

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
The Bridge BIM. Architecture engineering Construction
Co-funded by the European Union

INSPECTION, DIAGNOSTICS AND IMPLEMENTATION OF BIM TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION

ОБСТЕЖЕННЯ, ДІАГНОСТИКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ВІМ-ТЕХНОЛОГІЙ У БУДІВНИЦТВІ



Чернігів 2025

Обстеження, діагностика та впровадження BIM-технологій у будівництві

UDC 624.15 / УДК 624.15
I-67 / О-15

Рекомендовано до друку вченою радою Національного університету «Чернігівська політехніка»
(протокол № 8 від 29 серпня 2025 р.).

Author's team / Авторський колектив

М. Bolotov, М. Korzachenko, І. Petrenko, І. Prybytko, М. Rudenko

Болотов М. Г., Корзаченко М. М.,
Петренко І. В., Прибисько І. О., Руденко М. М.

Рецензенти / Reviewers

Винников Юрій Леонідович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри буріння та геології Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» / Yuriy Vynnykov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Drilling and Geology at the National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic";

Назаренко Олексій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри будівельного виробництва та управління проектами Національного університету «Запорізька політехніка» / Oleksii Nazarenko – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Construction and Project Management at the National University "Zaporizhzhia Polytechnic";

Єрошенко Андрій Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри технологій машинобудування та деревообробки Національного університету «Чернігівська політехніка» / Andriy Yeroshenko – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Machine Building and Wood Processing Technologies at the Chernihiv Polytechnic National University.

Inspection, diagnostics and implementation of BIM technologies in construction / М. Bolotov, М. Korzachenko, І. Petrenko, І. Prybytko, М. Rudenko. – Chernihiv : Chernigiv Polytechnic National University, 2025. – 298 p.

Обстеження, діагностика та впровадження BIM-технологій у будівництві / М. Г. Болотов, М. М. Корзаченко, І. В. Петренко, І. О. Прибисько, М. М. Руденко. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2025. – 298 с.

ISBN 978-617-7932-90-0

The cursebook were developed as a part of The BRIDGE project (101127884), co-funded by the European Union: «Bridging the gap between university and industry: Master Curricular Supporting the Development of Green Jobs and Digital Skills in the Ukrainian Building Sector».

The project is co-funded by the European Union, but all expressed views and opinions are strictly the authors' responsibility and do not necessarily reflect the views of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency. Neither the European Union nor the grant provider can be held responsible for them.

The cursebook examines the primary causes of failures in buildings and structures, preventive measures, defects and damages in construction elements, and the underlying reasons for their occurrence. It outlines methods for inspecting buildings and structures, along with the relevant technical equipment, and explores digital tools for managing the building lifecycle through the application of Building Information Modeling (BIM) technologies. The cursebook explains the differences between traditional methods of data collection and processing and the use of BIM technologies. It also discusses approaches to integrating inspection data into modern BIM systems and presents the 6D planning technology for the maintenance and operation of buildings and structures.

This cursebook is intended for higher education students and engineering and technical professionals in the fields of manufacturing and construction engineering.

Посібник розроблено в рамках проекту 101127884 – The BRIDGE, що співфінансується Європейським Союзом: «Інноваційні магістерські курси на підтримку покращення енергетичного та вуглецевого сліду будівельного фонду України».

Проект співфінансується Європейським Союзом, проте висловлені погляди та думки належать лише авторам цього проекту і не обов'язково відображають погляди Європейського Союзу чи Європейського виконавчого агентства з питань освіти та культури. Ні Європейський Союз, ні грантодавець не можуть нести за них відповідальність.

У посібнику розглянуто основні причини аварій будівель та споруд, заходи щодо їх запобігання, дефекти і пошкодження будівельних конструкцій та причини їх виникнення, методи обстеження будівель і споруд та відповідне технічне забезпечення, цифрові інструменти для управління життєвим циклом будівель за рахунок використання технологій BIM. Пояснюється різниця між традиційними методами збору й обробки даних та використанням технологій BIM, розглядаються способи інтеграції даних результатів обстежень у сучасні BIM-системи, основи технології 6D-планування утримання та експлуатації будівель і споруд.

Посібник призначений для здобувачів вищої освіти та інженерно-технічних працівників в галузі інженерії, виробництва та будівництва.

UDC 624.15 / УДК 624.15

ISBN 978-617-7932-90-0

© М. Г. Болотов, М. М. Корзаченко, І. В. Петренко
та ін., 2025

© НУ «Чернігівська політехніка», 2025

ЗМІСТ

Умовні позначення і скорочення	7
Вступ	9
РОЗДІЛ 1. Основні причини та приклади аварій будівель та споруд, що сталися на території України	12
РОЗДІЛ 2. Дефекти та пошкодження будівельних конструкцій	12
2.1. Загальні поняття про дефекти та пошкодження	28
2.2. Класифікація дефектів та пошкоджень будівельних конструкцій	34
2.3. Дефекти та пошкодження залізобетонних конструкцій	34
2.3.1. Фізико-механічні пошкодження залізобетонних конструкцій	35
2.3.2. Дефекти та пошкодження залізобетонних конструкцій у результаті хімічних реакцій	46
2.3.3. Дефекти та пошкодження кам'яних конструкцій	53
2.3.4. Дефекти фундаментів	59
2.3.5. Дефекти та пошкодження, викликані помилками в проєктах ...	61
2.3.6. Руйнування викликані деформаціями ґрунтів	64
РОЗДІЛ 3. Тріщини будівельних конструкцій	72
3.1. Загальні відомості і класифікація	72
3.2. Методи та засоби спостереження за тріщинами	80
РОЗДІЛ 4. Обстеження будівель і споруд	94
4.1. Загальні відомості	94
4.2. Етапи і порядок обстежень	97
4.3. Категорія технічного стану будівель і споруд	109
РОЗДІЛ 5. Технічне забезпечення обстежень	111
5.1. Загальна інформація	111
5.2. Засоби неруйнівного контролю	115
5.2.1. Акустичні методи випробування (Sonic Methods of Testing)	116
5.2.2. Магнітні методи контролю будівельних конструкцій	133
5.2.3. Контроль виробів просвічуванням радіаційним випромінюванням	147
РОЗДІЛ 6. Напівруйнівні та руйнівні методи контролю	152
6.1. Механічні методи	152
6.1.1. Випробування на відрив	155
6.1.2. Метод на відрив зі сколюванням	158
6.1.3. Випробування пружного відскоку	161
6.1.4. Метод відколювання кутів	163
6.2. Випробування із пласким домкратом	166
6.3. Огляд за допомогою гнучких бороскопів	168
6.4. Руйнівні методи контролю	171
6.4.1. Статичні випробування	172
6.4.2. Динамічні випробування	177

РОЗДІЛ 7. Цифрові інструменти для управління життєвим циклом

будівель: впровадження BIM	181
7.1. Обмеження традиційних методів.....	181
7.2. Необхідність інтеграції даних та управління життєвим циклом будівлі.....	184
7.2.1. 3D-сканування	186
7.2.2. Системи моніторингу стану конструкцій.....	189
7.2.3. Технології доповненої/віртуальної реальності (AR/VR)	195
7.3. Роль інформаційного моделювання в сучасному будівництві та його впровадження в Україні	203
7.4. Ключові учасники процесу та їхня зацікавленість у моделі BIM	204
7.5. Реконструкція, ремонт та експлуатація будівель	210
7.6. Безпека будівель та поведінка в надзвичайних ситуаціях	216

РОЗДІЛ 8. Технічне обслуговування та управління об'єктами з використанням BIM

8.1. Застосування BIM на етапі експлуатації та технічного обслуговування будівель.....	223
8.2. Управління об'єктами (FM)	225
8.3. Проектування систем управління.....	230
8.4. Інформаційне моделювання будівель (BIM) в управлінні об'єктами (FM).....	232

РОЗДІЛ 9. 6D BIM

9.1. Доповнена реальність (AR) / Віртуальна реальність (VR)	241
9.1.1. Використання AR/VR в управлінні об'єктами через BIM.....	242
9.1.2. Інтеграція доповненої/віртуальної реальності (AR/VR) у секторі будівництва.....	244
9.1.3. Роль доповненої реальності в управлінні будівництвом.....	244
9.1.4. Роль віртуальної реальності в управлінні будівництвом.....	248
9.2. Інтеграція AR та VR в 6D BIM для оптимізації життєвого циклу будівлі.....	256
9.2.1. Змішана реальність (MR) у 6D BIM.....	258
9.2.2. Використання доповненої реальності в 6D BIM	260
9.2.3. Використання віртуальної реальності в 6D BIM	265

Список рекомендованої літератури

Основні терміни та визначення	287
--	-----

Contents

Abbreviations	7
Introduction	9
CHAPTER 1. The main reasons and examples of building and structures accidents that occurred on the territory of Ukraine	12
CHAPTER 2. Defects and damages of building structures.....	12
2.1. General concepts of defects and damages	28
2.2. Classification of defects and damages of building structures.....	34
2.3. Defects and damage to reinforced concrete structures	34
2.3.1. Physical and mechanical damages to reinforced concrete structures	35
2.3.2. Defects and damage to reinforced concrete structures caused by the chemical reactions	46
2.3.3. Defects and damage of masonry structures	53
2.3.4. Foundations defects	59
2.3.5. Defects and damage caused by errors in the projects.....	61
2.3.6. Destruction caused by soil deformation	64
CHAPTER 3. Cracks in Building Structures	64
3.1. General information and classification	72
3.2. Methods and means of cracks observation	72
CHAPTER 4. Inspection of Buildings and Structures.....	80
4.1. General Information	94
4.2. Stages and Procedure of Inspections.....	94
4.3. The Categories of Technical Condition of Buildings and Structures.....	109
CHAPTER 5. Technical Support for Inspections	111
5.1. General Information	111
5.2. Non-Destructive Testing Tools	115
5.2.1. Sonic Methods of Tests	116
5.2.2. Magnetic Methods Tests.....	133
5.3.2. Radiation Methods of Tests.....	147
CHAPTER 6. Semi-Destructive and Destructive Testing Methods.....	152
6.1. Mechanical Methods.....	152
6.1.1 Pull-off Tests	155
6.1.2 Pull-out Tests	158
6.1.3 Rebound Hammer Test	161
6.1.4. Corner Break-Off Method.....	163
6.2. Flat Jack Test	166
6.3. Inspection Using Flexible Borescopes.....	168
6.4. Destructive Tests.....	171
6.4.1 Static Testing	172
6.4.2 Dynamic tests.....	177
CHAPTER 7. Digital Tools for Building Lifecycle Management: BIM Implementation	181
7.1. Limitations of Traditional Methods.....	181
7.2. The necessity of data integration and building lifecycle management	184
7.2.1. 3D scanning	186
7.2.2. Structural condition monitoring systems.....	189
7.2.3. Augmented/virtual reality (AR/VR) technologies	195

7.3. The role of information modeling in modern construction and its implementation in Ukraine	203
7.4. Key stakeholders in the process and their interests in the BIM model	204
7.5. Reconstruction, repair, and operation of buildings	210
7.6. Building Safety and Emergency Behavior	216
CHAPTER 8. Maintenance and Facility Management Using BIM.....	221
8.1. Application of BIM at the Building Operation and Maintenance Stage	223
8.2. Facility Management (FM).....	225
8.3. Design of Management Systems.....	230
8.4. Building Information Modeling (BIM) in Facility Management (FM) the overall project cost, timeline, and expected level of sustainability.....	232
CHAPTER 9. 6D BIM	238
9.1. Augmented Reality (AR) / Virtual Reality (VR)	241
9.1.1. Use of AR/VR in Facility Management through BIM.....	242
9.1.2. Integration of Augmented/Virtual Reality (AR/VR) in the Construction Sector.....	244
9.1.3. The Role of Augmented Reality in Construction Management	244
9.1.4. The Role of Virtual Reality in Construction Management	248
9.2. Integration of AR and VR in 6D BIM for optimizing the building lifecycle	256
9.2.1. Mixed Reality (MR) in 6D BIM	258
9.2.2. Use of Augmented Reality in 6D BIM	260
9.2.3. Use of Virtual Reality in 6D BIM	265
References.....	278
The Main Terms and Definitions	287

SYMBOLS AND ABBREVIATIONS

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ І СКОРОЧЕННЯ

3D	Three-dimensional modelling	Тривимірне моделювання
4D	Time	Час
5D	Cost	Вартість
6D	BIM and Facility Management	ВІМ та управління об'єктами
AEC	Architecture, Engineering, and Construction	Архітектура, інженерія та будівництво
AIM	Asset Information Model	Модель інформації про активи
ALM	Asset Lifecycle Managment	Управління життєвим циклом активів
API	Application Programming Interface	Інтерфейс прикладного програмування
AR	Augmented Reality	Доповнена реальність
BAS	Building Automation System	Система автоматизації будівель
BIM	Building Information Modelling	Інформаційне моделювання будівель або Інформаційна/цифрова модель будівлі/споруди
BMS	Building Management System	Система управління будівлею/спорудою
CAD	Computer-aided design	Система автоматизованого проектування
CAM	Computer-aided manufacturing	Автоматизована система технологічної підготовки виробництва
CAVE	Cave Automated Virtual Environment	Автоматизоване віртуальне середовище печери
CEN	European Committee for Standardization	Європейський комітет зі стандартизації
CMMS	Computerized Maintenance Management Systems	Комп'ютеризовані системи управління технічним обслуговуванням
COBie	Construction Operations Building Information Exchange	Обмін інформацією про будівельні операції
EMA	Electromagnetic-acoustical	Електромагнітно-акустичний
ERP	Enterprise Resource Planning	Система планування ресурсів підприємства
FBX	Format retrieved from Filmbox	Формат отримано з Filmbox
FM	Facility Management	Управління об'єктами
FPS	First Person Controller	Контролер від першої особи
GPR	Ground Penetrating Radar	Георадар

IAV	Interactive Augmented Virtuality	Інтерактивна доповнена віртуальність
IBM	International Business Machines Corporation	Міжнародна корпорація бізнес-машин
IFC	Industry Foundation Class	Клас фундаменту промисловості
IoT	Internet of Things	Інтернет речей
LOD	Level of Development	Рівень розвитку
LVDT	Linear Variable Displacement Transducer	Диференційний трансформатор для вимірювання лінійних переміщень
MEP	Mechanical, Electrical, and Plumbing	Механічні, електротехнічні та сантехнічні роботи
MR	Mixed Reality	Змішана реальність
NDTs	Non-destructive Tests	Неруйнівні методи контролю
O&M	Operations and Maintenance	Експлуатація та технічне обслуговування
ROI	Return on Investment	Рентабельність інвестицій
SDTs	Semi-destructive Tests	Напівруйнівні випробування
UPVT	Ultrasonic Pulse Velocity Tests	Ультразвукові випробування
VDC	Virtual Design and Construction	Віртуальне проєктування та будівництво
VR	Virtual Reality	Віртуальна реальність

INTRODUCTION

ВСТУП

Для утримання будівель у технічно справному стані, як житлових, так і промислових, визначальним є технічний стан конструкцій, з яких складається та чи інша будівля. Для визначення та оцінки характеристик кожного елементу будівлі проводиться періодичне обстеження. Метою обстеження є виявлення наявних дефектів, визначення залишкового експлуатаційного ресурсу будівельних конструкцій та основ для подальшого опрацювання цих даних при визначенні їхньої надійності, необхідності підсилення і планування та реалізації ремонтно-відновлювальних робіт.

Сучасні підходи діагностики мають зазвичай локальний характер, який базується на результатах візуального огляду та контролю міцності для окремих елементів. Найбільш реальну оцінку технічного стану будівельних об'єктів загалом можливо отримати при випробуваннях динамічними навантаженнями, але такі технології вимагають використання сучасних комп'ютерних технологій для регулярного моніторингу технічного стану будівель та споруд. Більш реальним підходом були б натурні випробування будівлі, за результатами яких можна з точністю визначати характеристики її конструктивних елементів. Проте конструктивні схеми будинків різні та проведення такого плану випробування потребують необхідного відповідного обладнання, ресурсів та кваліфікації працівників, а також дороговартісні в реалізації.

Maintaining buildings—both residential and industrial—in a technically sound condition largely depends on the structural integrity of their constituent elements. To determine and evaluate the characteristics of each building component, periodic inspections are conducted. The primary objectives of these inspections are to identify existing defects, assess the residual service life of structural elements, and provide a basis for further analysis regarding reliability, the need for reinforcement, and the planning and execution of repair and restoration works.

