес і склад агресивних речовин. Виконують суцільний візуальний огляд, фотофіксацію і складають карту дефектів, на якій для кожної балки фіксують зони відшарування бетону, висоли, іржаві патьоки, тріщини вздовж арматури, оголені стрижні.

Другий етап – детальне інструментальне обстеження. У характерних зонах визначають:

– міцність бетону неруйнівними методами (ультразвуковий імпульсний метод і пружний відскік) з обов'язковим калібруванням за кернами;

– профіль міцності за глибиною – послідовним зняттям шарів по 5–10 мм з вимірюванням відскоку або випробуванням кернів, розрізаних на диски;

– глибину нейтралізації – обробкою свіжого сколу 1 % спиртовим розчином фенолфталеїну;

– вміст хлоридів і сульфатів у пробах порошку, відібраних свердлінням на глибинах 0–10, 10–20, 20–30 і 30–50 мм;

– товщину захисного шару і діаметр арматури – магнітним методом і контрольними розкриттями; залишковий діаметр стрижнів після очищення від продуктів корозії вимірюють штангенциркулем;

– ширину розкриття тріщин – вимірювальним мікроскопом або щупами.

Третій етап – аналіз результатів і перевірочний розрахунок. За даними пошарових вимірювань будують профіль пошкодження k(y), визначають глибину δ і ступінь втрати арматури, виконують розрахунок за алгоритмом розділу 4, прогнозують зміну стану в часі і встановлюють категорію технічного стану.

3.3 Вихідні дані для розрахунку пошкодженого перерізу

Для числового прикладу прийнято такі результати пошарових вимірювань міцності бетону в зоні пошкодження верхньої грані балки Б-1 (табл. 3.2). Вони відповідають типовій картині кислотної корозії: верхній шар перетворений на пухку масу, далі міцність поступово зростає до міцності неушкодженого бетону.

Таблиця 3.2

Пошарове визначення міцності бетону балки Б-1 (вихідні дані прикладу)

Глибина від верхньої грані, мм	**Міцність f_c, МПа**	**$k = f_c / f_{c,0}$**	**pH (фенолфталеїн)**	**Стан бетону**
0…5	7,1	0,25	< 8	пухкий, розсипається
5…10	10,8	0,38	< 8	ослаблений, висоли
10…20	17,6	0,62	8…9	тріщинуватий
20…30	24,1	0,85	9…10	зміна кольору
30…50	28,4	1,00	> 12	неушкоджений

Апроксимація цих даних функцією $k(y) = k_{min} + (1 - k_{min})\cdot y/\delta$ методом найменших квадратів (рис. 3.3) дає $k_{min} = 0{,}18$ і $\delta = 30{,}0$ мм; сума квадратів відхилень становить лише 0,001, тобто лінійний профіль добре описує виміряний розподіл. Ці значення відповідають прогнозній глибині пошкодження $\delta(38) = 30{,}8$ мм, обчисленій у розділі 5. Глибина нейтралізації захисного шару з нижньої грані становить близько 40 мм, тобто наближається до товщини захисного шару; втрата перерізу розтягнутої арматури на момент обстеження незначна.

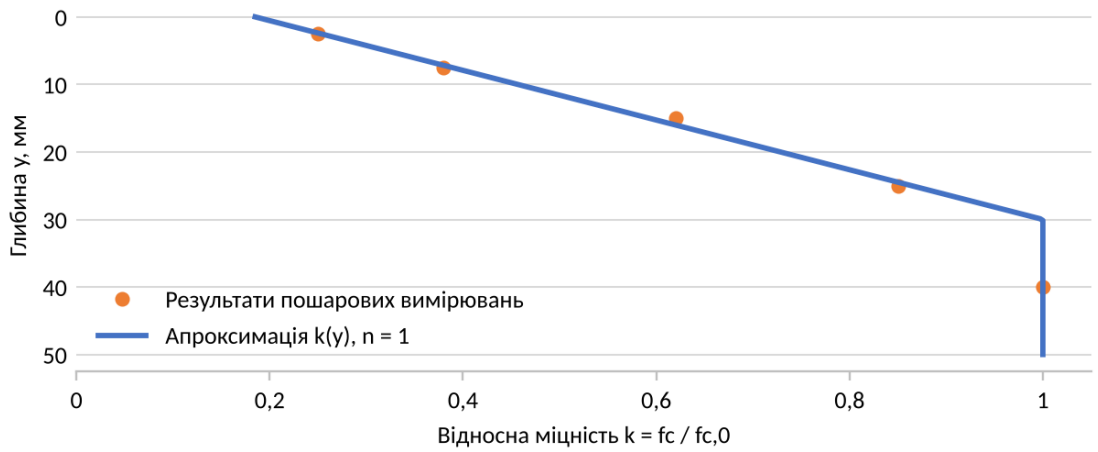

Рис. 3.3 Апроксимація профілю відносної міцності бетону балки Б-1 (розрахунок автора)

Інші характерні дефекти узагальнено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Характерні дефекти балок Б-1

Дефект	**Кількість балок**	**Можлива причина**
Руйнування бетону верхньої грані на глибину до 30 мм	4 з 6	проливи кислот через пошкоджену футеровку
Висоли й іржаві патьоки на бічних гранях	6 з 6	фільтрація розчинів крізь шви плити
Поздовжні тріщини вздовж нижньої арматури до 0,3 мм	2 з 6	початок корозії арматури
Оголення хомутів у торцях	2 з 6	недостатній захисний шар, протікання
Прогин до l/260	6 з 6	у межах допустимого l/200

3.4 Критерії оцінки технічного стану

За ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 [24] встановлено чотири категорії технічного стану: 1 – нормальний; 2 – задовільний; 3 – непридатний до нормальної експлуатації; 4 – аварійний. Для корозійно пошкоджених згинаних елементів у роботі запропоновано кількісні ознаки категорій, засновані на коефіцієнті використання несучої здатності $\eta = M_{Ed} / M_{Rd}(t)$ і стадії корозії арматури (табл. 3.4). Межі η прийнято так, щоб категорія 2 зберігала запас не менше 5 % на неточність вихідних даних, яку оцінено аналізом чутливості в підрозділі 5.5; остаточне віднесення до категорії виконує експерт з урахуванням усіх ознак.

Таблиця 3.4

Кількісні ознаки категорій технічного стану корозійно пошкоджених балок (пропозиція автора)

Категорія	**Коефіцієнт використання η**	**Стан арматури**	**Необхідні заходи**
1 – нормальний	$\eta \le 0{,}85$	пасивна, $x_н < c$	поточне обслуговування
2 – задовільний	$0{,}85 < \eta \le 0{,}95$	$x_н \approx c$, втрата до 5 %	відновлення захисту, моніторинг
3 – непридатний до нормальної експлуатації	$0{,}95 < \eta \le 1{,}0$	втрата 5–15 %, тріщини	ремонт, підсилення
4 – аварійний	$\eta > 1{,}0$	втрата понад 15 %, відшарування	негайне розвантаження, підсилення або заміна

3.5 Висновки до розділу 3

1. Як об'єкт прийнято робочий майданчик травильного відділення виробничої будівлі в Кропивницькому з балками Б-1 250×500 мм прольотом 6,0 м; розрахунковий момент $M_{Ed} = 164{,}2$ кН·м.

2. Розроблено триетапну програму обстеження з пошаровим визначенням міцності бетону, глибини нейтралізації, вмісту хлоридів і сульфатів та залишкового діаметра арматури.

3. Профіль пошкодження стиснутої зони апроксимується лінійною функцією з $k_{min} = 0{,}18$ і $\delta = 30$ мм; запропоновано кількісні ознаки категорій технічного стану через коефіцієнт використання η.

Розділ 4
УДОСКОНАЛЕНИЙ АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ ПОШКОДЖЕНОГО ПЕРЕРІЗУ

4.1 Основні передумови

Алгоритм базується на нелінійній деформаційній моделі ДБН В.2.6-98:2009 [1] і ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [2] і доповнює її описом неоднорідності бетону за висотою. Прийнято такі передумови:

– переріз залишається плоским після деформування (гіпотеза Бернуллі), а зчеплення арматури з бетоном повне;

– роботою бетону на розтяг у граничному стані нехтують;

– зв'язок напружень і деформацій здорового бетону описується криволінійною діаграмою ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010 [15], масштабованою до розрахункової міцності f_{cd};

– кожне волокно пошкодженого шару має власну міцність $k(y)\cdot f_{cd}$ і власну граничну деформацію $\varepsilon_{cu}(y)$; волокно, деформація якого перевищила $\varepsilon_{cu}(y)$, вважається зруйнованим і з розрахунку виключається;

– арматура працює за дволінійною діаграмою з граничною деформацією $\varepsilon_{ud} = 25$ ‰, а її площа зменшується відповідно до глибини корозії;

– граничний стан перерізу настає, коли деформація на межі здорового бетону досягає ε_{cu1} або деформація розтягнутої арматури досягає ε_{ud}; граничний момент визначається як максимум кривої «момент – кривизна».

Остання передумова принципова. Якщо граничну деформацію задавати на крайньому стиснутому волокні, як для неушкодженого перерізу, то в пошкодженому перерізі це волокно руйнується значно раніше за здоровий бетон, і розрахунок доводиться доповнювати підбором коефіцієнтів пружності чи деформацій арматури. Пошук максимуму M(к) автоматично враховує поступове виключення зруйнованих волокон і не потребує таких ітерацій.

4.2 Діаграми деформування бетону й арматури

Напруження в здоровому бетоні визначаються за залежністю

$$\sigma_c(\varepsilon) = f_{cd}\cdot(k\cdot\eta - \eta^2) / [1 + (k - 2)\cdot\eta],\quad \eta = \varepsilon / \varepsilon_{c1},\quad k = 1{,}05\cdot E_{cm}\cdot\varepsilon_{c1} / f_{cm}, \quad (4.1)$$

де ε_{c1} – деформація при максимальному напруженні; E_{cm} – середній модуль пружності; $f_{cm} = f_{ck} + 8$ МПа – середня міцність.

Діаграми, обчислені за формулою (4.1) для семи класів бетону, показано на рисунку 4.1. Зі зростанням класу збільшується крутизна висхідної гілки і зменшується пластична ділянка, тому бетони високих класів чутливіші до втрати поверхневого шару.

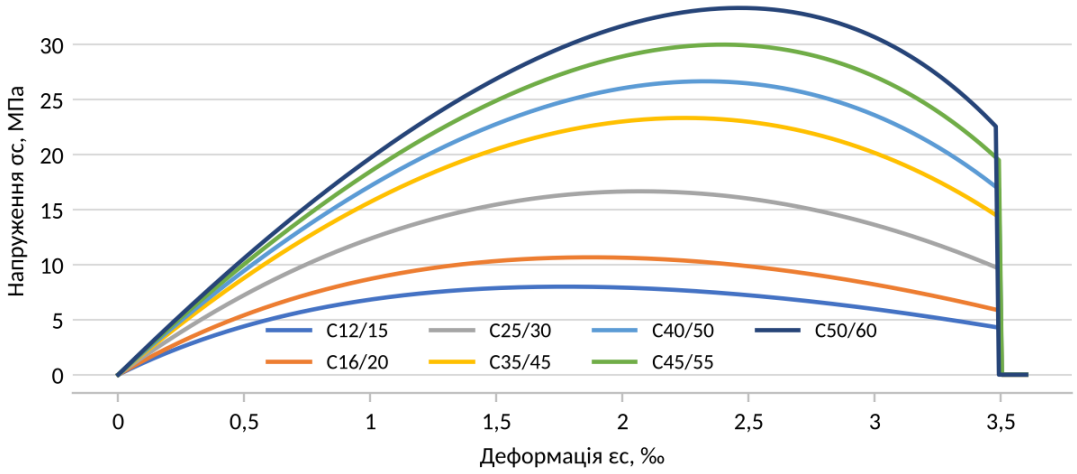

Рис. 4.1 Розрахункові криволінійні діаграми бетонів С12/15…С50/60 (розрахунок автора)

Для порівняння на рисунку 4.2 наведено діаграму арматури А500С та три види діаграм бетону С25/30, які допускають норми: криволінійну, параболічно-прямокутну і дволінійну [15]. Максимальне напруження всіх діаграм однакове, але площа під кривою різна, що позначається на висоті стиснутої зони та положенні рівнодійної.

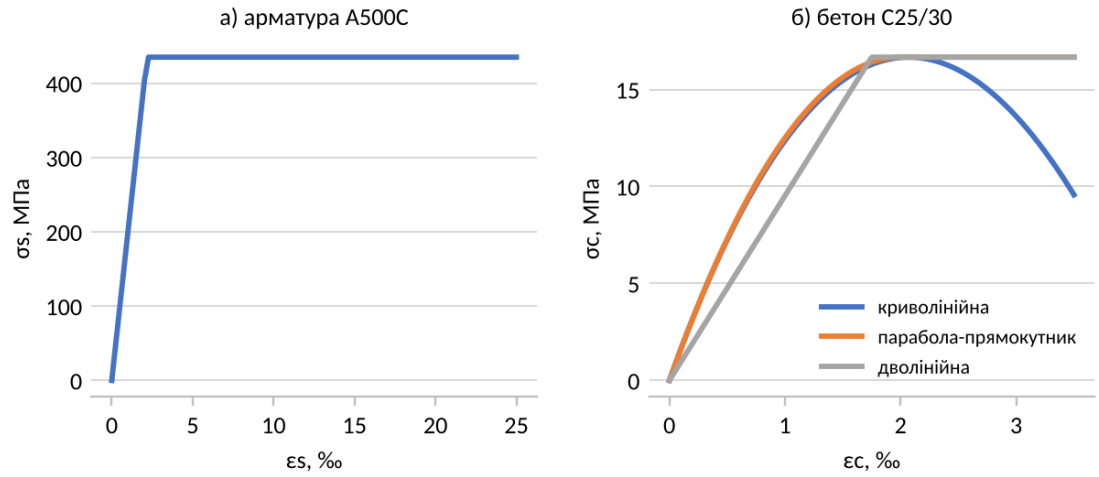

Рис. 4.2 Діаграма арматури A500C (а) та порівняння діаграм бетону C25/30 (б)

Напруження в арматурі

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s \text{ при } |\varepsilon_s| \le f_{yd}/E_s; \quad \sigma_s = f_{yd} \cdot \mathrm{sign}(\varepsilon_s) \text{ при } f_{yd}/E_s < |\varepsilon_s| \le \varepsilon_{ud}. \qquad (4.2)$$

4.3 Опис пошкодження стиснутої зони

Найпростіший опис пошкодженого бетону – поділ на кілька шарів з постійними властивостями (ступінчастий профіль). У роботі для порівняння розглянуто два шари: верхній завтовшки $\delta/3$ з міцністю $0{,}2 \cdot f_{cd}$ і $\varepsilon_{cu} = 1{,}0$ ‰ та нижній завтовшки $2\delta/3$ з міцністю $0{,}6 \cdot f_{cd}$ і $\varepsilon_{cu} = 2{,}0$ ‰. Такий опис зручний для ручного розрахунку, але має два недоліки: результат залежить від довільного розподілу товщини шарів, а на межі шарів властивості змінюються стрибком, якого в реальному бетоні немає (табл. 3.2).

Тому запропоновано задавати пошкодження безперервною функцією відстані y від стиснутої грані:

$$k(y) = k_{min} + (1 - k_{min}) \cdot (y/\delta)^n, \quad \varepsilon_{cu}(y) = \varepsilon_{cu,min} + (\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{cu,min}) \cdot (y/\delta)^n, \quad 0 \le y \le \delta, \qquad (4.3)$$

де δ – глибина пошкодження; k_{min} – відносна міцність на поверхні; $\varepsilon_{cu,min} = 1{,}0$ ‰ – гранична деформація поверхневого шару; n – показник форми профілю ($n = 1$ – лінійний, $n < 1$ – опуклий, з пошкодженням, зосередженим біля поверхні). При $y > \delta$ $k = 1$, $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1}$.

Параметри k_{min}, δ і n визначаються апроксимацією результатів пошарових вимірювань методом найменших квадратів (рис. 3.3). Порівняння профілів показано на рисунку 4.3: лінійний профіль з δ = 30 мм і k_{min} = 0,2 проходить між ступенями двошарової схеми, а режим «виключення шару» відповідає k = 0 на всій глибині δ.

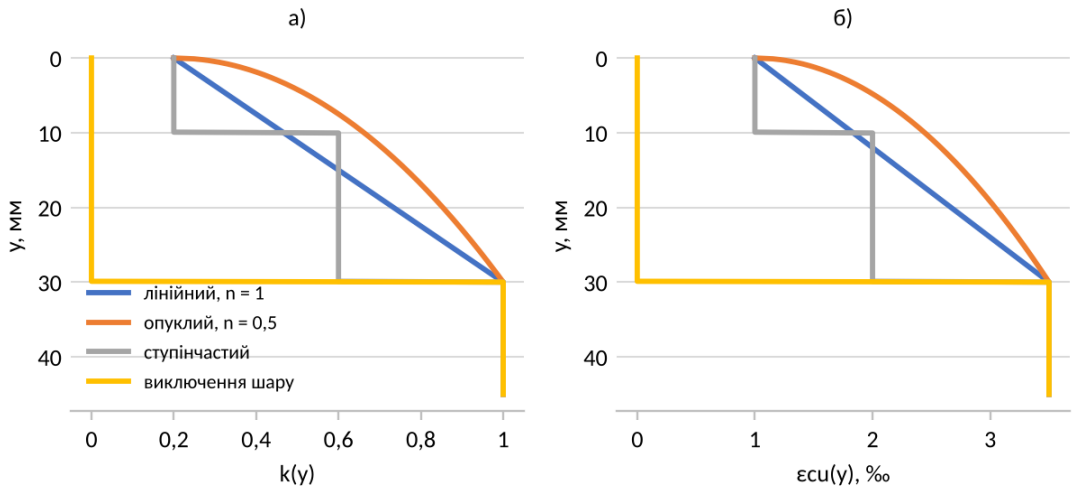

Рис. 4.3 Профілі відносної міцності k(y) (а) і граничної деформації $\varepsilon_{cu}(y)$ (б) при δ = 30 мм

4.4 Розрахункова схема та рівняння рівноваги

Переріз поділяється на волокна товщиною Δy = 0,5 мм (рис. 4.4). Деформація волокна на відстані y від стиснутої грані

$$\varepsilon(y) = \varepsilon_0 - \kappa \cdot y, \qquad (4.4)$$

де ε_0 – деформація стиснутої грані; κ – кривизна.

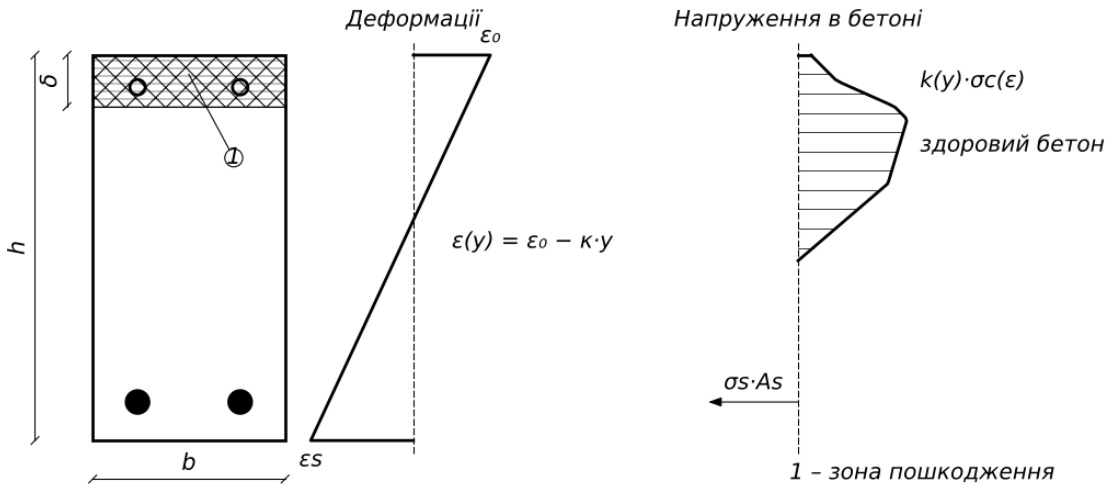

Рис. 4.4 Розрахункова схема пошкодженого перерізу: волокна, епюра деформацій і епюра напружень

Для кожного значення кривизни κ невідома ε_0 визначається з рівняння рівноваги поздовжніх сил

$$N(\varepsilon_0, \kappa) = \Sigma\, k(y_i)\cdot\sigma_c(\varepsilon_i)\cdot b\cdot\Delta y + \Sigma\, \sigma_{sj}\cdot A_{sj} = 0, \qquad (4.5)$$

де в першу суму входять лише волокна з $0 < \varepsilon_i \le \varepsilon_{cu}(y_i)$; друга сума – по всіх стрижнях з урахуванням зменшеної площі $A_{sj}(t)$.

Згинальний момент обчислюється відносно центра ваги перерізу:

$$M(\kappa) = \Sigma\, k(y_i)\cdot\sigma_c(\varepsilon_i)\cdot b\cdot\Delta y\cdot(h/2 - y_i) + \Sigma\, \sigma_{sj}\cdot A_{sj}\cdot(h/2 - y_{sj}). \qquad (4.6)$$

Функція $N(\varepsilon_0)$ монотонна, тому корінь знаходиться бісекцією на інтервалі $[-0{,}05;\ 0{,}05]$ за 50 ітерацій. Граничний момент

$$M_{Rd} = \max M(\kappa) \text{ за умов } \varepsilon(\delta) \le \varepsilon_{cu1},\quad \varepsilon_s \le \varepsilon_{ud}. \qquad (4.7)$$

4.5 Блок-схема та програмна реалізація

Послідовність розрахунку показано на рисунку 4.5. Алгоритм реалізовано мовою Python з бібліотекою NumPy; розрахунок одного перерізу з побудовою кривої M(κ) зі 220 кроків триває близько 0,1 с, що дозволяє виконувати масові параметричні та статистичні розрахунки.