Traditional diagnostic approaches are typically localized, relying on visual inspections and strength assessments of individual components. A more comprehensive evaluation of a building's technical condition can be achieved through dynamic load testing. However, such methods require advanced computer technologies for continuous monitoring and are resource-intensive in terms of equipment, personnel qualifications, and financial costs. Full-scale testing of buildings could yield highly accurate data on structural performance, but the diversity of structural schemes and the complexity of implementation make this approach impractical for widespread use.

An alternative and more cost-effective method involves assessing the technical condition of structural elements using Building Information Modeling (BIM) technologies. BIM provides

Проведення оцінювання технічного стану конструкційних елементів за допомогою технології BIM (Building Information Model) може надати інформацію, наближену до реальної, та є менш фінансово затратним у порівнянні з реальними випробуваннями.

Стандартні системи CAD дозволяють працювати з тривимірними моделями, які називають 3D-моделями. BIM виходить за ці межі, даючи можливості для моделювання, що визначається як 4D, 5D, 6D та навіть 7D. Поєднання цих вимірів складає цілісну картину про будівлю чи споруду від початкового ескізу до моменту виведення з експлуатації. Більш тривалим у часі та значущим з погляду витрат та прибутків від функціонування будівлі є вимір 6D.

6D-планування утримання та експлуатації будівель і споруд є сучасним підходом, який забезпечує ефективне управління життєвим циклом об'єкта. Цей підхід базується на використанні інформаційного моделювання будівель і дозволяє інтегрувати в модель об'єкта дані про його фізичні характеристики, технічний стан, графіки та зміст технічного обслуговування, витрати та інші аспекти. Інформаційна база містить весь перелік даних про конструкційні елементи, з яких складається будівля, що надає можливість розрахункового визначення залишкової міцності. Для визначення розрахункових (допустимих) значень контрольованих параметрів розробляється математична і комп'ютерна модель об'єкта з використанням методу скінченних елементів.

data that closely approximates real-world conditions and significantly reduces the financial burden compared to physical testing.

While conventional CAD systems enable to work with 3D models, BIM extends beyond this by offering modeling capabilities in 4D, 5D, 6D, and even 7D. These dimensions collectively provide a comprehensive view of a building's lifecycle—from initial design to decommissioning. Among these, 6D modeling is particularly significant in terms of long-term operational costs and benefits.

6D planning for the maintenance and operation of buildings represents a modern approach to lifecycle management. It is based on BIM and allows for the integration of data regarding physical characteristics, technical condition, maintenance schedules, costs, and other relevant aspects. The information database includes detailed data on all structural elements, enabling the calculation of residual strength. To determine permissible values of monitored parameters, mathematical and computational models of the building are developed using advanced finite element analysis.

Many Ukrainian cities possess extensive areas of aging housing stock, which continue to expand over time. These buildings often feature unique characteristics and historical value. The relevance of 6D planning for the maintenance and operation of historical buildings lies in preserving cultural heritage, extending the lifecycle of

Більшість міст України мають значні території застарілого житлового фонду, що з роками лише збільшується. Такі будинки мають свої особливості та автентичність, не говорячи про історико-архітектурні об'єкти. Актуальність 6D-планування утримання та експлуатації історичних будівель і споруд полягає в забезпеченні збереження культурної спадщини, продовженні життєвого циклу унікальних об'єктів та адаптації їх до сучасних умов використання. Тому так важлива підготовка фахівців з будівництва та цивільної інженерії, які б вміли розробляти та використовувати сучасні технології при проєктуванні, обстеженні, реконструкції об'єктів будівництва та їх технічній експертизі, у чому й полягає важливість вивчення цих питань.

unique structures, and adapting them to modern usage conditions. Therefore, it is essential to train construction and civil engineering professionals capable of developing and applying modern technologies in the design, inspection, reconstruction, and technical evaluation of buildings—highlighting the importance of studying these issues.

CHAPTER 1

THE MAIN REASONS AND EXAMPLES OF BUILDING AND STRUCTURES ACCIDENTS THAT OCCURRED ON THE TERRITORY OF UKRAINE

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ПРИЧИНИ ТА ПРИКЛАДИ АВАРІЙ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД, ЩО СТАЛИСЯ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Надійна експлуатація будівель та споруд різного призначення залежить від багатьох факторів: типу та якості матеріалів, що використовуються при їх виготовленні, перерізу елемента, їх форми, якості виготовлення та монтажу, умов експлуатації, своєчасного ремонту, а в необхідних випадках – підсилення конструкції і т. ін.

Усі перелічені фактори впливають на строк нормальної експлуатації та визначають несучу здатність будівель та споруд та їхніх окремих конструктивних елементів. Кожна окрема аварія є результатом сукупності декількох причин, поєднання декількох несприятливих факторів. Водночас завжди вдається можливим виділити основну причину, що безпосередньо або побічно призвела до аварії. Обвалюється або приходить в аварійний стан найслабша ланка, найбільш дефектний елемент, що був неправильно спроектований.

У багатьох випадках, при повному обваленні конструкції, встановити причину аварії є практично неможливим. Однак встановлення

Reliable operation of buildings and structures for various purposes depends on many factors: the type and quality of materials used in their manufacture, the cross-section of the element, their shape, the quality of manufacturing and installation, operating conditions, timely renovation, and, if necessary, reinforcement of the structure, etc. All of the mentioned factors affect the normal service life and determine the bearing capacity of buildings and structures and their individual structural elements. Each individual accident is the result of a combination of several factors, a combination of several adverse factors. It is always possible to identify the main reason that caused the accident, either directly or indirectly. The weakest link or element that was improperly designed collapses or becomes damaged.

In many cases, particularly in the case of a complete structural collapse, it can be difficult to determine the actual reason of an accident. However, the establishment of the root cause of the disaster

саме основної причини катастрофи в кожному конкретному випадку має першорядне значення. У будівельній практиці відомі випадки, коли неправильно встановлена першопричина аварії призводила до повторної катастрофи.

Останнім часом на території України дедалі частіше трапляються випадки обвалення будівель і споруд різного призначення. На жаль, це практично завжди супроводжується травмуванням або загибеллю людей.

Наслідки аварій будівель і споруд промислового призначення можуть бути досить непередбачуваними. Здебільшого вони призводять до економічних втрат. Проте не можна забувати Чорнобиль, аварія якого призвела до масштабної екологічної катастрофи. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, опублікованих у вересні 2005 року, від наслідків Чорнобильської аварії загинуло приблизно чотири тисячі осіб. Цифри, опубліковані ВООЗ, здаються занадто низькими. Реальну кількість людських жертв після вибуху ніхто не зможе назвати й зараз.

Не більш сприятлива ситуація склалася навколо житлового сектору. Статистика показує, що число аварій будівель житлового призначення з кожним роком зростає. Так в 1994-му році трапилося 27 аварій, в 1995-му – 31, у 1996-му

in each case is of paramount importance. In construction practice, there are cases when an incorrectly identified root cause of an accident led to a repeated disaster.

Recently, there have been increasing cases of buildings and structures collapsing on the territory of Ukraine for various purposes. Unfortunately, this is almost always accompanied by injury or death.

The consequences of accidents in industrial buildings and structures can be quite unpredictable. In most cases, they lead to economic losses. But we should not also forget Chernobyl, whose accident led to a large-scale environmental disaster. Around 4,000 people died as a result of the Chernobyl accident, as reported by the World Health Organization in September 2005. The figures published by the WHO seem too low. The real number of human casualties after the explosion is still unknown.

The situation in the residential sector is no more favourable. According to statistics, the number of accidents in residential buildings is growing every year. Thus, in 1994 there were 27 accidents, in 1995 – 31, in 1996 – 36. These accidents are where our children and parents suffer, which makes you think.

– 36. Це примушує замислитися, адже саме в цих аваріях страждають наші діти і батьки.

Аварії будівель та споруд не відбуваються раптово. Переважно цьому сприяють деякі фактори, а в разі випадків і цілий комплекс факторів та причин, не беручи до уваги аварії, викликані військовими діями. За даними компанії «ТОВ "УКРЕКСПЕРТИЗА ГРУП"» аварії будівель відбуваються внаслідок сукупності таких причин:

- низька якість робіт при зведенні будівель і споруд;
- упущення та порушення правил експлуатації;
- низька якість будівельних матеріалів;
- неякісне виготовлення конструкції (низька культура будівельних робіт);
- помилка на стадії проектування;
- недоліки норм проектування, правил виготовлення та монтажу конструкції.

На рис. 1.1 показано розподілення аварій будівель та споруд з металевими конструкціями каркасів за їхніми причинами.

Accidents of buildings and structures do not occur suddenly. As a rule, some factors contribute to this, and in some cases a whole range of factors and reasons, not including accidents caused by military operations. According to the data of "UKREKSPERTIZA GROUP LLC", building accidents occur due to a combination of reasons:

- low quality of operations during the construction of buildings and structures;
- omissions and violations of operating rules;
- low quality of building materials;
- low quality of construction (low culture of construction work);
- errors at the design stage;
- shortcomings in design standards, rules for the manufacture and installation of structures.

Fig. 1.1 shows the distribution of accidents in buildings and structures with metal frame structures by their causes.

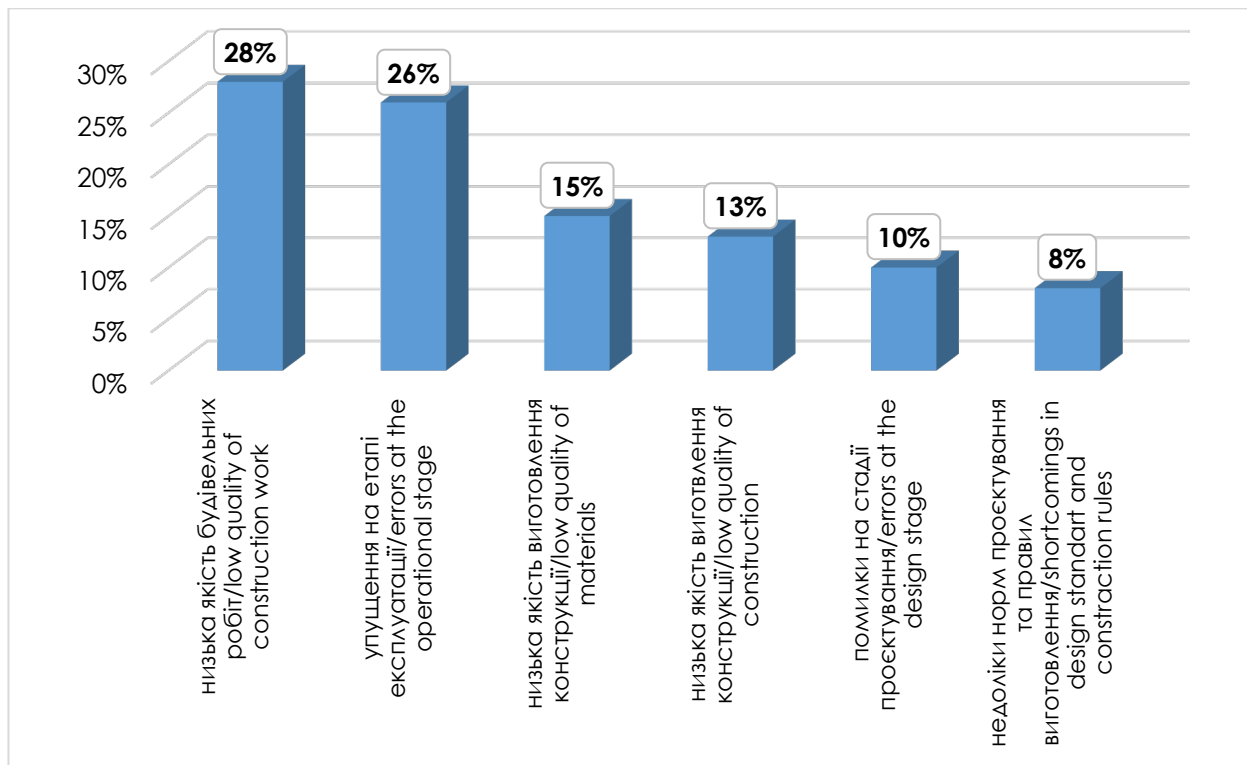


Рис. 1.1. Розподілення аварій будівель і споруд з металевими конструкціями каркасів за їхніми причинами / Distribution of accidents of buildings and structures with metal frame structures by their causes

Особливу тривогу викликають аварії житлових будівель, оскільки аварії в цьому секторі трапляються найчастіше. Їх кількість складає 27 % від загального числа обвалень. Причин аварій житлових споруд дуже багато. Серед головних можна виділити:

- порушення правил технічної експлуатації будівель та споруд;
- втрата несучої здатності вузовими монтажними з'єднаннями через допущені дефекти та недотримання проєктних рішень;
- перевищення розрахункових навантажень на конструкції при будівництві, реконструкції та виконанні ремонтних робіт;
- низька міцність конструкційних систем та окремих конструкцій;

Residential building accidents are of particular concern, as they are the most frequent in this sector. They account for 27% of the total number of collapses. There are many reasons for residential building accidents. The main ones are as follows:

- violation of the rules of technical operation of buildings and structures;
- loss of bearing capacity of nodal assembly joints due to defects and deviation from design solutions;
- exceeding the design loads on structures during construction, reconstruction and repair work;
- low strength of structural systems and individual structures;

- просідання фундаменту, що викликані зниженням несучої здатності ґрунтів основи;
- застосування помилкового проєктного рішення;
- незабезпечення вимог розподілення навантаження в місцях спирання несучих конструкцій на кам'яну кладку.

Розглянемо приклади деяких аварій житлових будинків, що сталися на території України за останні роки, не беручи до уваги такі, що були зруйновані внаслідок ракетних ударів та іншого роду військових дій.

Із засобів масової інформації ми дізнаємось, що лише по Чернігівській області за досліджений період сталося близько 7 випадків аварій будівель житлового призначення, деякі із них навіть із людськими жертвами. Причиною більшості таких випадків є аварійний стан будівлі та людський фактор (порушення правил експлуатації).

16 лютого 2010 року в м. Чернігів по вулиці Корольова, 13 сталося обвалення даху багатоквартирного будинку (рис. 1.2). Шістдесят жителів будинку евакуйовано. За попередніми даними, обвалення відбулося внаслідок неякісних елементів кроквяної системи будівлі та великої кількості осадів у вигляді мокрого снігу, що випав напередодні.

- foundation subsidence caused by a decrease in the bearing capacity of the foundation soils;
- use of incorrect design solutions;
- failure to meet the requirements for load distribution in areas where load-bearing structures are based on masonry.

Let us examine a few examples of residential building accidents that have occurred in Ukraine in the past few years, not including those that were destroyed as a result of missile strikes and other military actions.

The media reported that around 7 residential building accidents occurred in the Chernihiv region during the study period, some of which resulted in human deaths. The reason for most of these cases is both the emergency condition of the building and human error (violation of operating rules).

On February 16, 2010, the roof of an apartment building collapsed in Chernihiv at 13 Korolyova Street (Fig. 1.2). Sixty residents of the building were evacuated. According to preliminary data, the collapse occurred as a result of low-quality elements of the building's truss system and a large amount of precipitation in the form of wet snow that had fallen the day before.



Рис. 1.2. Обвалення даху багатоквартирного житлового будинку, м. Чернігів / Collapse of the roof of an apartment building, Chernihiv

Після обвалу даху в житловому будинку на Корольова 13, подібна надзвичайна подія повторилася в дитячому садку № 36 м. Чернігова (рис. 1.3). На щастя, рано вранці, коли ні дітей, ні працівників дошкільного закладу в ньому не було. Причиною обвалу стало скупчення снігу на старезному даху будівлі.

After the roof collapsed in a residential building at 13 Korolyova Street, a similar emergency incident occurred in kindergarten No. 36 in Chernihiv (Fig. 1.3). Fortunately, it happened early in the morning, when neither children nor staff were present. The reason for the collapse was the accumulation of snow on the old roof of the building.



Рис. 1.3. Обвалення даху дитячого будинку, м. Чернігів / Collapse of the roof of kindergarten in Chernihiv

26 березня 2012 року по вулиці Козацька (колишня 50 років ВЛКСМ) у м. Чернігові стався вибух у п'ятиповерховому житловому будинку (рис. 1.4). Унаслідок вибуху дві людини загинуло, ще четверо поранені, зокрема, 9-річна дитина. За попередньою інформацією, вибух стався в одній із квартир на першому поверсі внаслідок витоків і займання побутового газу. Причиною цього є порушення правил користування газовою колонкою.