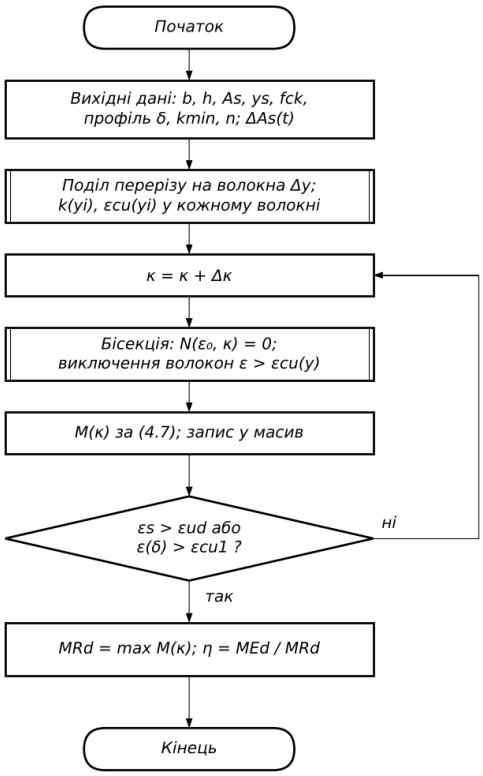

Рис. 4.5 Блок-схема удосконаленого алгоритму розрахунку

Відмінності запропонованого алгоритму від спрощених підходів, що застосовуються на практиці, узагальнено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Порівняння підходів до розрахунку пошкодженого перерізу

Ознака	**Спрощені підходи (виключення шару, ступінчасті шари)**	**Удосконалений алгоритм**
Опис пошкодження	k = 0 на глибині δ або кілька шарів з постійними властивостями	безперервна функція k(y), $\varepsilon_{cu}(y)$ з параметрами δ, k_{min}, n
Розв'язок	прямокутна епюра або ітерації за деформацією крайнього волокна	бісекція за ε_0 для кожної κ, максимум кривої M(κ)
Зруйновані волокна	не розглядаються явно	виключаються при $\varepsilon > \varepsilon_{cu}(y)$
Корозія арматури	зменшення площі на момент обстеження	$A_s(t)$ за моделлю депасивації та швидкості корозії
Прогноз у часі	відсутній	$M_{Rd}(t)$, детермінований і ймовірнісний ресурс
Перевірка	ручний розрахунок	програма, тестування на граничних випадках

Правильність програми перевірено на трьох граничних випадках: 1) для неушкодженого перерізу балки Б-1 результат (206,3 кН·м) відрізняється від

розрахунку за прямокутною епюрою (208,9 кН·м) на 1,3 %; 2) при $k(y) = 0$ результати волоконної моделі і прямокутної епюри з виключеним шаром відрізняються не більше ніж на 1–2 % (табл. 5.2); 3) при $\delta \to 0$ усі профілі пошкодження дають однаковий результат.

4.6 Висновки до розділу 4

1. Удосконалений алгоритм поєднує нелінійну деформаційну модель чинних норм з безперервним описом пошкодження бетону $k(y)$, $\varepsilon_{cu}(y)$ і виключенням зруйнованих волокон.

2. Граничний момент визначається як максимум кривої $M(\kappa)$, що усуває ітераційний підбір коефіцієнтів і робить результат незалежним від припущень про деформацію крайнього волокна.

3. Алгоритм реалізовано програмно і перевірено на граничних випадках; відхилення від методу прямокутної епюри для неушкодженого перерізу становить 1,3 %.

Розділ 5
ЧИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОГНОЗ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ

5.1 Вплив класу бетону і діаметра арматури

Для параметричних досліджень прийнято зразок перерізом 120×180 мм із симетричним армуванням по два стрижні Ø8, Ø10 або Ø12 A500C у розтягнутій і стиснутій зонах, відстань до центрів стрижнів 25 мм. Такі малі зразки поширені в експериментальних дослідженнях кородованих балок [19, 22], що полегшує зіставлення. Розглянуто класи бетону C12/15…C50/60 і чотири варіанти: без пошкодження; ступінчастий профіль; лінійний профіль з $\delta = 30$ мм і $k_{min} = 0{,}2$; виключення шару 30 мм. Результати наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Граничний згинальний момент M_{Rd} зразка 120×180 мм, кН·м (розрахунок автора)

Варіант	C12/15	C16/20	C25/30	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
Ø8, без пошкодження	5,95	6,06	6,25	6,44	6,52	6,60	6,67
Ø8, ступінчастий профіль	5,66	5,69	5,77	5,83	5,85	5,87	5,89
Ø8, лінійний профіль	5,67	5,69	5,78	5,84	5,87	5,89	5,91
Ø8, виключення шару	5,67	5,66	5,66	5,65	5,65	5,65	5,65
Ø10, без пошкодження	9,10	9,23	9,46	9,68	9,78	9,87	9,96
Ø10, ступінчастий профіль	8,86	8,85	8,89	8,97	9,00	9,03	9,05
Ø10, лінійний профіль	8,87	8,87	8,89	8,96	9,00	9,03	9,05
Ø10, виключення шару	8,86	8,86	8,85	8,84	8,84	8,84	8,84
Ø12, без пошкодження	12,95	13,08	13,35	13,60	13,71	13,82	13,92
Ø12, ступінчастий профіль	12,76	12,76	12,75	12,78	12,82	12,85	12,89
Ø12, лінійний профіль	12,77	12,77	12,77	12,79	12,82	12,85	12,87
Ø12, виключення шару	12,77	12,76	12,76	12,75	12,75	12,74	12,74

Криві «момент – кривизна» для бетону C16/20 і арматури Ø8 показано на рисунку 5.1. Пошкодження майже не змінює початкової жорсткості, але знижує максимум кривої та скорочує граничну кривизну, бо зруйновані волокна виключаються з роботи раніше.

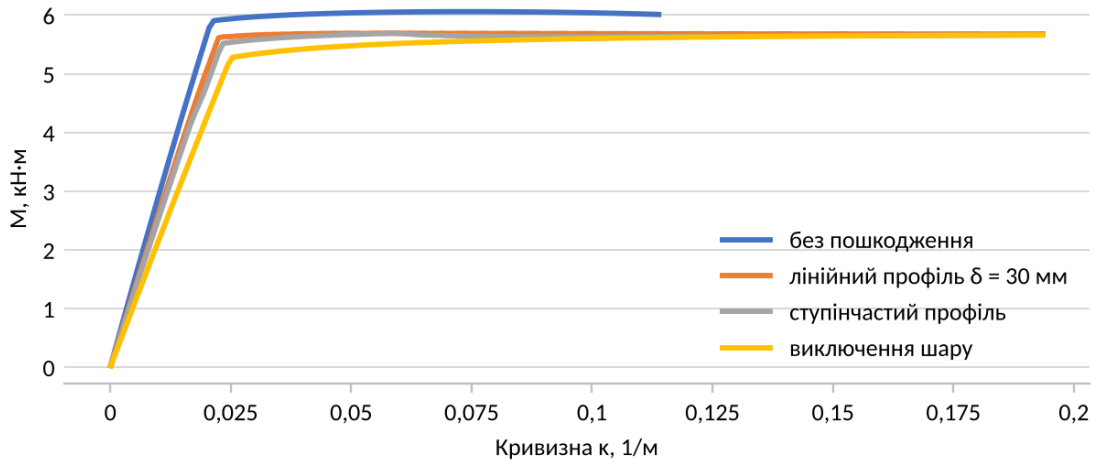

Рис. 5.1 Криві «момент – кривизна» зразка 120×180 мм, C16/20, 2Ø8 + 2Ø8 A500C (розрахунок автора)

Епюри напружень у бетоні в граничному стані (рис. 5.2) пояснюють механізм: у пошкодженому перерізі стиснута зона зміщується вниз, верхні 10–15 мм майже не працюють, а рівнодійна стискальних зусиль наближається до розтягнутої арматури. Плече внутрішньої пари зменшується, і граничний момент знижується навіть тоді, коли міцність здорового бетону лишається незмінною.

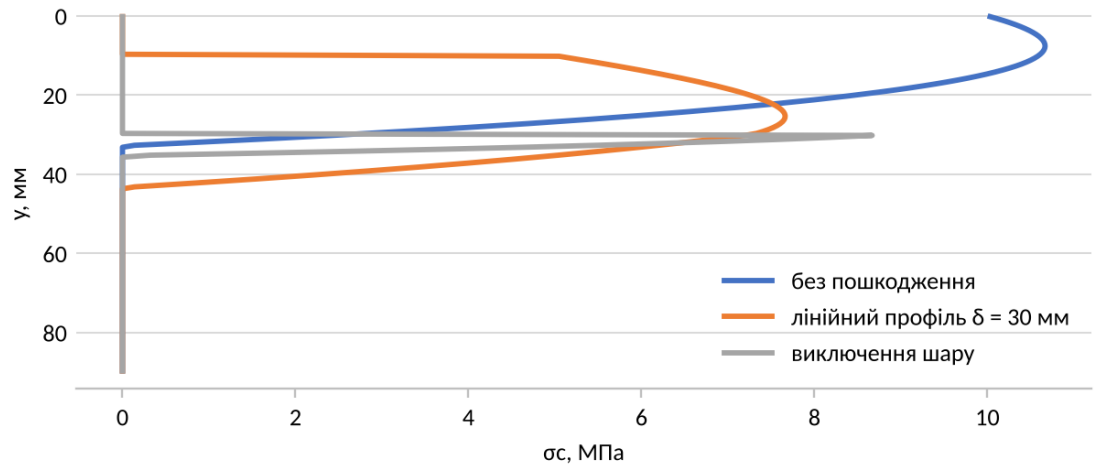

Рис. 5.2 Епюри напружень у стиснутій зоні в граничному стані (C16/20, Ø8)

Залежність M_{Rd} від класу бетону наведено на рисунку 5.3, а відносне зниження – на рисунку 5.4.

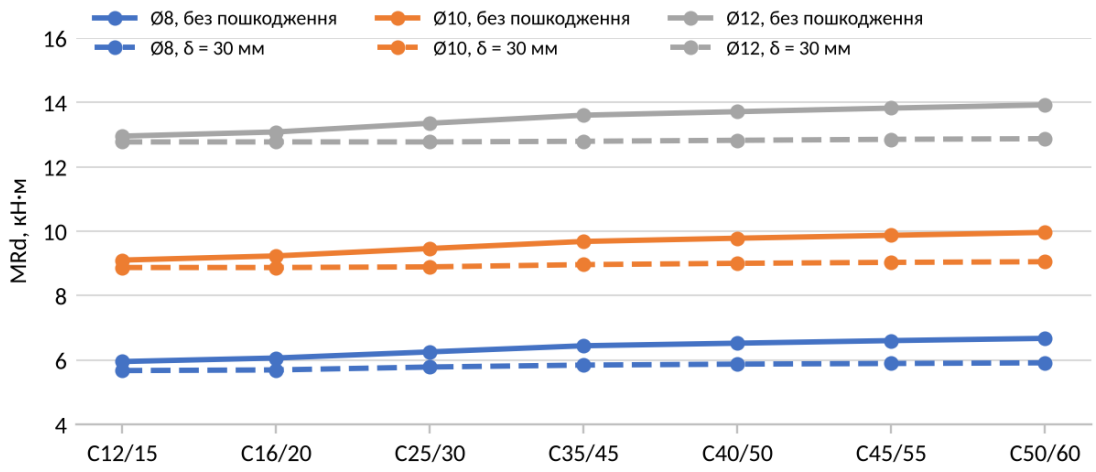

Рис. 5.3 Залежність граничного моменту від класу бетону: суцільні лінії – без пошкодження, штрихові – лінійний профіль δ = 30 мм

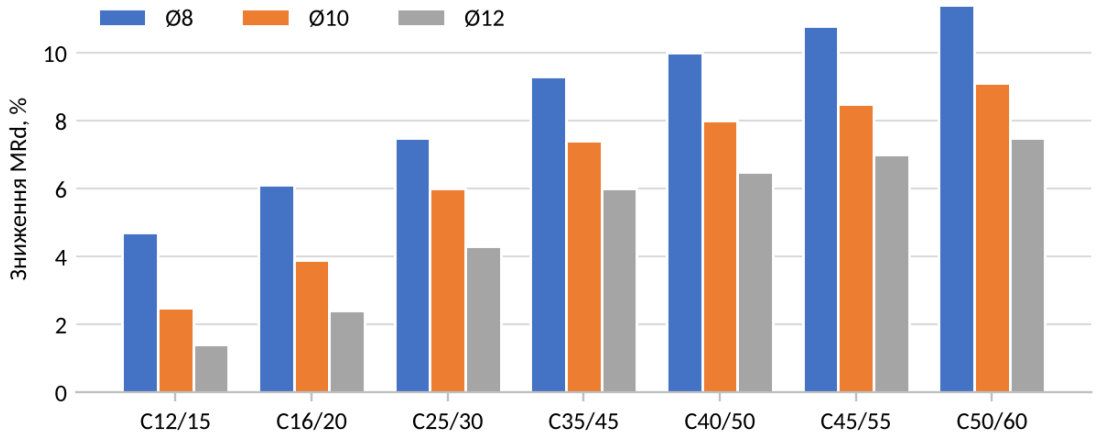

Рис. 5.4 Відносне зниження M_{Rd} при δ = 30 мм залежно від класу бетону і діаметра арматури

Зниження несучої здатності зростає з підвищенням класу бетону: для Ø8 – від 4,7 % (C12/15) до 11,4 % (C50/60), для Ø12 – від 1,4 до 7,5 %. Пояснення таке: у міцнішому бетоні стиснута зона коротша, тому пошкоджений шар фіксованої товщини займає більшу її частку. Зі збільшенням діаметра арматури втрати зменшуються (для C25/30 – 7,5 % при Ø8 і 4,3 % при Ø12), оскільки зростає частка моменту, що сприймається парою «стиснута – розтягнута арматура». Ступінчастий профіль дає практично ті самі значення, що й лінійний (розбіжність не більше 0,02 кН·м), а виключення шару – до 4,4 % менші (Ø8,

C50/60). Отже, для симетрично армованого перерізу спосіб опису пошкодження впливає порівняно мало, бо стиснута арматура компенсує втрату бетону.

5.2 Вплив глибини пошкодження та способу її опису

Симетричне армування маскує вплив пошкодження бетону: стиснута арматура бере на себе значну частину зусилля. Тому для дослідження впливу глибини δ розглянуто зразок з одиночним армуванням: 120×180 мм, C25/30, 2Ø12 A500C у розтягнутій зоні і 2Ø6 конструктивно у стиснутій (табл. 5.2, рис. 5.5).

Таблиця 5.2

Граничний момент зразка з одиночним армуванням залежно від глибини пошкодження, кН·м

δ, мм	Ступінчастий	Лінійний, n = 1	Опуклий, n = 0,5	Виключення шару (волокна)	Виключення шару (прямокутна епюра)
0	13,04	13,04	13,04	13,04	13,21
10	12,39	12,55	12,70	12,39	12,50
20	11,95	12,11	12,40	11,70	11,80
30	11,28	11,71	12,14	10,96	11,06
40	10,55	11,35	11,90	10,22	10,32
50	9,95	11,00	11,70	9,48	9,59
60	9,44	10,62	11,49	8,75	8,85

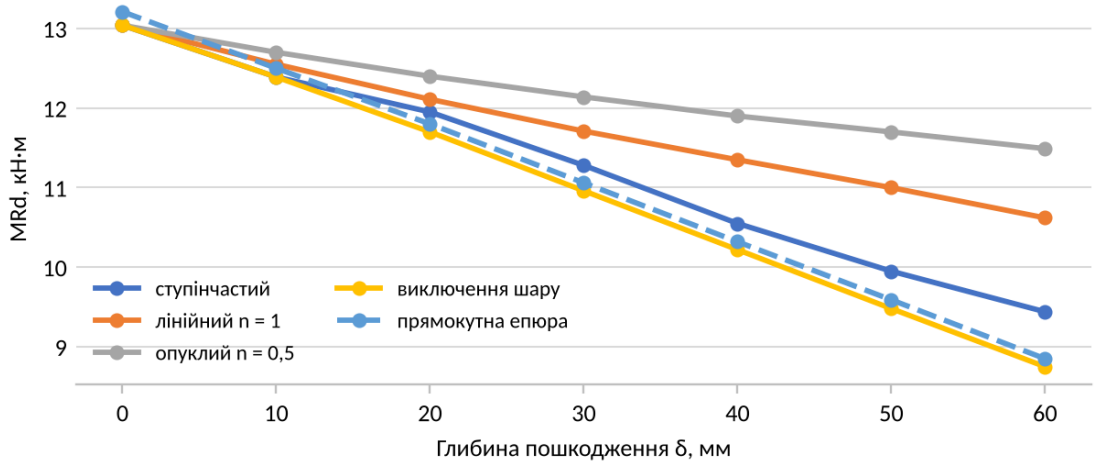

Рис. 5.5 Залежність M_{Rd} від глибини пошкодження при різних способах її опису (розрахунок автора)

При δ = 30 мм лінійний профіль дає зниження 10,2 %, опуклий (n = 0,5) – 6,9 %, ступінчастий – 13,5 %, повне виключення шару – 16,0 %. Отже, ступінчаста схема і традиційне виключення шару занижують несучу здатність на 3,7–6,4 % порівняно з безперервним лінійним профілем, а при δ = 60 мм виключення шару дає момент на 17,6 % менший. Метод прямокутної епюри з виключенням шару майже збігається з волоконною моделлю з k = 0 (розбіжність до 1,3 %), що підтверджує коректність програми. Для оцінювання реальних конструкцій пропонується лінійний профіль: він ґрунтується на виміряному розподілі міцності і не вимагає довільного поділу на шари.

5.3 Вплив коефіцієнта армування

Вплив армування досліджено для δ = 30 мм при ρ = 0,3…1,5 % і трьох класах бетону (рис. 5.6).

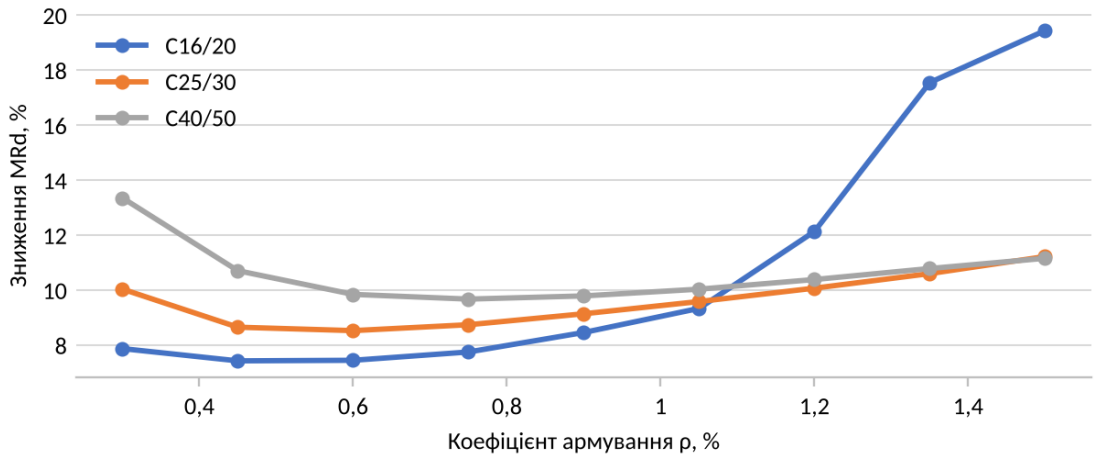

Рис. 5.6 Відносне зниження M_{Rd} при δ = 30 мм залежно від коефіцієнта армування (розрахунок автора)

Залежність має мінімум. При малому армуванні (ρ = 0,3 %) стиснута зона невисока і значною мірою потрапляє в пошкоджений шар, тому для бетону C40/50 втрати сягають 13,3 %. При ρ ≈ 0,5–0,9 % втрати найменші (8,5 % для C25/30), а при наближенні до граничного армування стиснута зона стає високою, бетон працює на повну міцність, і втрата його частини знову різко знижує M_{Rd} – для C16/20 до 19,4 % при ρ = 1,5 %. Отже, вплив корозії бетону на несучу здатність не можна оцінювати без урахування армування і класу бетону.

Комбінований вплив глибини пошкодження і армування для бетону C25/30 показано у вигляді теплової карти (рис. 5.7). Її можна використовувати для швидкої оцінки під час обстеження: зелена зона ($M_{Rd}/M_{Rd,0} \geq 0,95$) відповідає незначному впливу пошкодження, жовта – потребує уточненого розрахунку за алгоритмом розділу 4.



Рис. 5.7 Відношення M_{Rd} пошкодженого і неушкодженого перерізу (C25/30, лінійний профіль, $k_{min} = 0,2$)

Для перевірки, чи можна замінити розрахунок простою формулою, усі 56 точок теплової карти оброблено регресійним аналізом у координатах «відносна глибина пошкодження δ/x_0 – зниження M_{Rd}», де x_0 – висота стиснутої зони неушкодженого перерізу в граничному стані (рис. 5.8). Найкраща степенева апроксимація

$$\Delta M / M_{Rd,0} = 0,103 \cdot (\delta / x_0)^{0,626} \qquad (5.1)$$

має коефіцієнт детермінації лише $R^2 = 0,42$. Тобто одна безрозмірна величина δ/x_0 пояснює менше половини розкиду результатів; решта зумовлена зміною плеча внутрішньої пари та роботою стиснутої арматури. Формулу (5.1) можна використовувати лише для попередньої оцінки, а остаточний розрахунок виконувати за алгоритмом.