On March 26, 2012 an explosion occurred in a five-storey residential building on Kozatska Street (formerly 50 years of VLKSM) in Chernihiv (Fig. 1.4). Two people were lost in the explosion while four others sustained injuries, one of them being a 9-year-old child. According to preliminary information, the explosion occurred in one of the apartments on the first floor as a result of a leak and fire of household gas. It was caused by a violation of the rules for using a gas column.



Рис. 1.4. Вибух побутового газу в п'ятиповерховому житловому будинку, м. Чернігів / Partial collapse of the building of the school (collegium) №11 in Chernihiv

9 листопада 2012 року в Чернігівському колегіумі № 11 сталося обвалення приміщення спортзалу (рис. 1.5). Спочатку впала одна стіна, а через кілька годин будівля завалилася. Стіни впали, коли за-

On November 9, 2012, a gym of Chernihiv Collegium No. 11 collapsed (Fig. 1.5). It happened first, when one wall fell, and a few hours later the building collapsed. The walls fell when classes were not being held

няття там не проводили. Ніхто з людей не постраждав. Інцидент стався під час виконання будівельних робіт з утеплення фундаменту старої частини школи, до якої ще в 1951 році було прибудовано спортзал.

there. No one was injured. The incident occurred during the construction work to warm the foundation of the old part of the school, to which the gym was attached in 1951.



Рис. 1.5. Часткове обвалення будівлі школи (колегіуму) № 11 м. Чернігів / Partial collapse of the building of the school (collegium) № 11 in Chernihiv

10 червня 2012 року в м. Луцьк, під завалами п'ятиповерхового житлового будинку загинуло дві людини (рис. 1.6). Як повідомлялося в медіа, у п'ятиповерховому шести-під'їзному житловому будинку (1971 року забудови) між першим і другим під'їздами сталося раптове руйнування несучих конструкцій з першого по п'ятий поверхи.

Багатим на надзвичайні випадки став для одеситів 2012 рік. 12 квітня 2012 року в одному з одеських будинків завалився дах, а за ним упала і

On June 10, 2012 in Lutsk, two people died under the rubble of a five-story residential building (Fig. 1.6). According to reports in the media, the load-bearing structures on floors one to five of a five-story residential building built in 1971 collapsed unexpectedly between the first and second entrances.

The year 2012 was a year full of emergencies for Odesa residents. On April 12, 2012, the roof of an Odesa building collapsed, followed by a wall, but it was a miracle that

стіна, лише дивом ніхто не постраждав – мешканців квартир не було вдома. Дім знаходився в аварійному стані та частково виселений. Руйнування відбулося внаслідок втрати несучих властивостей конструкцій дерев'яних балок покрівлі.

no one was injured – the residents were not at home. The house was in a state of disrepair and partially evicted. The destruction occurred as a result of the loss of load-bearing properties of the wooden roof beams.



**Рис. 1.6. Обвалення п'ятиповерхового будинку м. Луцьк /
Collapse of a five-story building in Lutsk**

22 січня 2012 року м. Одеса обвалилася зовнішня стіна триповерхового житлового будинку на вулиці Лазарева, 27. Зруйнований фрагмент стіни з першого по другий поверх на площі 3×7 м.

On January 22, 2012, the facade of a three-story residential building at 27 Lazareva Street collapsed in Odesa. A fragment of the wall from the first to the second floor was destroyed on the area of 3×7 meters.

30 січня 2012 року обвалився фрагмент верхньої частини фасадної стіни житлової двоповерхової будівлі на 12 квартир у Приморському районі Одеси на вул. Пішонівська, 14. Будинок знаходився в аварійному стані й був частково відселений, мешканці проживали лише у 8 квартирах.

On January 30, 2012, a fragment of the upper part of the facade wall of a two-story residential building with 12 apartments collapsed in the Primorsky district of Odesa at 14 Pishonovska Street. The building was in a state of disrepair and was partially evicted, with residents living in only 8 apartments.

Існує багато будівель і споруд і в промисловому секторі, аварії котрих можуть привести до суттєвих збитків навколишньому сере-

There are a number of buildings and structures in the industrial sector whose accidents can lead to significant environmental damage. The

довищу. Щодо промислових будівель, причини їх аварій суттєво не відрізняються від будівель громадського призначення.

Наведемо декілька яскравих прикладів аварій у цьому секторі.

І знову місто Одеса. 06 червня 2012 року звалилася фасадна стіна колишнього заводу «Оріон» на вул. Лазарева, 72. Стіна обвалилася на трамвайні колії, що проходять повз заводу. Постраждалих нема.

10 червня 2010 року в Дрогобичі Львівської області сталося обвалення стіни на недіючому цегельному заводі «Кераміка». По попереднім даним обвал стався під час несанкціонованого демонтажу будівельних конструкцій, що спричинило раптове обвалення залізобетонного перекриття площею 150 квадратних метрів і несучої цегляної стіни площею 120 квадратних метрів. В результаті випадку одна людина загинула, ще двоє були травмовані.

27 листопада 2012 року в м. Глобино Полтавської області під час демонтажу стіни колишнього цегельного заводу стався обвал стіни, внаслідок чого загинула одна людина.

25 вересня 2012 року в м. Калуш Івано-Франківської області на території державного підприємства Калійний завод «Оріана» сталося обвалення стіни цеху під час її

reasons for industrial building emergencies are the same.

Let's provide some striking examples of accidents in this sector.

Again, the city of Odesa. On June 06, 2012, the facade wall of the former "Orion" plant at 72 Lazareva Street collapsed. The wall collapsed onto the tram tracks passing by the plant. There were no victims.

On 10 June 2010, in Drohobych of the Lviv region, a wall collapsed at the out-of-service brick factory "Keramika". According to preliminary data, the collapse occurred during the unauthorised dismantling of building structures, which caused the sudden collapse of a 150 square metre reinforced concrete floor and a 120 square metre brick wall. The incident resulted in the death of one person and the injuries of two others.

On 27 November 2012, in Globyno of Poltava region, during the dismantling of a wall of a former brick factory, a wall collapsed, killing one person.

On 25 September 2012, a wall of a workshop collapsed during dismantling in Kalush of Ivano-Frankivsk region at the state enterprise "Oriana" potash plant. One person died as a result of the incident.

On 15 February 2010, the roof of a forging shop of the Makarov Southern Machine-Building Enterprise collapsed in Dnepropetrovsk. According to preliminary data, the

демонтажу. Унаслідок інциденту загинула одна людина.

15 лютого 2010 року в м. Дніпропетровськ обвалилася покрівля ковальського цеху на виробничому об'єднанні «Південний машинобудівний завод ім. Макарова». За попередніми даними причиною обвалу стало скупчення снігових мас на даху триповерхової будівлі. Площа обвалення становила 500 метрів квадратних. Жертв немає.

У другій половині серпня 2009 року сталося одночасно дві аварії на території колишніх цукрових заводів. Так, 18 серпня 2009 року в місті Деражня Хмельницької області під час несанкціонованих робіт з демонтажу металоконструкцій на цукровому заводі обвалилося перекриття між 2 і 3 поверхами. Утворився завал висотою 3,5 м і площею близько 60 м², під якими загинула одна людина і троє опинилися в лікарні з тяжкими травмами.

19 серпня 2009 року в місті Сатанов завалився недіючий цукровий завод. Як і в попередньому випадку, обвал стався під час несанкціонованого демонтажу металоконструкцій. Одна людина загинула.

11 лютого 2011 року на криворізькому комбінаті обвалився залізобетонний дах площею 4,8 тис. м².

17 лютого 2011 року в м. Києві обвалився дах торговельного центру «SkyMall». Площа обвалення сягає 500 м². Травмовано людину.

collapse was caused by the accumulation of snow masses on the roof of the three-storey building. The area of the collapse was 500 square metres. There were no victims.

In the second half of August 2009, two accidents occurred simultaneously on the territory of former sugar factories. On 18 August 2009, a slab between the 2nd and 3rd floors of a sugar factory in Derazhnya of Khmelnytsky region, collapsed during unauthorised dismantling of metal structures. The resulting rubble was 3,5 metres high and covered an area of about 600 square metres, killing one person and leaving three people with serious injuries in hospital.

On 19 August 2009, a non-operating sugar factory collapsed in the town of Satanov. As in the previous case, the collapse occurred during the unauthorised dismantling of metal structures. One person was killed.

On 11 February 2011, a reinforced concrete roof covering an area of 4,8 thousand square metres collapsed at the plant in Kryvyi Rih.

On 17 February 2011, the roof of the "SkyMall" shopping centre collapsed in Kyiv. The area of the collapse reached 500 square metres. One person was injured. According to the media, the collapse was caused by the destruction of the metal structures of the slab between the ceiling and the roof of the centre.

За даними медіа обвалення сталося внаслідок руйнування металевих конструкцій перекриття між стелею та дахом центру.

11 грудня 2012 року на території криворізького комбінату ВАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» обвалився залізобетонний дах площею 4,8 тис. м². Жертв і постраждалих немає.

Таких випадків по всій Україні за досліджений період досить багато і тенденції до зниження рівня аварійності, на жаль, не передбачається. На території України ще є категорія будівель та споруд, яку можна віднести до так званих, потенційно небезпечних.

Так, певний час Інтернет ряснів заголовками «Чорнобиль очікує друга катастрофа». Річ йшла про нову вентиляційну трубу (НВТ-2), збудовану в листопаді 2011 році. Проте вже через півроку, під час чергової інспекції групи управління проектом виявилось, що вентиляційна труба тримається практично на чесному слові. На металевих конструкціях НВТ-2 було виявлено 14 тріщин зварних швів.

Аналіз вірогідних причин появи тріщин показує на наявність у багатьох елементах конструкції внутрішніх напружень, що є наслідком невдалої технології збирання та зварювання. На рис. 1.7 видно, що усі тріщини у вузлах НВТ-2 проходять по шву або біляшовної зони, або починалися від шва, тобто завжди були пов'язані з залишковими

On 11 December 2012, a reinforced concrete roof covering an area of 4,800 square metres collapsed on the territory of the "Northern Mining and Processing Plant" in Kryvyi Rih. There were no victims or injuries.

There were numerous cases of such occurrences throughout Ukraine during the period under review, and unfortunately, there is no tendency to reduce the level of accidents. There is still a category of buildings and structures in Ukraine that can be classified as potentially dangerous.

For example, at one time, the Internet was full of headlines saying "Chernobyl is facing a second disaster". It was about the new ventilation pipe (NVP-2), which was constructed in November 2011. However, six months later, during a regular inspection by the project management team, it was discovered that the ventilation pipe did not meet regulatory requirements. There were 14 weld cracks in the metal structures of the NVP-2.

An investigation of the potential reasons for the cracks demonstrates the presence of internal stresses in many structural elements, which are the result of poor assembly and welding technology. Fig. 1.7 demonstrates that all the cracks in the NVP-2 assemblies either run along the weld or near the weld zone, or started from the weld, i.e. they were always associated with residual stresses, indicating poor quality of the welded joints.

напруженнями, що вказує на неякісне виконання зварних з'єднань.



Рис. 1.7. Тріщини нової вентиляційної труби (НВТ-2) Чорнобильської АЕС / Cracks in the new ventilation pipe (NVP-2) of the Chernobyl NPS

Багато питань викликає і відсутність болтових з'єднань у місцях, де вони передбачені, що також є концентратором внутрішніх напружень (рис. 1.8).

The absence of bolted joints in places where they are supposed to be also raises many questions, which is also a concentrator of internal stresses (Fig. 1.8).



Рис. 1.8. Відсутність болтових з'єднань нової вентиляційної труби (НВТ-2) Чорнобильської АЕС / Absence of bolted connections of the new ventilation pipe (NVP-2) at the Chernobyl NPS

Таким чином, на підставі проведеного аналізу причин аварій будівель та споруд різного призначення, що сталися на території

Therefore, based on the analysis of the reasons for the accidents of buildings and structures for various purposes that have occurred in

України за останні п'ять років, можна зробити висновки, що найбільш незахищеним є житловий сектор, у якому аварійність сягає понад 35 %. Тому до основних причин аварій належать такі:

- недбалість комунальних господарств;
- низький рівень, а подекуди і відсутність технічного нагляду за станом будівель та споруд;
- не виконання вимог безпеки під час виконання робіт з реконструкції або ліквідації об'єктів.

За результатами досліджень побудовано гістограму аварійності будівель та споруд різного призначення за досліджуваний період (рис. 1.9).

Ukraine over the past five years, it can be concluded that the residential sector is the most vulnerable, with an accident rate of more than 35 %. Thus, the following reasons could be distinguished as the main causes of accidents:

- negligence of public utilities;
- low level, and sometimes lack of technical supervision over the condition of buildings and structures;
- failure to comply with safety requirements when performing reconstruction or liquidation works.

Based on the results of the research, a histogram of the accident rate of buildings and structures for various purposes for the period under study was produced (Fig. 1.9).

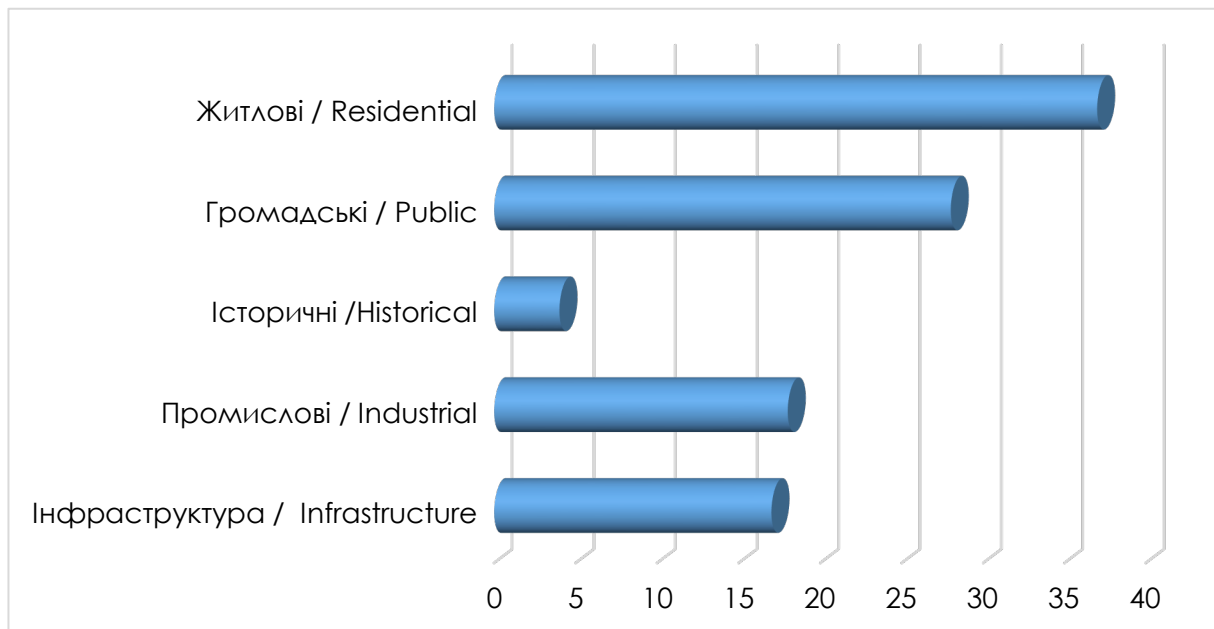


Рис. 1.9. Аналіз аварійності будівель та споруд різного призначення / Analysis of the accident rate of buildings and structures for various purposes

Уся інформація щодо аварій береться виключно із засобів масової інформації, але далеко не всі випадки подібного характеру

All information on incidents is obtained exclusively from the media, but

піддаються розголосу. Це значною мірою ускладнює процес ведення статистичних даних.

Можна назвати велику кількість заходів із запобігання аваріям будівель та споруд, але треба реально оцінювати ситуацію, і далеко не всі вони можуть бути реалізовані на практиці.

До тих заходів, що можуть бути фактично втілені, можна віднести такі:

1. Необхідність проведення класифікації будівель та споруд за ступенем їхньої небезпеки.

2. Визначення вимог безпеки для кожної з груп.

3. Створення загального реєстру об'єктів, що становлять реальну небезпеку для країни.

4. Підвищити якість моніторингу технічного стану будівель та споруд як житлового, так і промислового призначення. Це досягається шляхом:

- збільшення кількості періодичного та позапланового технічного нагляду;

- посилення вимог до організацій та спеціалістів технічного нагляду за будівництвом як на етапі забудівлі, так і задовго після здачі її в експлуатацію, тобто протягом всього життєвого циклу будівлі;

- доукомплектації або переукомплектації служби технічного нагляду за безпечною експлуатацією будівель та споруд відповідно до нормативних вимог.

not all cases of such nature are publicised, which greatly complicates the process of keeping statistics.