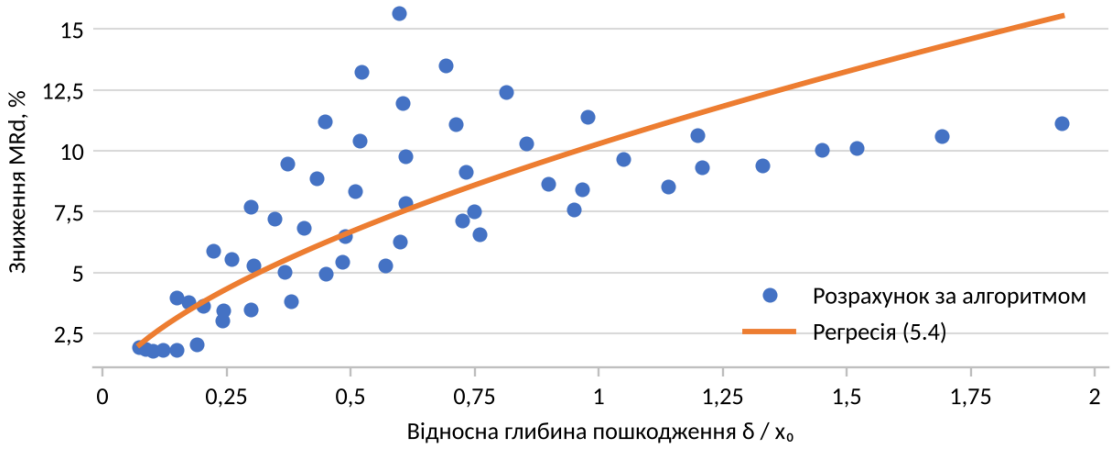

Рис. 5.8 Зниження M_{Rd} залежно від відносної глибини пошкодження і регресійна залежність (5.1)

5.4 Прогноз несучої здатності балки Б-1 у часі

Для балки Б-1 побудовано модель зміни стану в часі, яка враховує два процеси. Пошкодження бетону стиснутої зони від кислотних проливів описано параболічним законом

$$\delta(t) = K_\delta \cdot \sqrt{t}, \quad K_\delta = 5{,}0 \text{ мм/рік}^{0,5}, \tag{5.2}$$

що відповідає δ = 30,8 мм через 38 років і узгоджується з даними табл. 3.2. Корозія розтягнутої арматури починається після депасивації в момент

$$t_0 = (c / A)^2 = (40 / 6{,}5)^2 = 37{,}9 \text{ року}, \tag{5.3}$$

після чого діаметр стрижня зменшується зі швидкістю, пропорційною густині струму корозії i_{corr}:

$$d(t) = d_0 - 2 \cdot 0{,}0116 \cdot i_{corr} \cdot (t - t_0), \tag{5.4}$$

де 0,0116 – коефіцієнт переходу від мкА/см^2 до мм/рік; i_{corr} = 2,0 мкА/см^2 – прийнято для середньої інтенсивності корозії у вологому бетоні [19, 20]. Прийнято рівномірну корозію; можливий вплив піттінгу [9, 22] оцінено в ймовірнісному аналізі через розкид i_{corr}.

Зміну глибини пошкодження бетону і втрати площі арматури показано на рисунку 5.9, а розрахунок $M_{Rd}(t)$ – у таблиці 5.3 і на рисунку 5.10.

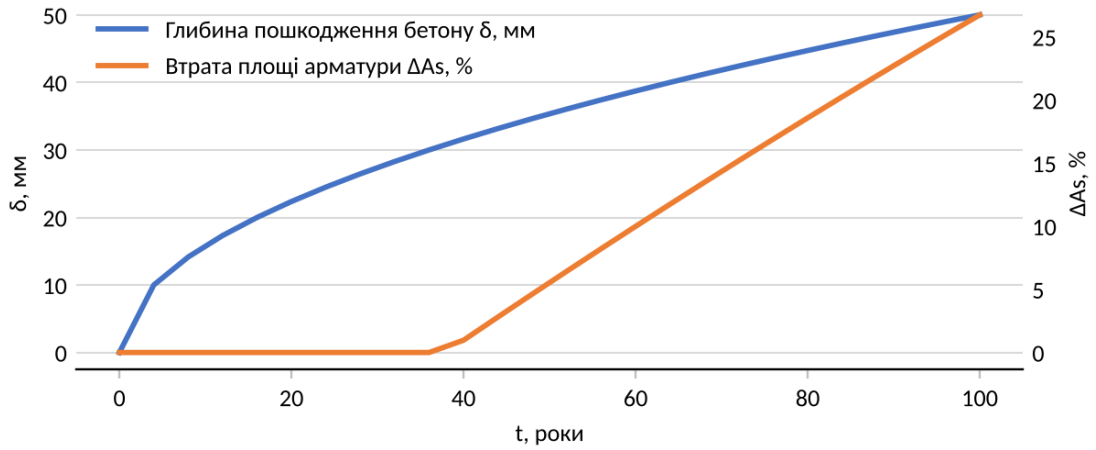

Рис. 5.9 Розвиток пошкодження бетону і втрати площі арматури балки Б-1 у часі (розрахунок автора)

Таблиця 5.3

Прогноз несучої здатності балки Б-1 (M_{Ed} = 164,2 кН·м)

t, роки	**δ, мм**	**ΔA_s, %**	**M_{Rd}, кН·м (алгоритм)**	**M_{Rd}, кН·м (виключення шару)**	**$\eta = M_{Ed}/M_{Rd}$**
0	0,0	0,0	206,3	206,3	0,80
10	15,8	0,0	201,4	198,9	0,82
20	22,4	0,0	199,3	195,8	0,82
30	27,4	0,0	197,9	193,4	0,83
38	30,8	0,1	196,8	191,6	0,83
40	31,6	1,0	195,2	190,0	0,84
50	35,4	5,5	187,1	181,5	0,88
60	38,7	10,0	179,2	173,5	0,92
70	41,8	14,4	171,5	165,5	0,96
80	44,7	18,6	164,0	158,0	1,00
90	47,4	22,7	156,5	150,4	1,05

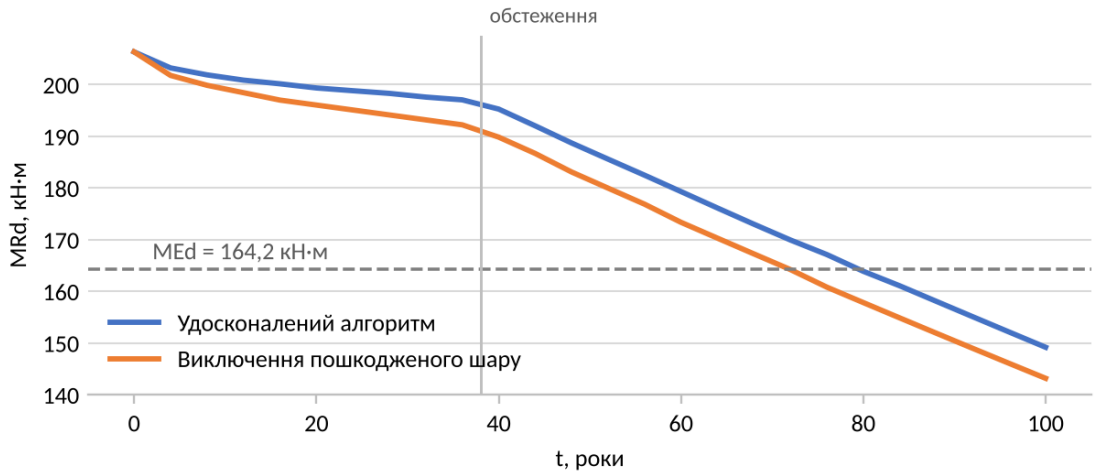

Рис. 5.10 Зміна граничного моменту балки Б-1 у часі і визначення залишкового ресурсу (розрахунок автора)

До депасивації арматури несуча здатність знижується повільно – на 4,6 % за 38 років, оскільки балка армована помірно і має стиснуту арматуру. Після початку корозії арматури швидкість зниження зростає приблизно втричі (з 0,25 до 0,78 кН·м за рік), і саме корозія розтягнутих стрижнів визначає ресурс. Умова $M_{Rd}(t) = M_{Ed}$ виконується при t = 79,7 року за удосконаленим алгоритмом і при t = 72,0 року за спрощеним підходом із виключенням пошкодженого шару. Отже, на момент обстеження (38 років) залишковий ресурс балки становить близько 42 років без ремонту, а спрощений підхід зменшує його приблизно на 8 років.

Поточний граничний момент M_{Rd} = 196,8 кН·м, коефіцієнт використання η = 0,83. За несучою здатністю балка відповідає категорії 1, але з огляду на досягнення фронтом нейтралізації арматури та тріщини вздовж стрижнів її стан оцінено як категорія 2 – задовільний. Без ремонту приблизно через 30 років (t ≈ 70 років) η досягне 0,96, і балка перейде до категорії 3.

5.5 Аналіз чутливості та ймовірнісна оцінка ресурсу

Вихідні параметри моделі визначаються з похибкою, тому оцінено чутливість M_{Rd} через 50 років експлуатації (базове значення 187,1 кН·м) до зміни кожного параметра на ±20 % і класу бетону на один ступінь (рис. 5.11).

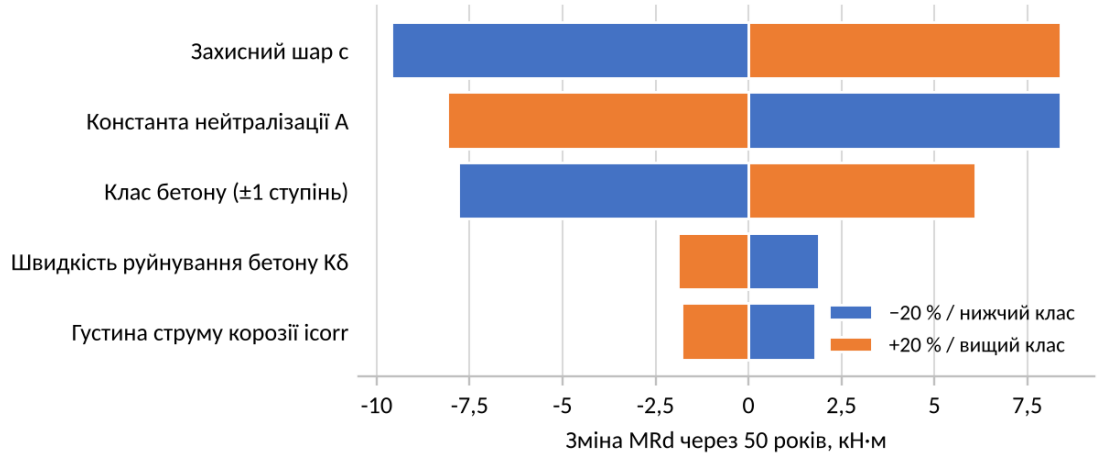

Рис. 5.11 Чутливість M_{Rd} балки Б-1 через 50 років до вихідних параметрів (розрахунок автора)

Найбільший вплив мають товщина захисного шару c і константа нейтралізації A (до ±8–10 кН·м), які визначають момент початку корозії арматури, та клас бетону. Швидкість руйнування бетону зверху K_δ і густина струму корозії впливають значно менше (±1,8–1,9 кН·м). Звідси практична рекомендація: під час обстеження найретельніше слід визначати глибину нейтралізації над арматурою, фактичну товщину захисного шару і міцність здорового бетону.