There are many ways to prevent accidents in buildings and structures, but it is necessary to assess the situation realistically because not all of them can be implemented in practice.

Among the measures that could be actually implemented are the following:

5. It is necessary to classify buildings and structures according to their degree of danger.

6. Determination of safety requirements for each group.

7. Creation of a general register of objects that pose a real danger to the country.

8. To improve the quality of monitoring the technical condition of buildings and structures, both residential and industrial. It can be achieved by:

- increasing the number of periodic and unscheduled technical supervision;

- toughening the requirements for organisations and specialists of technical supervision of construction both at the stage of construction and long after its commissioning, i.e. throughout the entire life cycle of the building;

- supplementing or re-staffing the technical supervision service for the safe operation of buildings and structures in accordance with regulatory requirements.

5. Своєчасне виведення з експлуатації будівель та споруд, що знаходяться в аварійному стані.

5. Decommissioning of buildings and structures in a state of disrepair in a timely manner.

Self-monitoring questions

Питання до самоконтролю

1. Які основні групи причин призводять до аварій будівель та споруд в Україні?

2. Як порушення технології будівництва впливає на безпеку експлуатації споруди?

3. Яку роль відіграє людський фактор у виникненні аварійних ситуацій?

4. Які приклади аварій будівель в Україні можна навести, що сталися через недотримання норм проектування і безпеки?

5. Чому несвоєчасне технічне обстеження споруд може призвести до катастрофічних наслідків?

6. Назвіть відомі випадки аварій, пов'язаних із неправильною експлуатацією будівель.

7. Як природні фактори (землетруси, повені, зсуви) впливають на стійкість споруд в Україні?

8. Які уроки для сучасного будівництва можна винести з аварій, що трапилися на території України?

9. Які нормативні документи регламентують безпеку проектування та експлуатації будівель в Україні?

10. Які заходи профілактики можуть знизити ризик виникнення аварій будівель та споруд?

1. What are the main groups of causes that lead to building and structure accidents in Ukraine?

2. How does a violation of construction technology affect the safety of a structure in operation?

3. What role does the human factor play in the occurrence of accidents?

4. What examples of building accidents in Ukraine can be cited that occurred due to non-compliance with design standards?

5. Why can untimely technical inspection of structures lead to catastrophic consequences?

6. Name known cases of accidents related to improper operation of buildings.

7. How do natural factors (earthquakes, floods, landslides) affect the stability of structures in Ukraine?

8. What lessons for modern construction can be learned from accidents that occurred in Ukraine?

9. Which regulatory documents govern the safety of building design and operation in Ukraine?

10. What preventive measures can reduce the risk of building and structure accidents?

CHAPTER 2

DEFECTS AND DAMAGES OF BUILDING STRUCTURES

РОЗДІЛ 2

ДЕФЕКТИ ТА ПОШКОДЖЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

2.1. Загальні поняття про дефекти та пошкодження

Якість будівництва характеризується сукупністю показників якості проєктів, матеріалів, які використовуються, виробів і конструкцій, а також виконання будівельно-монтажних робіт при зведенні будівель і споруд. На якість зведення конструкцій впливають і умови їх експлуатації. Брак, який допущений на кожному етапі проєктування, будівництва та експлуатації, відображається на загальному стані будівлі та споруди та виражається в дефектах окремих конструкцій.

Під дефектами будівельних конструкцій зазвичай розуміють невідповідність їх стандартам, технічним умовам, нормам проєктування та проєкту. Дефекти, які викликані зовнішніми впливами (механічними, тепловими) зазвичай називають пошкодженнями конструкцій.

У нормативній, довідковій літературі та в іншій технічній літературі поняття дефект та пошкодження різне. Дефектами прийнято вважати невідповідність конструкції будь-якому параметру, який встановлений проєктом або нормативним документом, а пошкодження – не-

2.1. General concepts of defects and damages

Construction quality is characterised by a set of indicators of the quality of projects, materials used, products and structures, as well as the performance of construction and installation works in the assembly of buildings and structures. The quality of construction is also affected by the conditions of their operation. Defects that occur at each stage of design, construction and operation are reflected in the overall condition of the building and structure and are evident in defects in individual structures.

Defects in building structures are usually defined as non-compliance with their standards, technical conditions, design and project norms. Defects caused by external factors (mechanical, thermal) are usually referred to as structural damages.

In regulatory, reference and other technical literature, the definition of defect and damage is different. Defects are generally defined as a failure of a structure to meet any parameter established by a project or regulatory document. Damage is a malfunction that a structure

справність, яку отримала конструкція при виготовленні, транспортуванні, монтажу та експлуатації.

Якщо прийняти таке визначення, то початково бездефектна конструкція, у якій виникла тріщина від навантаження, залишається бездефектною. Тому вважають, що поняття дефект є загальним, а поняття пошкодження – частковим, яке входить у поняття дефект.

Дефекти та пошкодження будівельних конструкцій класифікуються за такими ознаками: за матеріалом конструкцій, за частинами будівлі, яка має дефекти, за причинами, які їх викликали. Найбільше значення має класифікація дефектів за причинами, що їх викликали. За цією ознакою всі дефекти та пошкодження поділяються на ті, що викликані виробничими причинами та ті, що викликані технічними причинами.

До виробничих причин виникнення дефектів та пошкоджень будівельних конструкцій слід віднести помилки при проектуванні, неякісне виготовлення елементів конструкцій, помилки при виконанні будівельно-монтажних робіт, порушення правил експлуатації будівлі або споруди. Особливу групу причин виникнення дефектів складають помилки при проектуванні, які викликані відсутністю переліку умов виконання та монтажу конструкцій. У цьому випадку й в разі

has suffered during manufacture, transport, installation and operation.

Accepting such definition, an initially defect-free structure that has a crack due to loading remains defect-free. Therefore, it is assumed that the definition of defect is general, and the definition of damage is a particular one, which is included in the definition of defect.

Defects and damages of building structures are classified according to the following criteria: by the material of the structure, by the parts of the building that have defects, and by the reasons that led to them. The most important is the classification of defects by the reasons that led to them. According to this feature, all defects and damages are divided into those caused by production reasons and those caused by technical reasons.

The industrial reasons for defects and damage occurrence in building structures include design errors, poor quality of structural elements, errors in construction and installation works, violation of the rules of operation of a building or structure. A special group of reasons of defects is design errors occurrence, which are caused by the absence of a list of conditions for the execution and installation of structures. In this case, even if the project complies with the design standards, it is

дотримання в проєкті норм проєктування створити якісну конструкцію не є можливим.

Дефекти та пошкодження, що утворилися в результаті механічних впливів, є результатом недостатньої несучої здатності елементів конструкції внаслідок недоліків проєкту та/або дефектним виконанням або перевантаженням конструкції під час експлуатації. Також пошкодження, що виникли в результаті зовнішніх впливів навколишнього агресивного середовища, намоканням конструкції тощо.

Класифікація дефектів за причинами, які їх викликали, дозволяє встановити джерела дефектів та правильно вибрати способи їх запобігання.

Більшість усіх дефектів, які були виявлені в будівлях і спорудах, виникають через порушення технології виконання, зведення та монтажу конструкцій.

Будівельники повинні пам'ятати, що якщо у проєкті є помилки, будівельні матеріали та вироби низької якості, то збудувати високоякісну конструкцію неможливо. Тому перш ніж розпочати будівництво будівлі, необхідно ретельно вивчити проєкт, виявити в ньому недоліки та узгодити з проєктною організацією відповідні зміни. При виготовленні та монтажу конструкцій необхідно впевнитись в їхній відповідності стан-

considered impossible to create a high-quality structure.

Defects and damages caused by mechanical influences are the result of insufficient load-bearing capacity of structural elements due to project errors and/or defective execution or overloading of the structure during operation. They also include damages caused by external influences of the aggressive environment, wetting of the structure, etc.

The classification of defects by the reasons that led to them allows to identify the sources of defects and to choose the right ways to prevent them.

More than half of all defects observed in buildings and structures are caused by violations of the technology of construction, erection and installation of structures.

Builders should remember that if there are mistakes in the project, and if low-quality building materials and products are used, it is impossible to build a high-quality structure. Therefore, before starting the building process, it is necessary to carefully review the project, to identify any potential defects and to coordinate the relevant changes with the design organisation. During the manufacture and installation of structures, it is necessary to ensure that they comply with the standard, technical specifications and the

дарту, технічним умовам та проєкту. Якщо цього не зробити, то збудована будівля буде мати дефекти.

Кожний дефект характеризується причинами, які викликали його, розмірами пошкодження конструкцій та можливими наслідками.

Дефекти можуть погіршувати нормальні умови експлуатації (порушувати температурно-вологісний режим приміщень, знижувати звукоізоляцію огорожуючих конструкцій, підвищувати експлуатаційні витрати на будівлю та ін.), знижувати несучу здатність конструкції, зменшувати її довговічність, призводити до часткового руйнування конструкцій та до аварій будівель або споруд.

Аварії будівельних конструкцій виникають найчастіше не з однієї причини, а через помилки і порушення норм та правил проєктування, зведення та експлуатації будівель та споруд.

Усі дефекти будівельних конструкцій, за винятком тих, які викликані стихійними лихами, можна пояснити браком точності нагляду з боку інженерно-технічного персоналу проєктних, будівельних та експлуатаційних організацій, невисокою кваліфікацією виконавців та, у певних випадках, відсутністю їхньої зацікавленості у випуску високоякісної продукції.

Задача інженерно-технічних робітників усіх ступенів полягає у

project. Otherwise, the constructed building will have defects.

Each defect is characterised by the reasons that caused it, by the extent of structural damage and by possible consequences.

Defects could deteriorate normal operating conditions for example to disrupt the temperature and humidity conditions of the premises, to reduce the sound insulation of the enclosing structures, to increase the operating costs of the building, etc. Defects also could lead to reducing the bearing capacity of the structure and to reducing the durability of it. They are could lead to partial destruction of structures and to accidents of buildings or structures.

Accidents of building structures most often occur neither for one reason, but due to a number of errors and failures to comply with the rules and regulations for the design, construction and operation of buildings and structures.

All defects in building structures, with the exception of those caused by natural disasters, could be described as a result of inaccurate supervision of the engineering and technical staff of design, the construction and operating organisations. They are also could occur due to the low qualifications of executors and, in some cases, their lack of interest in producing high-quality products.

тому, щоб на всіх етапах будівництва випускати лише якісну продукцію, яка задовольняє технічним вимогам та нормам. Суворе дотримання норм проєктування на етапі проєктних робіт, кваліфікаційна експертиза проєктно-кошторисної документації, дотримання стандартів та технічних умов на будівельні матеріали та виробни, технології виготовлення виробів у заводських умовах, безумовне виконання будівельних норм та правил виконання та прийому будівельно-монтажних робіт на будівельному майданчику, створення нормальних експлуатаційних умов після здачі будівель та споруд в експлуатацію забезпечує бездефектне виконання будівельних конструкцій та збільшення строків їхньої служби.

Основним засобом боротьби з виникненням дефектів будівельних конструкцій є здійснення належного контролю за проєктуванням, виготовленням конструкцій, будівництвом будівлі, споруди та їх правильна експлуатація. Помилки проєктів повинні бути виявлені шляхом перехресної перевірки в підрозділах проєктної організації, відомчої експертизи проєктів, при вивченні проєктно-кошторисної документації замовником та підрядником. У період будівельно-монтажних робіт необхідний якісний технічний нагляд замовника та авторський нагляд проєктної організації.

The task of engineers and technicians of all levels is to produce only high-quality products that fully satisfy technical requirements and standards at all stages of construction. Strict adherence to design standards at the design stage, qualification expertise of design and estimate documentation, compliance with standards and specifications for construction materials and products, manufacturing technologies for products in the factory, unconditional compliance with building codes and rules for performing and accepting construction and installation works at the construction site, and the creation of normal operating conditions after the buildings and structures are commissioned ensure defect-free construction of building structures and an increase in their service life.

The key instrument to prevent the occurrence of defects in building structures is to carry out proper control over the design, manufacture of structures, construction of buildings and structures and their proper operation. Design errors should be identified by cross-checking with the design organisation's departments, departmental project expertise, and by reviewing design and estimate documentation by the client and contractor. During the construction and installation works, high-quality technical supervision of the

Останніми роками з розпадом великих проєктних і будівельно-монтажних організацій та появою багатьох дрібних організацій такого ж самого профілю різко знизилась якість будівництва. Особливо це відображається на зведенні невеликих об'єктів, наприклад котеджів. Замовники, економлячи гроші, замовляють проєкт у некваліфікованих виконавців, доручають будувати випадковим людям. У результаті з'явилося багато будівель із серйозними дефектами, у стані близькому до аварійного, а деякі будівлі просто руйнуються ще у процесі їх зведення. Не можна економити на проєктних роботах, а будівництво будівлі потрібно доручати тільки солідним будівельним організаціям. Інакше переробка та підсилення дефектних конструкцій потребує більших затрат, які значно перевищують початкову «економію».

Однією з найважливіших задач технічного обстеження будівлі або споруди є виявлення дефектів. Виявлені дефекти необхідно правильно діагностувати, що не завжди легко, особливо коли вони скриті, далі визначити причини їх появи. Для вибору правильного методу усунення дефектів необхідно кількісно визначити вплив дефектів на експлуатаційні якості будівельних конструкцій.

customer and the designer's supervision of the design organisation are required.

In recent years, with the collapse of large design and construction and installation organisations and the establishment of many small organisations of the same profile, the quality of construction has declined sharply. This is especially reflected in the construction of small objects, such as cottages. To save money, customers order projects from unqualified contractors and assign construction to random people. As a result, there are many buildings with serious defects, in a state of near emergency, and some buildings are simply collapsing in the process of construction. It is impossible to save money on design work, and the construction of a building should be assigned only to reputable construction organisations. Otherwise, redesigning and reinforcing defective structures requires higher costs that far exceed the initial "savings".

One of the most important tasks of a technical inspection of a building or structure is to identify defects. The identified defects need to be correctly diagnosed, which is not always easy, especially when they are hidden. Then, the causes of their appearance need to be determined. The impact of defects on the performance of building structures must be quantified in order to choose the right method of defect elimination.

2.2. Класифікація дефектів та пошкоджень будівельних конструкцій

Як уже було зазначено вище, класифікація дефектів та пошкоджень будівель та споруд різного призначення здійснюється за такими ознаками:

1. За матеріалом конструкцій – на дефекти збірних залізобетонних конструкцій, дефекти металоконструкцій, дефекти кам'яних конструкцій, дефекти дерев'яних конструкцій;

2. За частинами будівлі, яка має дефекти, – балки, плити, колони, ферми, стіни, фундаменти тощо;

3. За причинами, що спричинили їх появу – викликані недоопрацюванням при проєктуванні; викликані помилками при їх виготовленні й монтажу; викликані зовнішніми впливами (фізичні, механічні, хімічні); викликані порушеннями правил експлуатації.

Оскільки на території України, зокрема в м. Чернігові та Чернігівській області переважає залізобетонна та кам'яна забудова надалі доцільно буде детально розглянути саме їх.

2.3. Дефекти та пошкодження залізобетонних конструкцій

Дефекти та пошкодження залізобетонних конструкцій найчастіше стають наслідком різних фізичних, механічних та навіть хімічних

2.2. Classification of defects and damages of building structures

As it was mentioned above, the classification of defects and damages of buildings and structures for various purposes is carried out on the following features:

1. By material of construction. Defects are divided into defects in precast concrete structures, defects in metal structures, defects in stone structures, and defects in wooden structures.

2. By parts of the building that have defects – beams, slabs, columns, trusses, walls, foundations, etc.

3. By the reasons that caused their appearance. Defects are divided into those caused by lack of design; those caused by errors in their manufacture and installation; those caused by external influences (physical, mechanical, chemical); those caused by violations of the operating rules.

Since reinforced concrete and stone buildings predominate on the territory of Ukraine, in particular in the city of Chernihiv and Chernihiv region, it will be appropriate to consider them in detail in the future.

2.3. Defects and damage to reinforced concrete structures

Defects and damage to reinforced concrete structures are most often the result of various physical,

впливів. До фізико-механічних впливів слід віднести перенавантаження елементів конструкції, циклічність заморожування та відтавання, усадка внаслідок дії високих температур, деградація бетону під дією вогню. Пошкодження залізобетонних конструкцій хімічного походження пов'язані з корозійними процесами, ініціалізація яких може бути пов'язана як із хімічним складом компонент самого бетону, так і з впливом зовнішніх агентів. В обох випадках мікроструктура бетону відіграє фундаментальну роль, оскільки чим щільніший матеріал, тим вища його механічна міцність і тим ефективніший він у запобіганні передачі агресивних речовин.