Оскільки всі ці параметри випадкові, виконано статистичне моделювання методом Монте-Карло (N = 300 реалізацій). Прийнято такі розподіли: A – логнормальний із середнім 6,5 мм/рік^{0,5} і коефіцієнтом варіації 0,25; i_{corr} – логнормальний, 2,0 мкА/см^2, 0,40; K_δ – нормальний, 5,0 ± 1,0 мм/рік^{0,5}; c – нормальний, 40 ± 5 мм; f_{ck} – нормальний, 20 ± 3 МПа. Такий підхід відповідає рекомендаціям огляду [23]. Для кожної реалізації ресурс визначено бісекцією за умовою $M_{Rd}(T) = M_{Ed}$ (рис. 5.12).

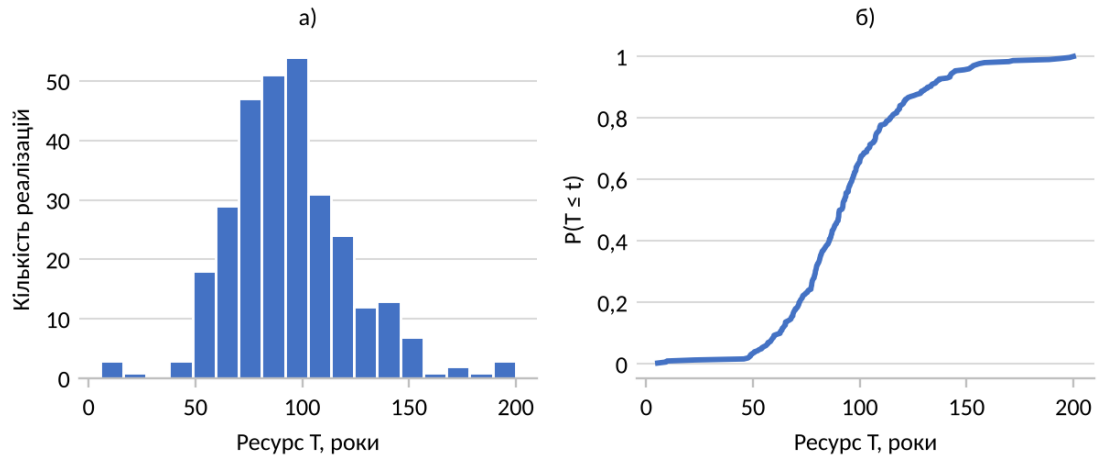

Рис. 5.12 Розподіл залишкового ресурсу балки Б-1 за методом Монте-Карло: а – гістограма; б – функція розподілу (розрахунок автора)

Медіана ресурсу становить 91,0 року, середнє – 94,0 року, 5 %-квантиль – 54,2 року. Імовірність вичерпання несучої здатності раніше ніж через 50 років від початку експлуатації – 3,3 %, раніше ніж через 60 років – 9,3 %. Детерміноване значення 79,7 року близьке до медіани, але 5 %-квантиль на 26 років менший, тобто рішення про строки ремонту доцільно приймати за нижнім квантилем, а не за середнім прогнозом.

5.6 Заходи з відновлення та підсилення

З урахуванням категорії стану і прогнозу для балок Б-1 запропоновано такий комплекс робіт (рис. 5.13):

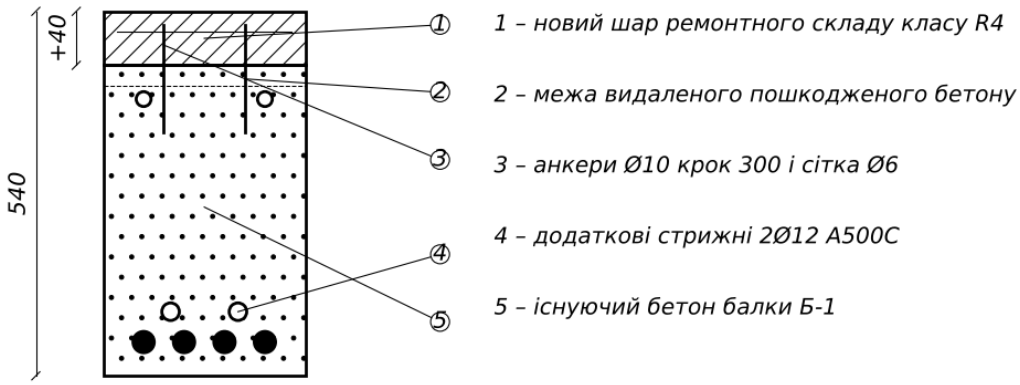

Рис. 5.13 Схема ремонту балки Б-1 з відновленням стиснутої зони

1) розвантаження майданчика, демонтаж ванн і зруйнованої футеровки;

2) видалення пошкодженого бетону верхньої грані гідроструменевим способом до здорового шару з міцністю на відрив не менше 1,5 МПа; знепилення і зволоження основи;

3) очищення оголеної арматури, нанесення антикорозійного цементно-полімерного складу; у нижній зоні – просочення мігруючим інгібітором корозії з поверхні;

4) установлення анкерів Ø10 з кроком 300 мм і сітки Ø6 для зв'язку нового шару зі старим бетоном;

5) нарощування стиснутої зони безусадковим ремонтним складом класу R4 за ДСТУ EN 1504-3 [13] із збільшенням висоти перерізу на 40 мм методом мокрого торкретування; догляд за бетоном протягом 7 діб;

6) підсилення розтягнутої зони двома додатковими стрижнями Ø12 А500С у торкрет-шарі з анкеруванням на опорах;

7) влаштування гідроізоляційної мембрани та кислототривкої футеровки підлоги з ухилом 1 % до трапів.

Граничний момент відремонтованої балки (h = 540 мм, міцність нового шару консервативно прийнята як для бетону С20/25) за розрахунком програмою становить 259,9 кН·м, коефіцієнт використання $\eta = 0{,}63$. Перед виконанням робіт необхідно розробити проєкт підсилення з перевіркою зчеплення нового бетону зі старим і роботи анкерів.

5.7 Висновки до розділу 5

1. Для зразка 120×180 мм із симетричним армуванням пошкодження стиснутої зони на 30 мм знижує M_{Rd} на 1,4–11,4 %; втрати зростають із класом бетону і зменшуються зі збільшенням діаметра арматури.

2. Для одиночного армування ступінчастий опис пошкодження і виключення шару занижують M_{Rd} на 3,7–6,4 % при $\delta = 30$ мм і до 17,6 % при $\delta = 60$ мм порівняно з безперервним профілем.

3. Залежність втрат від коефіцієнта армування має мінімум при $\rho \approx 0{,}5–0{,}9$ %; проста регресія за параметром δ/x_0 пояснює лише 42 % розкиду, тому потрібен повний розрахунок за алгоритмом.

4. Для балки Б-1 поточний $M_{Rd} = 196{,}8$ кН·м ($\eta = 0{,}83$), категорія стану 2; детермінований ресурс – 79,7 року від початку експлуатації, медіана ймовірнісного прогнозу – 91,0 року, 5 %-квантиль – 54,2 року.

5. Найважливішими параметрами обстеження є товщина захисного шару і глибина нейтралізації; запропонована технологія ремонту підвищує M_{Rd} до 259,9 кН·м.

Розділ 6
ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Загальні положення

Обстеження і ремонт конструкцій травильного відділення належать до робіт з підвищеною небезпекою: їх виконують на висоті понад 1,3 м, у приміщенні з кислими газами, з використанням електроінструменту, гідроструменевого обладнання та хімічних реактивів. Роботи організовують відповідно до Закону України «Про охорону праці» [26], ДБН А.3.2-2-2009 [27], Правил охорони праці під час виконання робіт на висоті (НПАОП 0.00-1.15-07), Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-1.21-98) та Правил пожежної безпеки в Україні.

Відповідальною особою за безпечне виконання робіт наказом призначається керівник групи обстеження. Усі виконавці проходять медичний огляд, вступний і первинний інструктажі на робочому місці, навчання з питань охорони праці та безпеки робіт на висоті. Роботи в діючому цеху виконуються за нарядом-допуском, погодженим з адміністрацією підприємства, при зупиненому технологічному процесі та злитих ваннах травлення.

6.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Перелік чинників, що можуть діяти на виконавців, наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

Небезпечні та шкідливі виробничі чинники під час обстеження і ремонту

Чинник	Джерело	Можливі наслідки
Падіння з висоти	робота з вишки-тури, край майданчика	травми, смерть
Перекидання засобів підмащування	протяг, горизонтальні зусилля від перфоратора	травми групи працівників
Падіння предметів	відколи бетону, інструмент	травми голови, кінцівок
Кислі гази та пари (SO_2, HCl, H_2SO_4)	залишки розчинів, просочений бетон	отруєння, опіки слизових
Хімічні опіки	залишки кислот, реактиви, ремонтні склади	ураження шкіри й очей

Продовження таблиці 6.1

Чинник	Джерело	Можливі наслідки
Пил бетону з кремнеземом	свердління, зняття шарів, гідроструменева обробка	захворювання органів дихання
Шум і вібрація	перфоратор, компресор, гідроструменева установка	зниження слуху, вібраційна хвороба
Ураження електричним струмом	електроінструмент, переносні світильники, волога	електротравми
Недостатня освітленість	затінені зони під майданчиком	помилки, травми
Струмінь води високого тиску	гідроструменеве видалення бетону	різані рани
Несприятливий мікроклімат	неопалюване приміщення взимку, висока вологість	переохолодження
Пожежна небезпека	розчинники, епоксидні склади	опіки, отруєння продуктами горіння

6.3 Заходи безпеки за видами робіт

Роботи на висоті. Для огляду балок застосовують пересувні вишки-тури заводського виготовлення з огородженням робочого настилу висотою 1,1 м, бортовою дошкою 0,15 м і драбиною всередині. Перед підйомом колеса фіксують гальмами, а за потреби встановлюють аутригери (розрахунок у підрозділі 6.4). Працівники використовують страхувальні системи з утримувальними стропами, закріпленими до надійних точок конструкцій. Переміщувати вишку з людьми на настилі заборонено.

Робота в агресивному середовищі. Перед початком робіт ванни зливають і промивають, приміщення провітрюють, повітря зони дихання контролюють газоаналізатором на SO_2 і HCl. Працівники використовують протигази або напівмаски з комбінованими фільтрами класу ABE1P2, кислотозахисні костюми, гумові рукавиці й захисні окуляри. Ділянки бетону, просочені кислотою, перед відбором проб нейтралізують розчином соди.

Відбір проб і розкриття арматури. Електроінструмент застосовують класу II з живленням від розподільного щита з пристроєм захисного вимкнення на 30 мА в системі TN-S; переносні світильники – напругою не вище 12 В. Під час свердління і зняття шарів використовують пилососи з HEPA-фільтрами, респіратори FFP3, навушники та окуляри.

Ремонтні роботи. Гідроструменеву обробку виконують лише навчені оператори з дистанційним вимикачем, у захисних костюмах і щитках; зону обробки огороджують на відстань не менше 10 м. Під час торкретування персонал працює в респіраторах і захисних окулярах, а шланги перевіряють на тиск перед кожною зміною.