2.3.1. Фізико-механічні пошкодження залізобетонних конструкцій

Перенавантаження здебільшого стає основною причиною руйнування залізобетонних конструкцій та їхніх окремих елементів. Останнє безпосередньо пов'язане з перевищенням докладеного навантаження такого, що може витримати конструкція або її елемент, або із надмірним осіданням, пов'язаним із переміщенням ґрунту. Перенавантаження може бути результатом надмірного статичного (постійне збільшення дефор-

mechanical and even chemical influences. Among the physical and mechanical impacts are the overloading of structural elements, cyclic freezing and thawing, shrinkage due to high temperatures, and degradation of concrete under fire. Damages to reinforced concrete structures of chemical origin are associated with corrosion processes, the initiation of which could be related to both the chemical composition of the concrete components and the influence of external agents. In both cases, the microstructure of the concrete plays a fundamental role. It is because the denser the material, the higher its mechanical strength and the more effective it is in preventing the transfer of aggressive substances.

2.3.1. Physical and mechanical damages to reinforced concrete structures

Overloading, in most cases, is the main reason for the destruction to reinforced concrete structures and their individual elements. The latter is directly related to the excess of the applied load over the capacity of the structure or its element, or to excessive subsidence caused by ground movement. Overloading could be the result of excessive static (a constant increase of strain under a constant load) or dynamic (alternating)

мації під дією постійного навантаження) або динамічного (знакомінного) навантаження, наприклад, під дією сейсмічних явищ.

В обох випадках, внутрішні напруження, що виникають у конструкції після припинення дії навантажень, стають причиною появи дефектів, кількість та розміри яких постійно збільшуються, що стають причиною зниження життєвого циклу будівлі (рис. 2.1).

loading, for example, due to seismic phenomena. In both cases, the internal stresses that occur in the structure after the loads are no longer applied lead to defects.

Their number and size are constantly increasing, resulting in a reduction in the life cycle of the building (Fig. 2.1).



Рис. 2.1. Руйнування несучих елементів залізобетонних конструкцій під дією перенавантажень / Destruction of load-bearing elements to reinforced concrete structures under overloads

Міцність матеріалу, а отже, і його стійкість до перевантажень залежить від багатьох факторів, таких як склад бетону, його вік і коефіцієнт армування залізобетонних конструкцій.

Цикли заморожування та відтавання залізобетонних конструкцій є однією з основних причин руйнування залізобетонних конструкцій в умовах помірно континентального клімату, притаманного Україні. Вагомим фактором тут є температура зовнішнього повітря. Так, волога, що утворилася в результаті

The strength of the material and, consequently, its resistance to overload depends on many factors, such as the composition of the concrete, its age and the reinforcement factor of reinforced concrete structures.

The freezing and thawing cycles of reinforced concrete structures are one of the main reasons for the destruction of reinforced concrete structures in the temperate continental climate of Ukraine. The temperature of the outside air is an important factor in this regard. Thus, the moisture formed because of melting snow

розтавання снігових мас при потеплінні, проникає всередину капілярів цементного каменю і накопичується там. Наступне зниження температур нижче нуля призводить до повторного заморожування води всередині пор, що супроводжується суттєвим поверхневим, або навіть об'ємним зростанням матеріалу з утворенням значних внутрішніх напружень у капілярах залізобетону. Такі кліматичні впливи стають причиною утворення відшарування захисного шару бетону або появи тріщин (рис. 2.2). Найчастіше спостерігаються одночасна поява обох дефектів.

masses during warming penetrates the capillaries of the cement paste and accumulates there. The subsequent decrease in temperature below zero leads to the re-freezing of moisture inside the pores, which is accompanied by a significant surface or even volumetric growth of the material with the formation of significant internal stresses in the capillaries of reinforced concrete. Such climatic influences lead to the formation of concrete protective layer delamination or the appearance of cracks (Fig. 2.2). In most cases, both defects occur simultaneously.

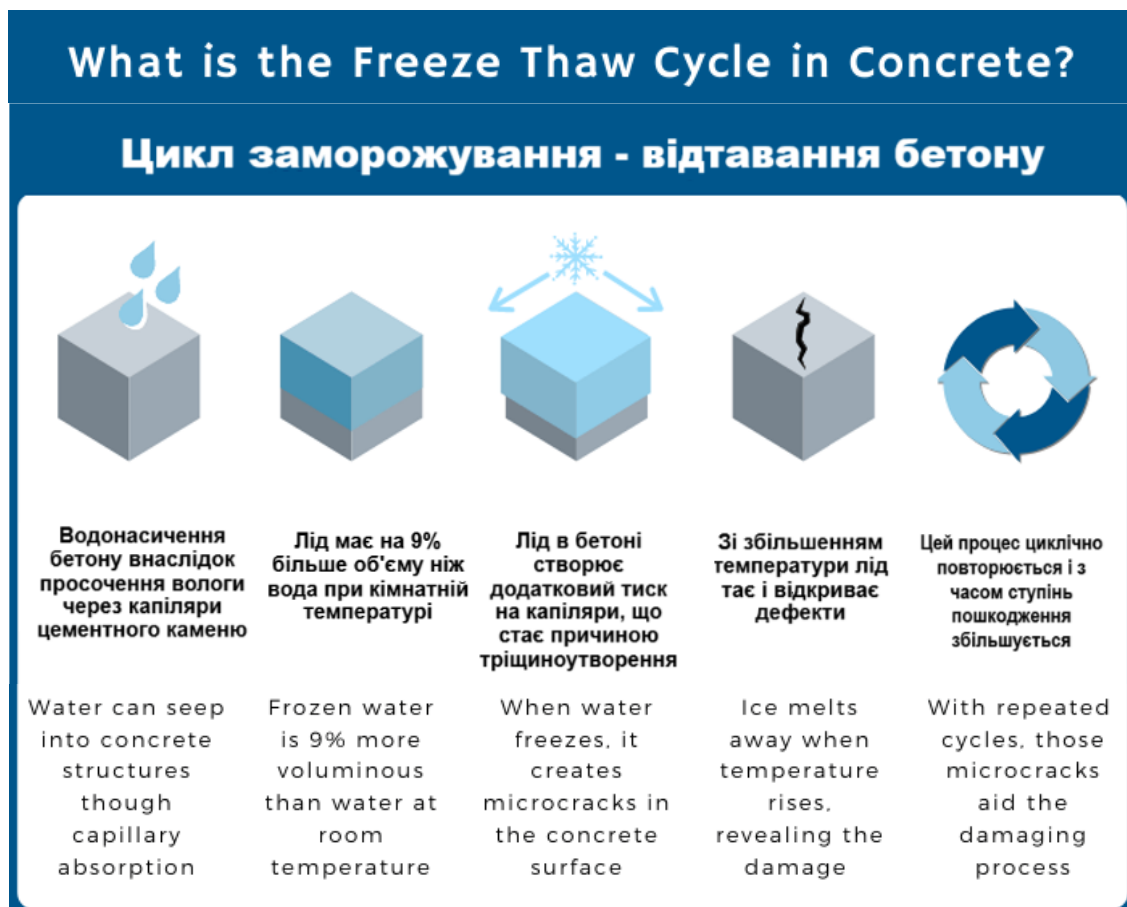


Рис. 2.2. Руйнування залізобетону під впливом циклів заморожування та відтавання / Destruction of reinforced concrete under the influence of freezing and thawing cycles

Однак слід зазначити, що далеко не всі бетони однаково гідрофільні. Ця властивість буде визначатись природою агрегатних складових залізобетону. Чутливі до зовнішньої вологи агрегати являють собою систему дрібних відкритих і закритих пор. Останні схильні до розтріскування під дією перепадів температур.

Загалом, бетон стійкий до пошкоджень від замерзання-розморожування, коли вільна вода може рухатися крізь капілярні пори, поки не досягне «бульбашок», де лід може вільно розширюватися, не створюючи надмірних внутрішніх напружень (рис. 2.3).

However, it should be noted that not all concrete is equally hydrophilic. Such property will be determined by the nature of the aggregate components of reinforced concrete. Aggregates sensitive to external moisture represent a system of small open and closed pores. The latter are prone to cracking under the influence of temperature changes.

In general, concrete is resistant to freeze-thaw damage. It is caused by the free water being able to move through the capillary pores until it reaches the 'bubbles' where the ice can expand freely without creating excessive internal stresses (Fig. 2.3).

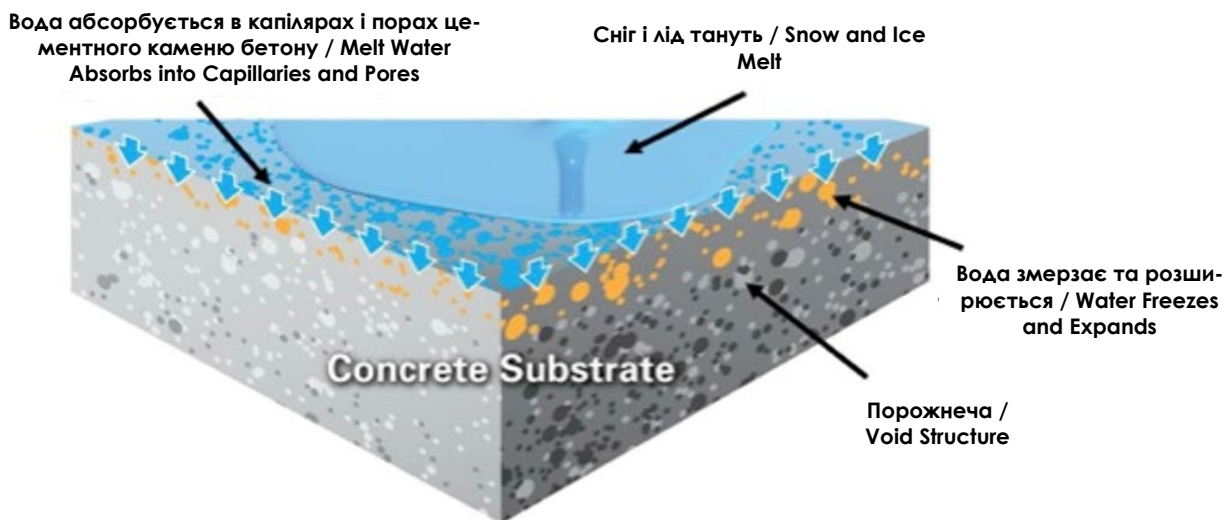


Рис. 2.3. Проникнення вологи в пори та капіляри цементного каменю / Moisture penetration into the pores and capillaries of cement stone

Усадка бетону – це процес скорочення обсягу бетонної суміші під впливом зовнішніх факторів, наприклад, при бетонуванні в умовах високих температур, після застигання. Цей процес може від-

Concrete shrinkage is the process of reducing the volume of a concrete mix under the influence of external factors, for example, during concreting at high temperatures, after hardening. Such process could occur within a few months after the

буватися протягом декількох місяців після заливання бетону та може впливати на якість та міцність будівельних конструкцій.

Причини усадки можуть бути різними, основними серед яких є:

1. Вміст води в суміші. Велика кількість води в бетонній суміші може призвести до значної усадки через випаровування води під час його затвердіння (висихання бетону викликає надлишок води, що випаровується з капілярів, і цементне тісто стискається, щоб компенсувати зміну поверхневої енергії).

2. Властивості використаного цементу. Деякі типи цементу можуть призводити до більшої усадки, особливо якщо вони використовуються у великих кількостях.

3. Температурні коливання. Різкі зміни температури навколишнього середовища можуть призвести до усадки через термальну напругу в бетоні.

4. Товщина та форма конструкції. Товщина та форма конструкції також можуть впливати на рівень усадки, зокрема масивні конструкції можуть мати велику усадку. Оскільки теплопровідність бетону низька, підвищення температури не є однорідним, і периферійні частини залишаються при нижчій температурі. Як відомо, внутрішні частини мають більшу тенденцію до теплового розширення, що створює деформації розтягу в периферійних частин і є додатковою причиною розтріскування бетону.

concrete is poured and could affect the quality and durability of the building structures.

There are various reasons for shrinkage, the main ones being:

1. Water content in the mixture. A large amount of water in the concrete mix could lead to significant shrinkage due to the water evaporating during hardening (drying of the concrete leads to excess water evaporating from the capillaries and the cement batter shrinking to compensate for the change in surface energy).

2. Properties of the used cement. Some types of cement could lead to greater shrinkage, especially if they are used in large quantities.

3. Temperature variations. Abrupt changes in surrounding temperature could lead to shrinkage due to thermal stress in the concrete.

4. Thickness and shape of the structure. The thickness and shape of the structure could also affect the level of shrinkage, in particular massive structures may have a greater shrinkage. Since the thermal conductivity of concrete is low, the temperature increase is not homogeneous and the peripheral parts remain at a lower temperature. It is known that the inner parts have a greater tendency to thermal expansion, which generates tensile deformations in the peripheral parts and becomes an additional reason for concrete cracking.

Іншим механізмом, який може викликати тріщини, є термічне розтріскування в ранньому віці. Тріщини, викликані такою усадкою, зазвичай невеликі і не глибокі, глибина обмежена, оскільки міцність матеріалу з часом зростає (рис. 2.4).

Another mechanism that could lead to the crack formation is a thermal cracking at an early age. The cracks caused by this shrinkage are usually small and shallow, with a limited depth as the strength of the material increases over time (Fig. 2.4).

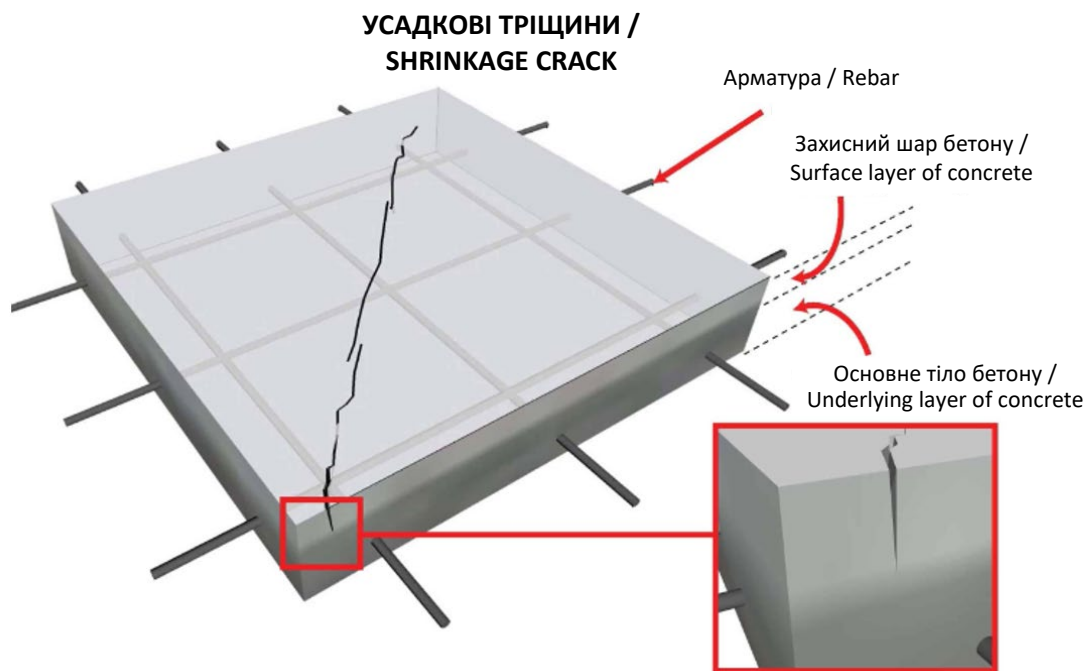


Рис. 2.4. Усадочні тріщини в залізобетоні / Shrinkage cracks in reinforced concrete

Таким чином, серед факторів, що стимулюють утворення усадочних тріщин у залізобетонних конструкціях, є як властивості самого матеріалу, так і навколишнє середовище. Так, наприклад, коли свіжа цементна паста містить надлишок води, яка з часом має тенденцію до випаровування, або ж суттєва різниця температур між бетоном та повітрям навколишнього середовища. У будь-якому випадку, догляд за бетоном у процесі його затвердіння, повинен містити операцію обприскування

Thus, among the factors that contribute to the formation of shrinkage cracks in reinforced concrete structures are both the properties of the material itself and the environment. For example, when the fresh cement paste contains excess water, which has a tendency to evaporate over time, or when there is a significant temperature difference between the concrete and the surrounding air. In any case, concrete treatment during the hardening process should include spraying or wa-

або поливання бетонної поверхні водою, тим самим захищаючи бетон від шкідливого впливу агресивного навколишнього середовища.

Вплив вогню. Попри те, що бетон вважається негорючим матеріалом, пожежа є однією з найпоширеніших причин пошкодження залізобетонних конструкцій. Поведінка бетону в умовах пожежі пов'язана з температурними властивостями самого матеріалу. Як вже зазначалось вище, бетони характеризуються низьким, в порівнянні зі сталями, коефіцієнтом теплопровідності. У зв'язку з цим, тривала дія вогню на бетон викликає появу суттєвого градієнта температур в його об'ємі. Разом із високою тепловою інерційністю бетону, область ядра може нагріватися доволі довго. Відомо, що міцність бетону на стиск швидко втрачається під дією певних критичних температур. Однак ефективність конструкції не знижується, доки увесь об'єм матеріалу не досягне однакової температури.

Іншою проблемою, що виникає в бетоні під дією вогню, є відколювання. Проте слід зазначити, що появі та розвитку цього виду дефекту може сприяти не лише високі температури, а й агресивні впливи навколишнього середовища, зумовлені проникненням шкідливих агентів в пористу структуру цементного каменю (дефекти від хіміч-

tering the concrete surface with water, thereby protecting the concrete from the negative effects of aggressive environment.

Fire impact. Despite the fact that concrete is considered a refractory material, fire is one of the most common reasons for damage to reinforced concrete structures. The concrete behaviour in fire conditions is related to the temperature properties of the material itself. As it was already mentioned above, concrete is characterised by a low thermal conductivity coefficient compared to steel. In this regard, prolonged exposure of fire onto concrete provokes a significant temperature gradient in its volume. Together with the high thermal inertia of concrete, the core area can heat up for a long time. It is well known that the compressive strength of concrete is rapidly reduced at certain critical temperatures. However, the efficiency of the structure does not decrease until the entire volume of material reaches the same temperature.

Another problem that occurs in concrete under the influence of fire is chipping. However, it should be noted that the appearance and development of this type of defect could be facilitated not only by high temperatures but also by aggressive environmental influences caused by the penetration of harmful agents into the porous structure of cement

них впливів будуть розглянуті нижче). При пожежі відколювання найчастіше має вибухоподібний характер і є прямою загрозою людському життю та критичній інфраструктурі поблизу. Відколювання бетону здебільшого вказує на початковий стан, коли бетон починає відколюватися і загальні ознаки включають розтріскування, розсипання або відшарування бетону, плями іржі, бульбашки на бетоні або цементній штукатурці та внутрішні витoki з даху або стін.

Розрізняють такі види відколювань, що можуть виникати в залізобетоні:

- вибухове відколювання;
- відколювання заповнювачів;
- крайове відколювання;
- розшарування;
- відколювання на етапі охолодження.

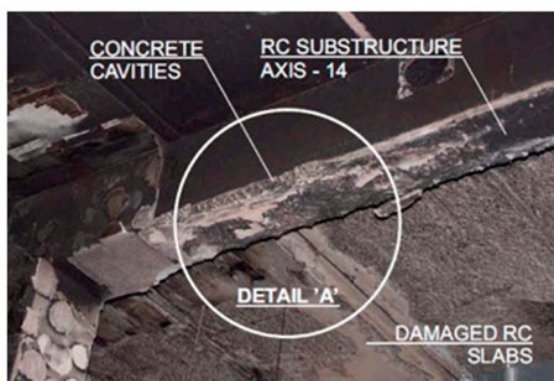
Приклади таких руйнувань наведено на рис. 2.5 та рис. 2.6.

stone (defects from chemical influences will be discussed below). During a fire, chipping is quite often poses an explosion nature and is a direct threat to human life and nearby critical infrastructure. Concrete chipping generally indicates an initial condition where the concrete is beginning to chip away and common features include cracking, crumbling or peeling concrete, rust stains, bubbles on the concrete or cement plaster and internal leaks from the roof or walls.

There are following types of chipping that could occur in reinforced concrete:

- explosive spalling;
- filler spalling;
- edge spalling;
- delamination;
- chipping at the cooling stage.

Examples of such destruction are shown in Fig. 2.5 and Fig. 2.6 accordingly.

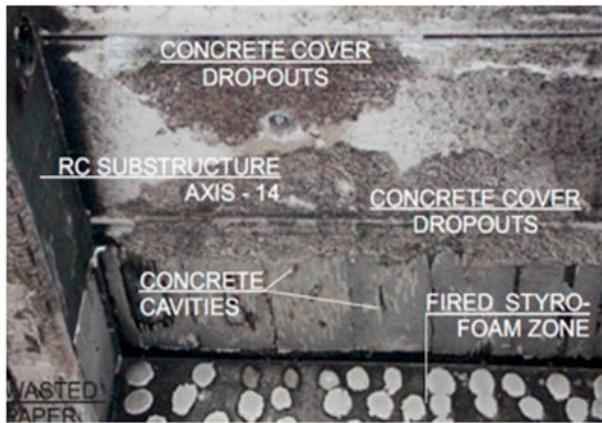


а / а

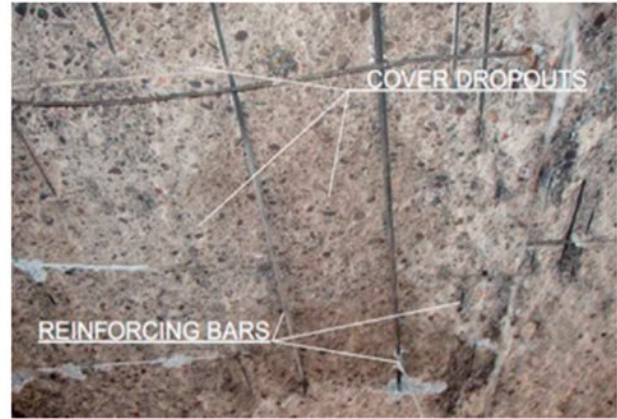


б / б

Рис. 2.5. Відколювання захисного шару бетону в результаті тривалої дії вогню: область обпирання (а), проліт (б) / Spalling of the protective layer of concrete as a result of prolonged effects of fire: the area of supporting (a), span (b)



a / a



b / b

Рис. 2.6. Відколювання захисного шару бетону в результаті тривалої дії вогню: на стіні (а), на плиті перекриття (б) / Spalling of the protective layer of concrete because of prolonged effects of fire: on the wall (a), on the floor slabs (b)

Виникнення відколів пов'язано з появою внутрішніх напружень, що виникають усередині елемента як результат дії механічних сил, що утворюються внаслідок теплового розширення вологи всередині бетону в умовах пожежу (рис. 2.7). Однак слід зазначити, що відколювання може виникати як за умов швидкого нагрівання під дією сильного градієнта температур у його об'ємі, так і на етапі його охолодження.

Загалом, утворенню відколювання захисного шару бетону під дією вогню сприяють такі фактори: випинання арматури, зменшення водопроникності, підвищення щільності бетону, суттєва вологовіддача, окрихчування бетону. Таким чином, фізико-хіміко та механічні властивості бетону погіршуються під впливом високих температур.

The occurrence of spalling is associated with the appearance of internal stresses arising inside the element because of mechanical forces generated by the thermal expansion of moisture inside the concrete under the fire conditions (Fig. 2.7). However, it should be noted that the chipping can occur both under conditions of rapid heating under the influence of a strong temperature gradient in its volume and during its cooling.

In general, the following factors contribute to the formation of chipping of the protective layer of concrete under the influence of fire are bulging of reinforcement, reduced water permeability, increased concrete density, significant moisture loss, and concrete embrittlement. Thus, the physical, chemical and mechanical properties of concrete deteriorate under the influence of high temperatures.

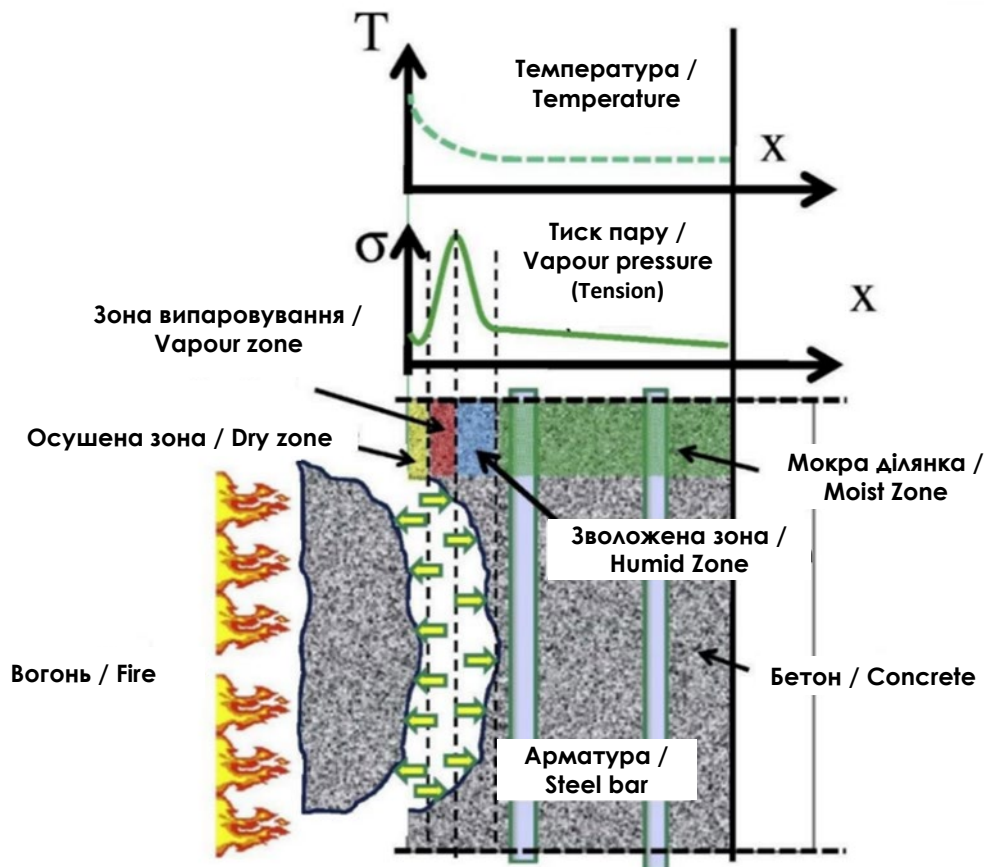


Рис. 2.7. Утворення відколювання захисного шару залізобетону під дією вогню / Spalling of the protective layer of reinforced concrete under the influence of fire

Основні фізико-хімічні зміни властивостей бетону, що виникають під дією високих температур, можна описати таким чином:

- стрімке випаровування порової води бетону при температурі від 100 °C і вище;
- в області температур 200-350 °C спостерігається різка втрата ваги як результат втрати води, яка стає хімічно зв'язаною в гідратах силікату кальцію;
- за межами плато вологості, коли температура досягне приблизно 400 °C, гідроксид кальцію (портландіт) Ca(OH)_2 у цементі почне дегідратувати й розкладатися,

The main physical and chemical changes in concrete properties that occur under the influence of high temperatures could be described as follows:

- rapid evaporation of pore moisture in concrete at temperatures from 100 °C and above;
- in the temperature range of 200-350 °C, a rapid weight loss is observed as a result of moisture loss, which becomes chemically bound in hydrates of calcium silicate;
- beyond the plateau of humidity, when the temperature reaches approximately 400 °C, the calcium hydroxide (portlandite) Ca(OH)_2 in the cement will begin to dehydrate

генеруючи більше водяної пари, спричиняючи значному зниженню фізичної міцності бетону.

– вище за 500 °C втрата маси продовжується. Однак з меншою швидкістю, у результаті розкладання гідроксиду кальцію (C-H) і (C-S-H), змінюються фази в кремнієвих заповнювачів;

– при температурі 700 °C відбувається декарбонізація карбонату кальцію і вапнякові заповнювачі починають розкладатися при 800–990 °C.

Загалом, механізм деградації бетону під дією високих температур при пожежі зображено на рис. 2.8.

and decompose generating more water vapour, causing a significant reduction in the physical strength of the concrete.

– above 500 °C, the mass loss continues, but at a slower rate, as a result of the decomposition of calcium hydroxide (C-H) and (C-S-H), the phases in silicon aggregates change;

– at 700 °C there is a decarbonisation of calcium carbonate and limestone aggregates begin to decompose at 800-990 °C.

In general, the mechanism of concrete degradation under the influence of high temperatures in a fire is shown in Fig. 2.8.

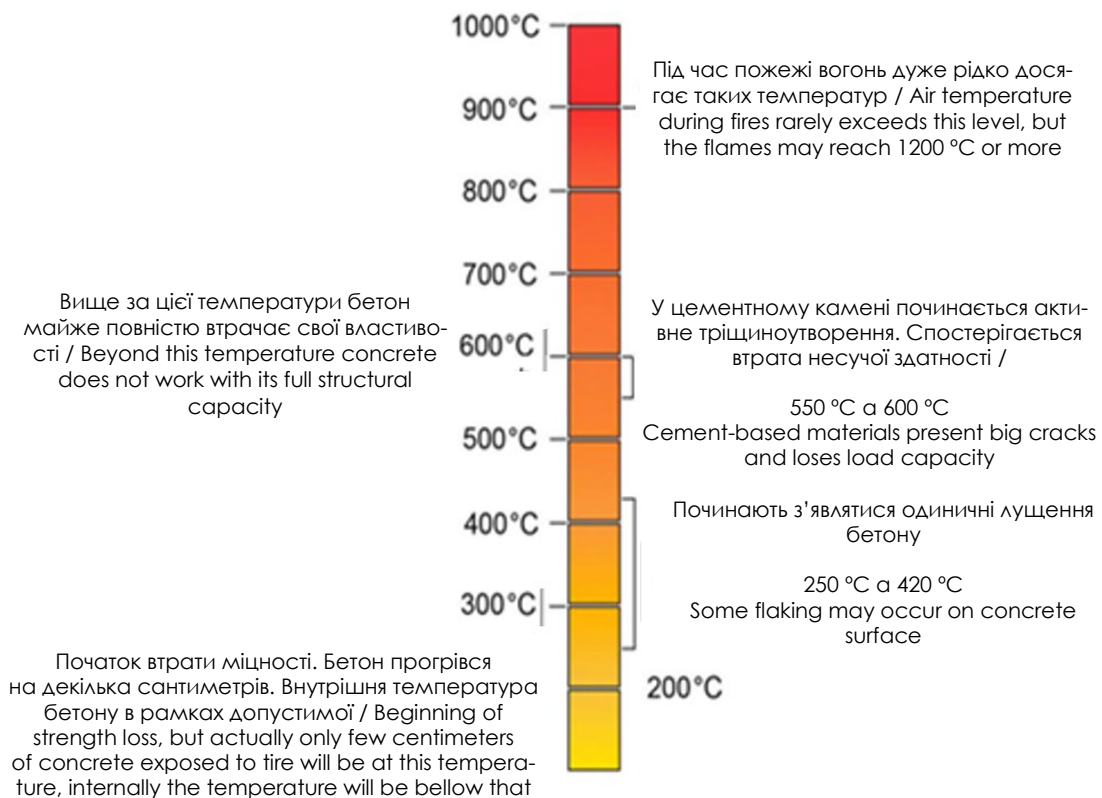


Рис. 2.8. Деградація бетону в умовах дії тривалих високих температур / Concrete degradation under conditions of prolonged high temperatures

Слід зазначити, що порогова температура деградації механічних властивостей бетону сильно залежить від складу його заповнювачів і становить: для піщаних (легких) бетонів – 650 °C, карбонатного бетону – 660 °C, кремнеземного – 450 °C.

2.3.2. Дефекти та пошкодження залізобетонних конструкцій у результаті хімічних реакцій

Корозія залізобетону. На сьогодні бетонні та залізобетонні конструкції є незамінною складовою будь-якого будівництва, що зумовлено насамперед його високими експлуатаційними якостями, надійністю, швидкістю зведення тощо. Однак багаторічний досвід використання бетонних систем поряд із перевагами визначив і недоліки, пов'язані передусім зі стрімким погіршенням технічного та експлуатаційного станів залізобетонних конструкцій (ЗБК) внаслідок значних корозійних впливів з боку атмосфери. Таким чином, питання забезпечення надійного антикорозійного захисту металевих армуючих елементів ЗБК є пріоритетним завданням сучасного будівництва.

Відомо, що основу бетону складає цементний камінь, що характеризується системою пор та капілярів і слугують своєрідним

It should be noted that the critical temperature of degradation of the mechanical properties of concrete strongly depends on the composition of its aggregates and is for sand (lightweight) concrete – 650 °C, carbonate concrete – 660 °C, silica concrete – 450 °C.