Пожежна безпека. Епоксидні та поліуретанові склади зберігають у металевій шафі в кількості не більше змінної потреби; місце робіт забезпечують двома вогнегасниками ВП-5, курити й застосовувати відкритий вогонь заборонено.

6.4 Розрахунок стійкості пересувної вишки-тури

Для обстеження балок Б-1 з підлоги цеху застосовують пересувну вишку-туру висотою H = 6,2 м з розмірами основи 1,35×2,0 м (рис. 6.1). Власна вага вишки G = 2,6 кН, вага баласту на нижньому ярусі $G_б$ = 1,6 кН, вага двох працівників з інструментом $G_п$ = 1,6 кН. Під час відбору кернів перфоратором на висоті h_F = 7,2 м виникає горизонтальне зусилля F_h = 0,3 кН.

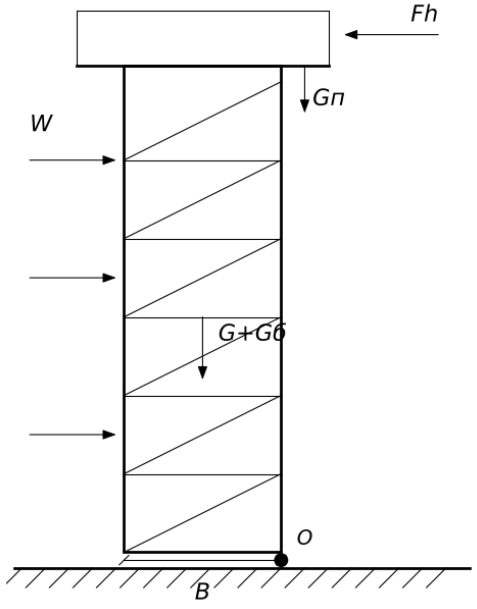

Рис. 6.1 Розрахункова схема вишки-тури

Коефіцієнт стійкості проти перекидання відносно ребра основи O

$$K_{ст} = M_{утр} / M_{пер} \geq [K] = 1,5, \qquad (6.1)$$

$$M_{утр} = (G + G_б)\cdot B/2 + G_п\cdot B/4 = (2{,}6 + 1{,}6)\cdot 1{,}35/2 + 1{,}6\cdot 1{,}35/4 = 3{,}38 \text{ кН·м}, \quad (6.2)$$

де $G_п\cdot B/4$ враховує несприятливе положення працівників ближче до краю настилу.

Перекидальний момент складається з моменту від горизонтального зусилля і від тиску протягу (при відкритих воротах цеху):

$$M_{пер} = F_h\cdot h_F + W\cdot H/2, \quad W = 0{,}5\cdot\rho\cdot v^2\cdot C_f\cdot A_к\cdot\psi, \quad (6.3)$$

де $\rho = 1{,}225$ кг/м^3; $C_f = 1{,}4$ – аеродинамічний коефіцієнт решітчастої конструкції; $A_к = 4{,}5$ м^2 – площа контуру; $\psi = 0{,}5$ – коефіцієнт заповнення.

Без протягу: $M_{пер} = 0{,}3\cdot 7{,}2 = 2{,}16$ кН·м; $K_{ст} = 3{,}38/2{,}16 = 1{,}56 \geq 1{,}5$ – стійкість забезпечена з мінімальним запасом. При протязі v = 10 м/с W = 0,193 кН, $K_{ст} = 1{,}22 < 1{,}5$ – стійкість не забезпечена. З аутригерами, які збільшують розрахункову ширину основи до 3,0 м, $K_{ст} = 2{,}72 > 1{,}5$ (рис. 6.2).

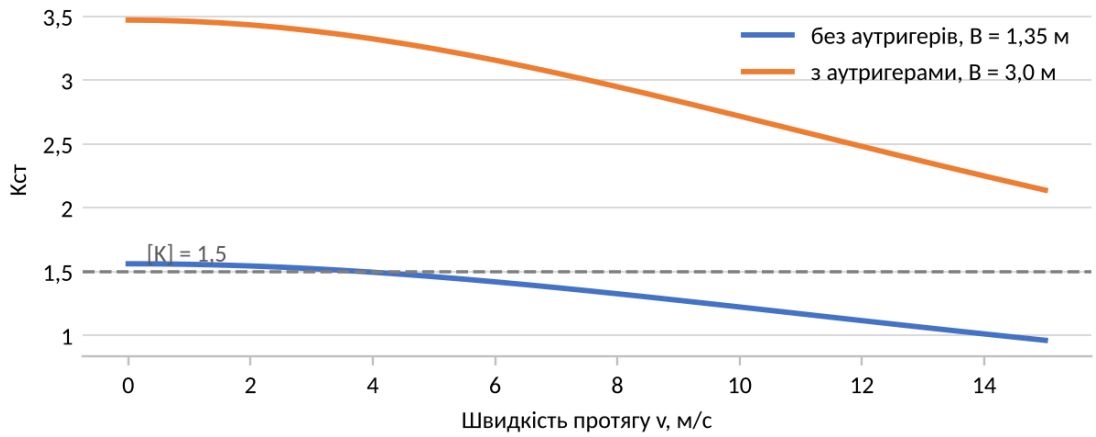

Рис. 6.2 Залежність коефіцієнта стійкості вишки-тури від швидкості протягу (розрахунок автора)

Висновок: вишку слід експлуатувати лише з аутригерами, а ворота цеху під час робіт на висоті мають бути зачинені.

6.5 Розрахунок шуму від одночасної роботи обладнання

Під час ремонту одночасно можуть працювати перфоратор ($L_1 = 98$ дБА), компресор торкрет-установки (92 дБА), гідроструменева установка (101 дБА) і

пересувний вентилятор (84 дБА); рівні прийнято за типовими паспортними даними обладнання такого типу на відстані 1 м. Сумарний рівень звуку

$$L_{\Sigma} = 10\cdot\lg \Sigma\, 10^{0{,}1\cdot L_{i}} = 10\cdot\lg(10^{9{,}8} + 10^{9{,}2} + 10^{10{,}1} + 10^{8{,}4}) = 103{,}2 \text{ дБА}. \quad (6.4)$$

Це значно перевищує допустимий рівень 80 дБА на робочих місцях за ДСН 3.3.6.037-99 [28]. Без гідроструменевої установки $L_{\Sigma} = 99{,}1$ дБА – також понад норму. На відстані 8 м від групи джерел (зниження на $20\cdot\lg 8 = 18$ дБ) рівень становить 85,1 дБА. Звідси заходи: гідроструменеву обробку виконувати окремою зміною, без інших шумних робіт; огороджувати зону обробки радіусом не менше 10 м; усім працівникам у зоні робіт застосовувати протишумні навушники з ефективністю не менше 25 дБ; обмежувати час безперервної роботи з перфоратором.

6.6 Розрахунок місцевого освітлення та повітрообміну

Природного освітлення під робочим майданчиком недостатньо, тому огляд нижньої грані балок і відбір проб виконують з переносним світлодіодним світильником 12 В потужністю 10 Вт зі світловим потоком $\Phi = 900$ лм. Для огляду поверхонь прийнято нормовану освітленість $E_н = 50$ лк [29]. Сила світла точкового джерела з рівномірним розподілом у нижній півсфері $I_0 = \Phi/\pi = 286{,}5$ кд, освітленість точки на відстані r від світильника під кутом α до нормалі

$$E = I_0\cdot\cos^3\alpha / (r^2\cdot K_з), \quad (6.5)$$

де $K_з = 1{,}3$ – коефіцієнт запасу.

На відстані 1,0 м ($\alpha = 0$) $E = 220$ лк, при $\alpha = 30°$ – 143 лк, на відстані 1,5 м – 98 лк (рис. 6.3). Максимальна відстань, на якій забезпечується нормована освітленість, $r_{max} = \sqrt{(I_0/(K_з\cdot E_н))} = 2{,}10$ м.

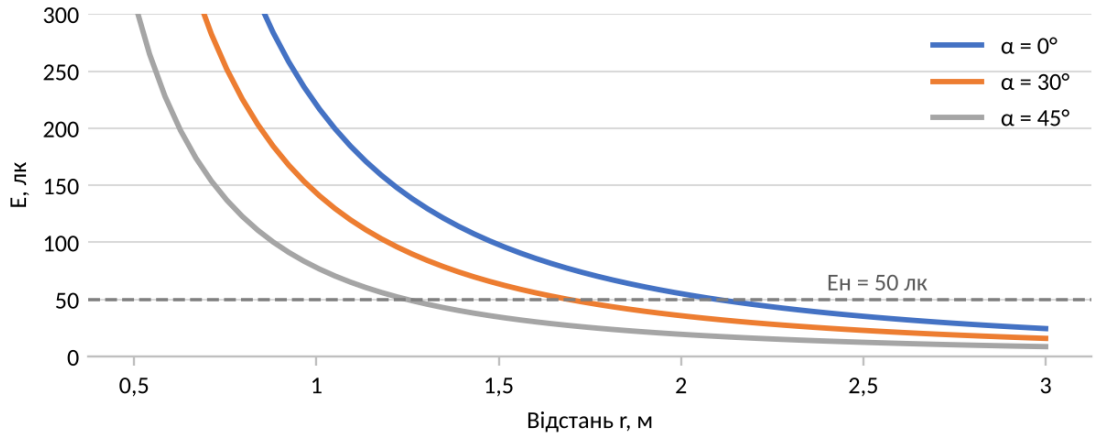

Рис. 6.3 Залежність освітленості від відстані до переносного світильника 12 В (розрахунок автора)

Після зливання ванн у повітря відділення продовжують виділятися кислі гази з просоченого бетону і залишків розчинів. Інтенсивність виділення для розрахунку прийнято G = 150 г/год (за результатами контрольних замірів її уточнюють), гранично допустима концентрація SO_2 у повітрі робочої зони $C_{гдк}$ = 10 мг/м^3, концентрація в припливному повітрі C_0 = 0,5 мг/м^3. Необхідний повітрообмін

$$L = G \cdot 1000 / (C_{гдк} - C_0) = 150 \cdot 1000 / (10 - 0{,}5) = 15\,789 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (6.6)$$

При об'ємі відділення V = 36·18·7,2 = 4666 м^3 кратність повітрообміну n = L/V = 3,4 год$^{-1}$. Загальнообмінна вентиляція відділення має бути ввімкнена на весь час робіт; якщо її продуктивність менша за 15 789 м^3/год, додатково встановлюють пересувний вентилятор, а працівники в зоні ванн працюють у фільтрувальних протигазах.

6.7 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Підприємство розташоване в місті, де періодично оголошується повітряна тривога. Перед початком робіт керівник визначає найближче захисне укриття, що відповідає ДБН В.2.2-5:2023 [30], і шлях евакуації до нього; час руху від робочого місця не має перевищувати нормованого. Під час сигналу «Повітряна тривога» роботи негайно припиняють: вимикають гідроструменеву установку і компресор, знеструмлюють електроінструмент, опускають працівників з вишки-

тури, закривають ємності з хімічними реактивами, після чого персонал організовано прямує до укриття. Роботи на висоті поновлюють лише після відбою тривоги та огляду засобів підмащування. Для травильного відділення додатково передбачають порядок дій на випадок пошкодження ємностей з кислотами: нейтралізаційні засоби (сода, вапно), засоби індивідуального захисту органів дихання на всіх працівників і план локалізації проливу.