2.3.2. Defects and damage to reinforced concrete structures caused by the chemical reactions

Corrosion of reinforced concrete. Today, concrete and reinforced concrete structures are an irreplaceable component of any construction process, primarily due to their high performance, reliability, speed of construction, etc. However, years of experience in the use of concrete systems, along with their advantages, have also highlighted a number of disadvantages, primarily related to the rapid deterioration of the technical and operational conditions of reinforced concrete structures (RCS) due to significant corrosion effects from the atmosphere. Thus, the issue of ensuring reliable anti-corrosion protection of metal reinforcing elements of RCS products is a priority for modern construction.

It is well known that the cement stone is the basis of concrete, characterised by a system of pores and capillaries that serve as a kind of

стоком вологи та агресивних компонентів навколишнього середовища (хлоридів, сульфатів, вуглекислих газів тощо). Останнє стає причиною цілої низки деструктивних змін в структурі та, відповідно, властивостях залізобетону.

Як показано в роботах з початком експлуатації конструкції, металева арматура залізобетону знаходиться в пасивованому стані лужного навколишнього середовища із $\text{pH} \approx 12 \dots 13$. З часом відбувається зміна хімічного складу накопиченої порами рідини, що супроводжується зміною pH до рівня $\text{pH} \approx 7 \dots 9$. Такі зміни, в свою чергу, призводять до порушення пасивного стану металу арматури та закладних елементів залізобетону, що стає причиною ініціалізації низки хімічних реакцій на її поверхні і, як результат, корозії арматури. Своєю чергою, корозія арматури залізобетону є одним із вирішальних факторів, що обумовлює технічний стан будівель і споруд загалом і тягне за собою багато негативних наслідків: зниження адгезії арматури і бетону; утворення тріщин та руйнування захисного шару бетону; зниження робочого перерізу арматури, що призводить до часткової або повної втрати несучої здатності елементів конструкції (рис. 2.9). Ці дефекти, рано чи пізно, стають причиною відмови роботи конструкції та її руйнування (рис. 2.10).

drainage of moisture and the aggressive environmental components (chlorides, sulphates, carbon dioxides, etc.). The latter causes a number of destructive changes in the structure and, consequently, in the properties of reinforced concrete.

According to works, at the beginning of the structure's operation, the reinforced concrete reinforcement is in a passive state of alkaline environment with a $\text{pH} \approx 12 \dots 13$. Over time, the chemical composition of the liquid accumulated by the pores changes, leading to a change in $\text{pH} \approx 7 \dots 9$. Such changes, in turn, lead to a disruption of the passive state of the reinforcement metal and reinforcing elements of reinforced concrete, which leads to the initiation of a series of chemical reactions on its surface and, as a result, to corrosion of the reinforcement. In turn, corrosion of reinforced concrete reinforcement is one of the decisive factors that determines the technical condition of buildings and structures in general. It entails a number of negative consequences: reduced adhesion of reinforcement and concrete; cracking and destruction of the protective layer of concrete; reduction of the reinforcement's cross-section, which leads to a partial or complete loss of the bearing capacity of structural elements (Fig. 2.9). These defects, eventually, lead to structural failure and destruction (Fig. 2.10).

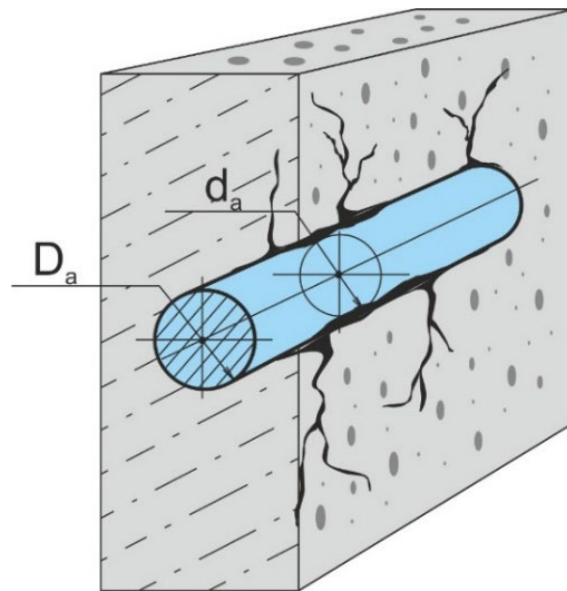


Рис. 2.9. Схематичне зображення тріщиноутворення в залізобетоні внаслідок корозійних впливів на металеву арматуру:

D_a - розрахунковий переріз арматури; d_a – зменшений переріз арматури внаслідок тривалої дії корозії /

Schematic representation of crack formation in reinforced concrete due to corrosion effects on metal reinforcement:

D_a – design reinforcement cross-section; d_a – reduced reinforcement cross-section due to prolonged corrosion



Рис. 2.10. Руйнування залізобетонних конструкцій внаслідок корозійних впливів / Destruction of reinforced concrete structures due to corrosion

Розрізняють такі види корозії залізобетону:

- корозія, при якій відбувається виніс та вилуговування легкорозчинних компонентів із бетонної матриці;
- корозія, викликана карбонізацією бетону;
- корозія, викликана дією агресивних компонентів навколишнього середовища (хлоридів, сульфатів, різних кислот тощо), у результаті якої відбувається хімічне руйнування компонентів бетону.

Під вилуговуванням бетону розуміють процес розчинення і винесення гідроокису кальцію $\text{Ca}(\text{OH})$ з тіла бетону водою, що фільтрується через його товщину. У цьому випадку порушується хімічна рівновага між рідиною в порах і складовими компонентами цементного каменю. Характерною зовнішньою ознакою цього виду корозії є поява білого нальоту на стінах бетонних споруд у місцях виходу води при фільтрації (рис. 2.11).

There are the following types of corrosion of reinforced concrete:

- corrosion, which involves the removal and leaching of readily soluble components from the concrete matrix;
- corrosion caused by carbonisation of concrete;
- corrosion caused by aggressive environmental components (chlorides, sulphates, various acids, etc.), which results in chemical destruction of concrete components.

Concrete leaching is the process of dissolving and removing calcium hydroxide $\text{Ca}(\text{OH})$ from the concrete body with water filtered through its thickness. In this case, the chemical equilibrium between the liquid in the pores and the constituent components of the cement stone is disturbed. An external characteristic of this type of corrosion is the occurrence of white deposits on the walls of concrete structures at the points where water leaves during filtration (Fig. 2.11).



Рис. 2.11. Корозія бетону внаслідок вилуговування / Concrete corrosion due to leaching

Карбонізація залізобетону, у порівнянні з першим типом корозії, є більш тривалим процесом, і час від початку корозії до руйнації конструкції становить десятиріччя. Останнє буде залежати від типу бетону. Відомо, що глибина карбонізації маломіцного може досягати 20 - 25 мм за 10 років. У той час як більш щільний бетон високої міцності може кородувати протягом 50 років.

Карбонізація відбувається, коли вуглекислий газ (CO_2) з навколишнього повітря або атмосферних опадів потрапляє в бетон, утворюючи в його капілярах вугільну кислоту H_2CO_3 , яка вступає в хімічну реакцію із портландітом (гідроксидом кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$) із утворенням карбонату кальцію (CaCO_3). Процес карбонізації та формула, за якою відбувається хімічна реакція, проілюстровано на рис. 2.12.

Compared to the first type of corrosion, carbonisation of reinforced concrete is a longer process, and the time from the onset of corrosion to structural failure is decades. The latter will depend on the type of concrete. It is known that the depth of carbonisation of low-strength concrete can reach 20-25 mm over 10 years. While denser high-strength concrete can corrode within 50 years.

Carbonisation occurs when carbon dioxide (CO_2) from the surrounding air or precipitation penetrates the concrete. At the same time, carbonic acid H_2CO_3 is formed in its capillaries, which reacts chemically with portlandite (calcium hydroxide $\text{Ca}(\text{OH})_2$) to form calcium carbonate (CaCO_3). The carbonisation process and the chemical reaction formula are illustrated in Fig. 2.12.

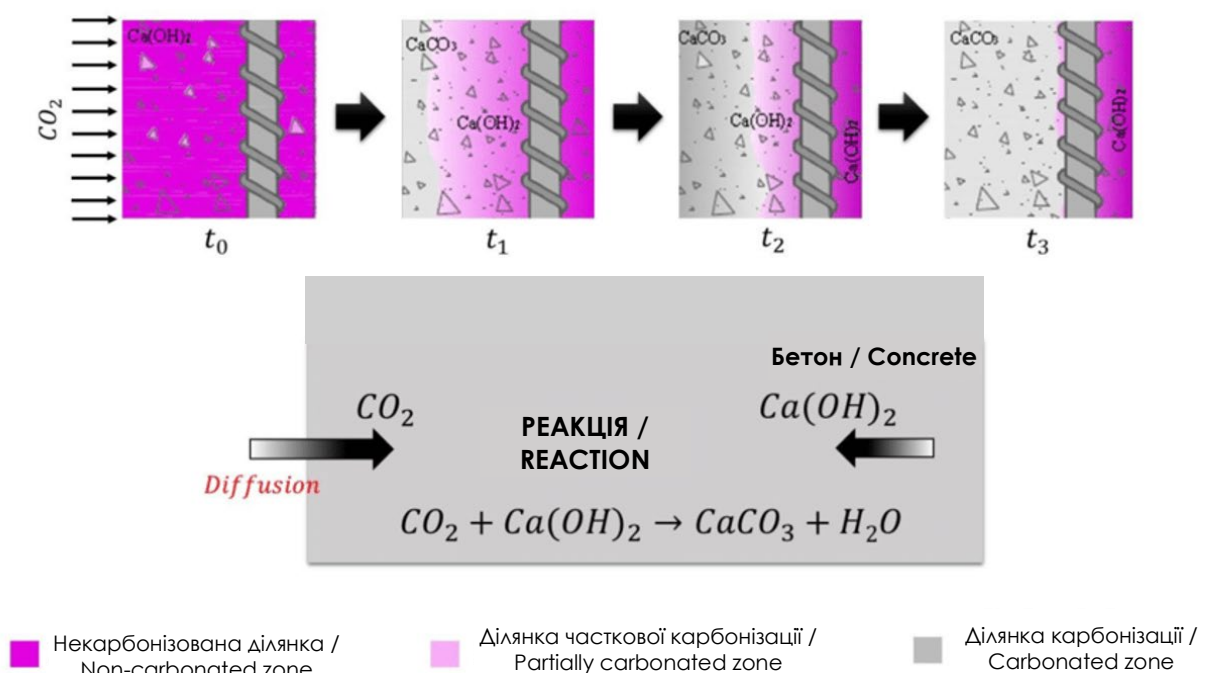


Рис. 2.12. Карбонізація бетону / Carbonization of concrete

Слід зауважити, що при цьому не відбувається миттєвої руйнації бетону. Потрібен досить тривалий час, коли фронт карбонізації досягне армування, де рН падає нижче 13 (до рівня $\text{pH} \approx 7 \dots 9$), пасивований зовнішній шар арматури руйнується і починається корозія. При цьому спочатку в бетоні утворюються тріщини, у результаті порушення адгезії арматури з бетонною матрицею, розвиток до повного розкриття яких може тривати роками. Після повного розкриття поздовжніх тріщин відбувається відшарування (*delamination*) захисного шару бетону й арматура оголюється, що суттєво прискорює корозійні процеси на її поверхні.

Корозія залізобетону внаслідок атаки хлоридів. Цей тип корозії залізобетону пов'язаний із присутністю в навколишньому середовищі іонів хлориду, наприклад, в умовах морського середовища або внаслідок використання значної кількості антиожедних солей. Іони хлориду проникають у бетон шляхом дифузії через пори або наявні поверхневі тріщини, наприклад, унаслідок механічних пошкоджень, або викликані усадкою бетону. Коли іони хлориду досягають арматури, вони можуть викликати корозію. Такий механізм руйнування залізобетону проілюстровано на рис. 2.13.

It should be noted that there is no instantaneous destruction of concrete. It takes quite a long time before the carbonisation front reaches the reinforcement, where the pH drops below 13 units (to a pH of approximately 7...9 units), and the passivated external layer of the reinforcement is destroyed and the corrosion begins. At first, cracks are formed in the concrete as a result of the disruption of the reinforcement's adhesion to the concrete matrix, which can take years to develop until they are fully opened. After the longitudinal cracks are fully opened, the protective layer of concrete is delaminated and the reinforcement is exposed, which significantly accelerates corrosion processes on its surface.

Corrosion of reinforced concrete due to chloride attack. This type of corrosion of reinforced concrete is associated with the presence of chloride ions in the environment, for example, in marine environments, or due to the use of significant amounts of de-icing salts. Chloride ions penetrate into concrete by diffusion through pores or existing surface cracks, e.g. as a result of mechanical damage or shrinkage of the concrete. When chloride ions achieve the reinforcement, they could lead to corrosion. This mechanism of reinforced concrete failure can be illustrated in Fig. 2.13.

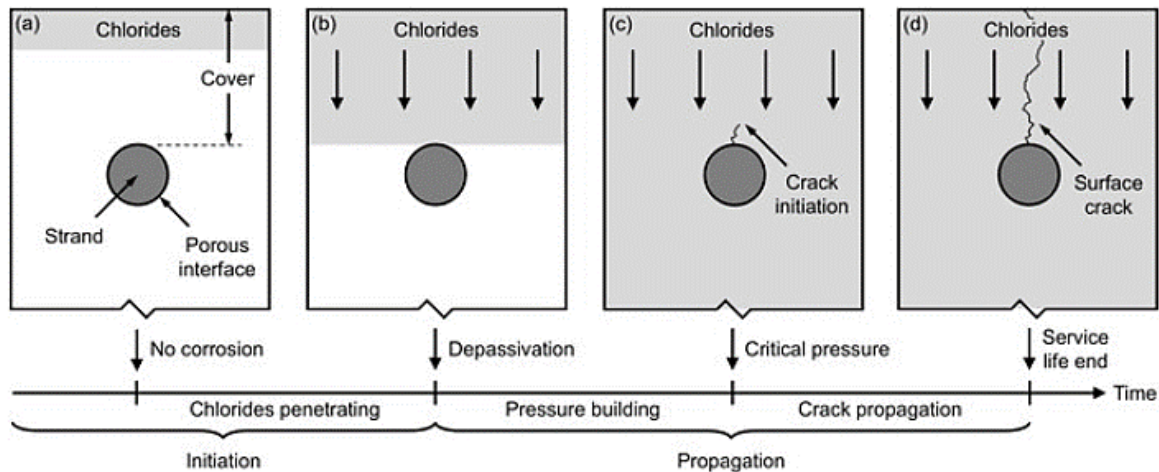


Рис. 2.13. Схематичне зображення процесу корозії залізобетону, викликаного впливом хлоридів / Schematic view of the corrosion process of reinforced concrete caused by the influence of chlorides

На рис. 2.14 наведено дерево дефектів, ініційованих під впливом корозійних процесів у залізобетонних конструкціях.

In Fig. 2.14 a tree of defects initiated by corrosion processes in reinforced concrete structures is given.

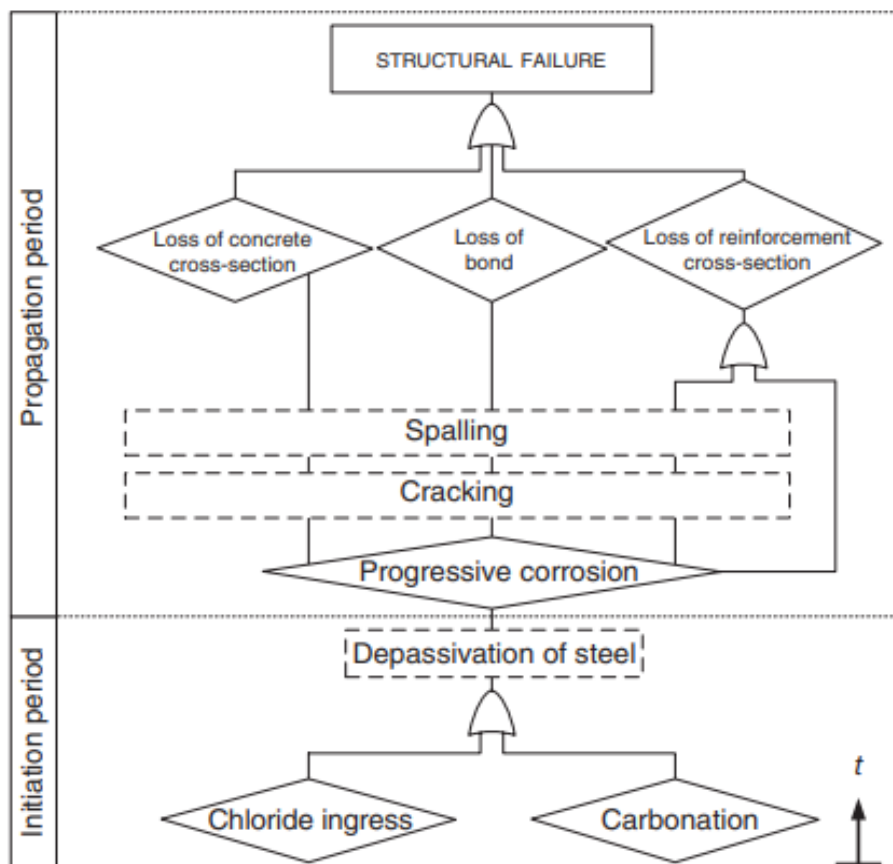


Рис. 2.14. Дерево дефектів залізобетону від впливу корозійних процесів / Tree of defects in reinforced concrete from the influence of corrosion processes

Таким чином, можна зазначити, що дефекти викликані в результаті хімічних реакцій мають значний вплив на життєвий цикл будівель і споруд поряд із дефектами, викликаними механічними впливами.