6.8 Висновки до розділу 6

1. Визначено 12 небезпечних і шкідливих виробничих чинників та заходи захисту для робіт на висоті, в агресивному середовищі, з електроінструментом і гідроструменевим обладнанням.

2. Розрахунок стійкості вишки-тури показав, що без аутригерів при протязі 10 м/с $K_{ст} = 1{,}22 < 1{,}5$; з аутригерами $K_{ст} = 2{,}72$.

3. Сумарний рівень шуму при одночасній роботі обладнання становить 103,2 дБА, що потребує розділення робіт у часі та застосування навушників.

4. Переносний світильник 12 В на 900 лм забезпечує 50 лк на відстані до 2,10 м; для зниження концентрації кислих газів до ГДК потрібен повітрообмін 15 789 $м^3$/год (3,4 $год^{-1}$).

5. Визначено порядок дій персоналу під час повітряної тривоги та аварійного проливу кислот.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній магістерській роботі розв'язано задачу удосконалення алгоритму розрахунку міцності згинаних залізобетонних елементів із корозійними пошкодженнями та його застосування для оцінки ресурсу конструкцій.

1. Корозія бетону викликає пошарове погіршення його властивостей у стиснутій зоні від поверхні вглиб, а корозія арматури відбувається у дві стадії. Аналіз досліджень показав, що деградація бетону стиснутої зони вивчена значно слабше, ніж втрата перерізу арматури.
2. Розрахунки виконано за нелінійною деформаційною моделлю згідно з чинними ДБН та ДСТУ. Для умов травильного відділення в Кропивницькому встановлено класи агресивності середовища: XA2 (верхня грань) та XC3/XC4, XA1 (нижня грань).
3. Розроблено програму обстеження з пошаровим визначенням міцності бетону та кількісні критерії категорій технічного стану за рівнем використання несучої здатності.
4. Удосконалено алгоритм розрахунку, який враховує плавну зміну пошкоджень бетону по глибині, виключення зруйнованих волокон, корозію арматури та розвиток дефектів у часі. Похибка для неушкодженого перерізу порівняно з класичним методом прямокутної епюри становить 1,3 %.
5. Пошкодження стиснутої зони на глибину 30 мм (для зразка 120×180 мм) знижує несучу здатність на 1,4–11,4 %; втрати зростають для вищих класів бетону й зменшуються зі збільшенням діаметра арматури. Спрощений ступінчастий підхід або повне виключення пошкодженого шару занижують розрахункову несучу здатність на 3,7–6,4 %.
6. Балка Б-1 перебуває у 2-й категорії технічного стану: поточна несуча здатність становить 196,8 кН·м при діючому навантаженні 164,2 кН·м

(завантаження — 83 %). Розрахунковий залишковий ресурс становить близько 42 років (загальний — 79,7 року), а найбільше на довговічність впливають товщина захисного шару та швидкість нейтралізації бетону.

7. Запропоновано технологію ремонту з гідроструменевим видаленням пошкодженого бетону, нарощуванням стиснутої зони сумішшю класу R4 та додаванням арматури, що підвищує несучу здатність балки до 259,9 кН·м.
8. Розроблено заходи з охорони праці: обґрунтовано застосування аутригерів для вишки-тури, розділення шумних робіт у часі (рівень шуму 103,2 дБА), розміщення переносного світильника не далі 2,1 м та забезпечення повітрообміну 15 789 м³/год.

GENERAL CONCLUSIONS

The master's qualification thesis solves the problem of improving the algorithm for strength analysis of flexural reinforced concrete members with corrosion damage and applies it to service life assessment.

1. Concrete corrosion causes layer-by-layer deterioration of its properties in the compression zone from the surface inward, while reinforcement corrosion occurs in two stages. A review of existing research showed that the degradation of concrete in the compression zone is much less studied than the loss of reinforcement cross-section.
2. Calculations were performed using a nonlinear deformation model in accordance with current Ukrainian building codes (DBN and DSTU). For the conditions of the pickling shop in Kropyvnytskyi, the environmental exposure classes were determined as XA2 (top face) and XC3/XC4, XA1 (bottom face).
3. An inspection program with layer-by-layer concrete strength testing was developed, along with quantitative criteria for technical condition categories based on the level of load-bearing capacity utilization.
4. The calculation algorithm was improved to account for the gradual change in concrete damage with depth, the exclusion of failed fibers, reinforcement corrosion, and defect progression over time. The error for an undamaged cross-section compared to the classical rectangular stress block method is 1.3%.
5. Damage to the compression zone to a depth of 30 mm (for a 120×180 mm specimen) reduces load-bearing capacity by 1.4–11.4%; losses increase for higher concrete classes and decrease with larger reinforcement diameters. A simplified stepwise approach or complete exclusion of the damaged layer underestimates the calculated load-bearing capacity by 3.7–6.4%.
6. Beam B-1 is in technical condition category 2: its current load-bearing capacity is 196.8 kN·m under an applied load of 164.2 kN·m (83% utilization). The estimated

residual service life is about 42 years (total service life — 79.7 years), with durability most heavily influenced by the concrete cover thickness and neutralization rate.

7. A repair technology was proposed involving hydro-jet removal of damaged concrete, restoration of the compression zone with a class R4 repair mortar, and additional reinforcement, which increases the beam's load-bearing capacity to 259.9 kN·m.
8. Occupational safety measures were developed, substantiating the use of outriggers for the mobile scaffold tower, time separation of noisy operations (103.2 dBA noise level), placement of portable lighting no further than 2.1 m away, and an air exchange rate of 15,789 m³/h.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. [Чинні від 2011-07-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.

2. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний від 2011-06-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 118 с.

3. Coronelli D., Gambarova P. Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: modeling guidelines. Journal of Structural Engineering. 2004. Vol. 130, No. 8. P. 1214–1224. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:8(1214).

4. Kagermanov A., Markovic I. An overview on finite element-modelling techniques for structural capacity assessment of corroded reinforced concrete structures. Structure and Infrastructure Engineering. 2023. Vol. 19, No. 11. P. 1585–1599. DOI: 10.1080/15732479.2022.2045612.

5. Jiang N., Shi J., Hu Z., Wang D., Tan B., Liu Y. Model for flexural capacity calculation of corroded reinforced concrete beams under non-uniform corrosion. Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 108. Article 112834. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.112834.

6. Kumar R., Arora H. C., Kumar A., Kumar P., Sharma M. Estimation of residual flexural capacity of corroded reinforced concrete beams through algorithmic learning. Journal of Structural Design and Construction Practice. 2025. Vol. 30, No. 3. Article 04025025. DOI: 10.1061/JSDCCC.SCENG-1571.

7. Шаповалов О. М., Пустовойтова О. М., Псурцева Н. О., Кулаков О. Ю. Тексти лекцій з дисциплін «Будівельні конструкції (залізобетонні конструкції)», «Будівельні конструкції» та «Залізобетонні конструкції». Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2013. 82 с. URL: https://eprints.kname.edu.ua/33333/ (дата звернення: 14.09.2026).

8. Bertolini L., Elsener B., Pedeferri P., Redaelli E., Polder R. Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair. 2nd ed. Weinheim : Wiley-VCH, 2013. 414 p.

9. Yang W., Baji H., Li C.-Q. Effect of pitting corrosion on the time to concrete surface cracking. Journal of Structural Integrity and Maintenance. 2025. Vol. 10, No. 3. Article 2517542. DOI: 10.1080/24705314.2025.2517542.

10. Tuutti K. Corrosion of steel in concrete. Stockholm : Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. 469 p. (CBI Research Report No. 4.82).

11. ДСТУ Б В.2.6-145:2010. Конструкції будинків і споруд. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги. [Чинний від 2010-10-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 47 с.

12. ДСТУ EN 206:2018. Бетон. Технічні вимоги, властивості, виготовлення та відповідність (EN 206:2013+A1:2016, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.

13. ДСТУ EN 1504-3:2015. Матеріали та системи для захисту і ремонту бетонних конструкцій. Частина 3. Конструкційний та неконструкційний ремонт (EN 1504-3:2005, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.

14. Пігулко Н. З. Основи розрахунку будівельних конструкцій : конспект лекцій. Любешів : Любешівський технічний фаховий коледж ЛНТУ, 2020. 252 с. URL: https://www.ltklntu.org.ua/wp-content/uploads/2022/10/конспект-з-орбк-2020.pdf (дата звернення: 03.10.2026).

15. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1992-1-1:2004, IDT). Київ : Мінрегіонбуд України, 2012. 312 с.

16. Бамбура А. М., Сазонова І. Р., Дорогова О. В., Войтенко О. С. Проектування залізобетонних конструкцій на основі деформаційної моделі (за ДБН В.2.6-98:2009). Київ : Талком, 2017. 304 с.

17. Петруха О. Деформаційний метод розрахунку залізобетонних конструкцій. URL: http://www.mqn.com.ua/article.php?id=66 (дата звернення: 22.09.2026).

18. Височан Н. К., Якименко Ю. А. Практичний метод розрахунку залізобетонних рамних конструкцій з урахуванням повзучості та тріщиноутворення в бетоні. Сучасне будівництво та архітектура. 2025. № 11. С. 33–42. DOI: 10.31650/2786-6696-2025-11-33-42.

19. Rodriguez J., Ortega L. M., Casal J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement. Construction and Building Materials. 1997. Vol. 11, No. 4. P. 239–248.

20. Du Y. G., Clark L. A., Chan A. H. C. Residual capacity of corroded reinforcing bars. Magazine of Concrete Research. 2005. Vol. 57, No. 3. P. 135–147.

21. Kumar A., Chhotu A. K., Ansari G. A., Ali Md. A., Kumar A., Rajkishor, Kumar A. Finite element modelling of corroded RC flexural elements. International Journal of Engineering Trends and Technology. 2023. Vol. 71, No. 4. P. 462–473. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V71I4P239.

22. Bossio A., Imperatore S., Kioumarsi M. Ultimate flexural capacity of reinforced concrete elements damaged by corrosion. Buildings. 2019. Vol. 9, No. 7. Article 160. DOI: 10.3390/buildings9070160.

23. Moreira L. S., Bittencourt T. N., Carvalho H., Futai M. M. Probabilistic assessment of corroded concrete structures – systematic literature review. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 2024. Vol. 17, No. 4. Article e17408. DOI: 10.1590/S1983-41952024000400008.

24. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 47 с.

25. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.

26. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12 (дата звернення: 29.10.2026).

27. ДБН А.3.2-2-2009. Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2012. 116 с.

28. ДСН 3.3.6.037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Київ : МОЗ України, 1999. 29 с.

29. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ : Мінрегіон України, 2018. 133 с.

30. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. Київ : Мінрозвитку громад та територій України, 2023. URL: https://e-construction.gov.ua (дата звернення: 11.10.2026).