2.3.3. Дефекти та пошкодження кам'яних конструкцій

При проєктуванні кам'яних конструкцій будівель і споруд у багатьох випадків ухвалюються рішення, які призводять до дефектного стану цих конструкцій. У деяких проєктних рішеннях несучі цегляні стовпи перерізуються конструкціями зі збірного залізобетону. Для частини перерізу стовпа опорою слугує залізобетонна конструкція, а для іншого – цегляна кладка. Оскільки залізобетон значно жорсткіший за цегляну кладку, то все навантаження від стовпа практично передається тільки в межах площі дотику стовпа із залізобетоном. Некратність розмірів залізобетонної конструкції та рядів кладки з цегли посилює цей дефект.

Через різницю коефіцієнтів лінійного розширення кладки та залізобетону між торцями залізобетонних перемичок і кладкою утворюється зазор. Тріщини не наскрізні й зазвичай зачіпають тільки зовнішній ряд кладки стін. Неприпустимо передбачати в проєкті в межах одного поверху кілька марок цегли й розчину, адже це призводить до появи елементів із заниженою проти проєкту міцністю.

Thus, it can be noted that the chemical defects have a massive impact on building and structure's life cycle along with those that were caused mechanically.

2.3.3. Defects and damage of masonry structures

While designing stone structures of buildings and structures, in some cases, there are solutions that lead to a defective state of these structures. In some design solutions, the load-bearing brick pillars are crossed by precast concrete structures. A reinforced concrete structure supports a part of the column cross-section, and brickwork supports the other part. This is because reinforced concrete is much stiffer than brickwork, so the entire load from the pillar is practically transferred only within the area of contact between the pillar and the reinforced concrete. The fact that the dimensions of the reinforced concrete structure and the brickwork rows are not a multiple of each other exacerbates this defect.

Due to the difference in the coefficients of linear expansion of masonry and reinforced concrete, a gap between the ends of the reinforced concrete lintels and the masonry is formed. Cracks are not cross-cutting and usually affect only the outer row of masonry walls. It is unacceptable to provide for several brands of bricks and mortar on the

До основних причин виникнення дефектів кам'яних конструкцій належать такі:

- помилки у проєктуванні. Неправильний розрахунок навантажень, неправильно спроектовано вузли сполучення, не враховано ексцентриситет, відсутність повної інформації при проєктуванні;
- використання матеріалів низької якості;
- застосування виду та марок цегли і розчину, що не відповідають проєкту;
- неякісна перев'язка цегли у кладці, відсутність перев'язки позовдовжніх стін з поперечними;
- пропуск або заниження перетинів зв'язків стін з колонами і перекриттям;
- потовщення горизонтальних швів кладки;
- погане заповнення розчином вертикальних швів кладки;
- укладання прогонів і балок на стіни і стовпи без опорних плит;
- недостатня довжина обпирання перемичок на стіни;
- пропуск або зменшення кількості арматури в армокам'яних конструкціях;
- нерівномірне осідання фундаментів, стін, стовпів;
- неправильно оцінені інженерно-геологічні умови;
- температурні деформації;
- неправильне виконання температурних, осадкових і антисейсмічних швів;

same floor. It results in the appearance of elements with lower strength than the designed one.

The main reasons for the occurrence of defects in masonry structures include the following:

- errors in the design. Incorrect calculation of loads, incorrectly designed connection joints, failure to take into account eccentricity, lack of complete information during design;
- use of low-quality materials;
- the use of types and brands of bricks and mortar that do not correspond to the project;
- poor-quality brick ligation in masonry, lack of ligation of longitudinal walls with transverse walls;
- skipping or underestimation of the intersections of wall connections with columns and ceilings;
- thickening of horizontal masonry joints;
- poor filling of vertical masonry joints with mortar;
- laying of girders and beams on walls and pillars without base plates;
- insufficient length of lintels bearing on walls;
- skipping or reducing the number of reinforcement bars in reinforced concrete structures;
- uneven deposition of foundations, walls, pillars;
- incorrectly assessed engineering and geological conditions;
- temperature deformations;

- дефекти кладки через порушення правил виробництва робіт у зимових умовах.

З-поміж найбільш характерних дефектів кам'яних конструкцій можуть бути виділені такі:

- деформації стін (прогини, відхилення від норми);
- сколи, тріщини, вибоїни та інші дефекти кладки;
- зволоження кладки стін;
- вивітрювання розчину;
- пошкодження шарів кладки;
- руйнування несучого шару кладки.

Деформація стін цегляних конструкцій може з'явитись у результаті таких чинників:

- допущення конструкційних помилок. Це може статися через нерівномірне осідання частини споруди. У результаті з'являються напруги, що призводять до утворення тріщин у вкладці або повному розриві. Також помилка може полягати в тому, що застосовувалися теплі розчини з неправильними добавками та підвищеною зольністю;

- незадовільна експлуатація. Це означає, що просідання основи трапилася через перезволоження кладки стін, внаслідок несправності зливів, водопровідних труб. Причиною міг стати порушений шарнирний зв'язок стін із диском покриття, порушення постановки балок, що призвело до відхилення стін від осі, випучення ділянок стіни;

- виробничі помилки. До них належать пробивання прорізів у

- improper execution of temperature, settlement and anti-seismic joints;

- masonry defects due to violation of the rules of manufacturing works in winter conditions.

The most typical defects of masonry structures include the following:

- walls deformations (deflections, deviations from the norm);
- chips, cracks, potholes and other masonry defects;
- moisturising of masonry walls;
- mortar weathering;
- damage to masonry layers;
- destruction of the masonry bearing layer.

Deformation of the brick-made structure walls could occur because of the following factors:

- construction errors. It may occur due to uneven deposition of a part of the structure. This results in stresses that lead to the formation of cracks in the liner or complete rupture. The error may also be as a result of using warm mortars with incorrect components and high ash content;

- unsatisfactory exploitation. It means that the subsidence of the foundation was caused by overmoistening of the masonry walls, because of malfunctioning drains and water pipes. The reason could be a broken hinge connection between the walls and the slab disc, or a disturbed position of the beams, which led to the walls deviating from the axis and bulging sections of the wall;

кладці з цегли з порушеною технологічною роботою, проведення штукатурних робіт слабким цементом або жирним розчином, фарбування стін олійними розчинами, неякісне оздоблення стін, розробка перекриттів за неправильною технологією, укладання стін без перекриттів та розподільних плит;

- помилки при проектуванні. Це можуть бути неправильне визначення навантажень на стіни, збільшення поверховості споруди, розташування майбутньої будівлі без зміцнення ґрунту з додатковим навантаженням.

Причинами утворення сколів, тріщин та вибоїн найчастіше є такі:

- використання під час будівельних робіт неякісного розчину. Ця причина є найголовнішою та найпоширенішою;

- порушені пропорції розчину, що накладається;

- сколи можуть утворитися через те, що будівля зводилася з непередбаченими отворами або внаслідок підвищених навантажень;

- вибоїни можуть виявитися через неправильні розрахунки конструкції, неправильне дослідження ґрунту;

- внаслідок порушення технології будівництва;

- внаслідок перепадів температур;

- внаслідок пошкодження, пов'язаного з ерозією, фізичним зношуванням або природним старінням кладки;

- production errors. These include drilling holes in brickwork with a broken process, plastering with weak cement or greasy mortar, painting walls with oil-based solutions, poor wall finishes, constructing slabs using incorrect technology, laying walls without slabs and distribution boards;

- design errors. These may include incorrect determination of loads on walls, increasing the number of storeys of a building, location of the future building without strengthening the ground with additional load.

The most common reasons for the formation of chips, cracks and potholes are as follows:

- use of low-quality mortar during construction work. This reason is the most important and widespread;

- the proportions of the mortar being applied are disturbed;

- chips could be formed due to the fact that the building was constructed with unanticipated holes or as a result of increased loads;

- potholes could be caused by incorrect design calculations, incorrect soil surveys;

- due to violation of the construction technology;

- due to temperature changes;

- due to damage caused by erosion, physical wear and tear or natural aging of the masonry;

- внаслідок нерівномірного осідання будівлі;
- внаслідок намокання, промерзання або вивітрювання стін;
- внаслідок ураження зони стіни пліснявою та внаслідок впливу інших негативних зовнішніх факторів.

Зволоження кладки найчастіше стає причиною таких факторів:

- вплив атмосферних опадів. При цьому буде пошкоджено покрівлю, стануть непридатними водостічні труби, жолоби, водозливи;
- витік із водопровідно-каналізаційної труби. Витіки здатні призвести до руйнування кладки стін (найчастіше руйнування піддаються будівлі з силікатної цегли);
- через конденсат водяної пари повітря. Зволоження капілярним та електроосмотичним підсмоктуванням.

Зовнішній вигляд основних дефектів кам'яної кладки зображено на рис. 2.15.

Неоднорідність швів, що спричиняє найбільший вплив на міцність кладки, є прихованою. У зв'язку з чим, стає важко оцінити кількісно рівень дефектності кам'яної конструкції.

Застосування неправильної перев'язки цегли, що порушує зв'язок верстових рядів із забутовкою, заповнення забутовки стін цегельним боєм можуть привести до обвалення сильно навантажених стовпів і простінків і відшарування зовнішньої кладки від забутовки на протяжних ділянках стіни.

- due to uneven deposition of the building;
- due to wetting, freezing or weathering of the walls;
- due to damage to the wall zone by mould and due to other negative external factors.

Moistening of masonry is most often caused by the following factors:

- exposure to atmospheric precipitation. This may damage the roof, drainage pipes, gutters, and downspouts;
- leak from water and sewage pipes. Leaks could lead to the destruction of masonry walls (more often than not, buildings made of silicate bricks are subject to destruction);
- due to condensation of water vapour in the air. Moisturising with capillary and electro-osmotic suction.

The appearance of the main masonry defects is shown in Fig. 2.15.

The heterogeneity of the connections which has the greatest impact on the strength of the masonry is hidden. Therefore, it becomes difficult to evaluate the level of defects in the masonry structure quantitatively.

The use of improper brick tying, which disrupts the connection between the verst rows and the infill, and filling the infill walls with brick strips can lead to the collapse of heavy-loaded pillars and walls and to the detachment of the outer verst from the infill over extended sections of the wall.

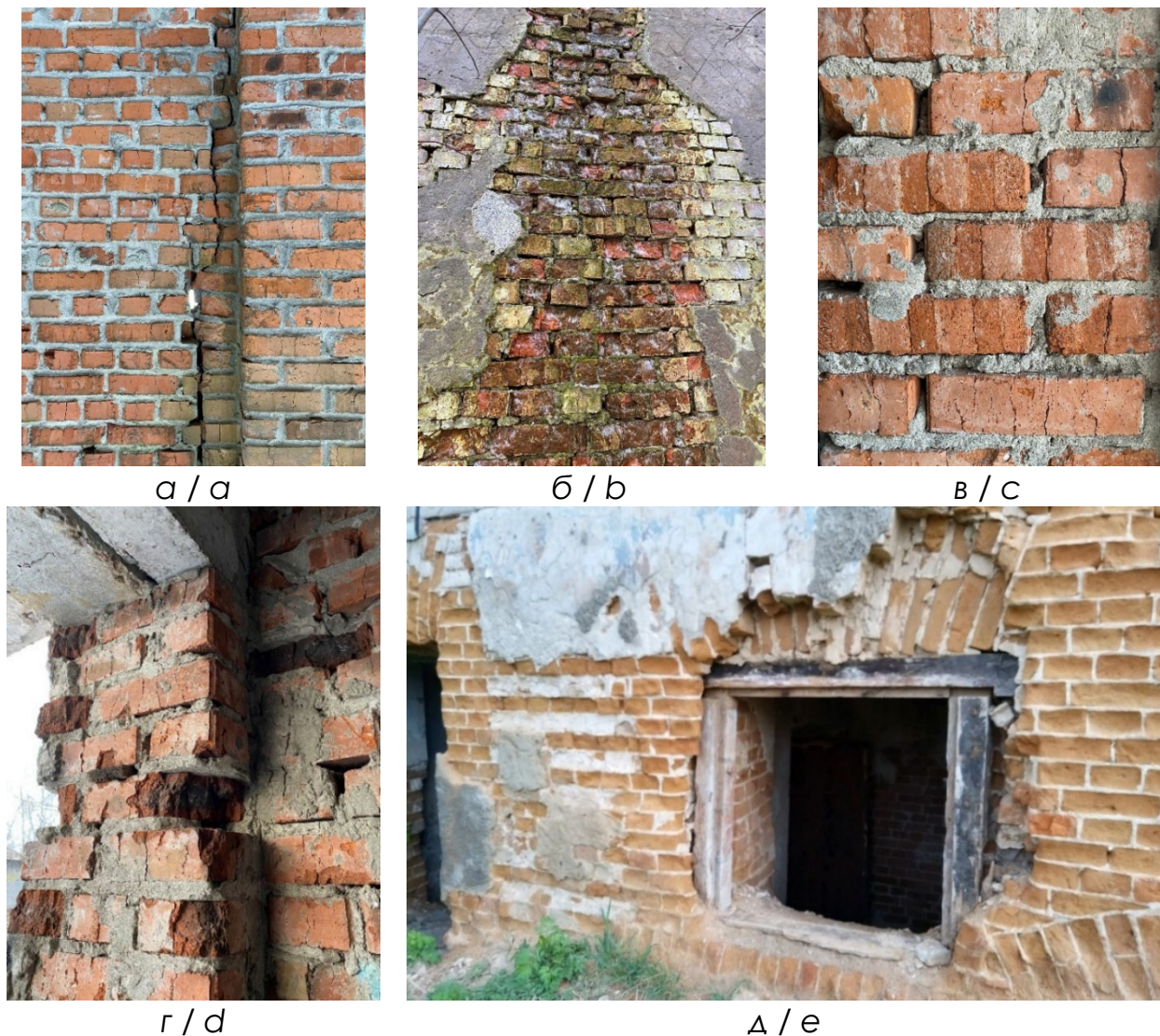


Рис. 2.15. Дефекти кам'яної кладки:

а – тріщини; б – замокання, утворення висолів, пліснява та мох на поверхні; в – вивітрювання кладки; г – відколи каменів; д – вивітрювання кладки та випадіння перемички цегляної стіни /

Defects in masonry:

a – cracks; b – wetting, efflorescence, mould and moss on the surface; c – weathering of the masonry; d – chipped stones; e) weathering of the masonry and falling out of the brick wall lintel

Часто зустрічається дефект кам'яної кладки – відсутність перев'язки повздовжніх стін з поперечними, що призводить до зниження стійкості ділянок стін і просторової жорсткості будівлі.

Погане заповнення вертикальних швів призводить до зменшення міцності кладки на 6-7 %, а розчин

Another common defect in masonry is the lack of ties between longitudinal and transverse walls, which leads to a decrease in the stability of wall sections and spatial rigidity of the building.

Poor filling of vertical joints leads to a decrease in masonry strength by 6-7%, and mortar in vertical joints

у вертикальних швах перешкоджає вільній деформації каменю в горизонтальному напрямку. Порожні вертикальні шви є концентраторами напружень. Кладка з такими швами легко продувається, її теплопровідність значно зростає.

Під час робіт у зимових умовах трапляються випадки застосування каменю, не очищеного від снігу і льоду, заниження марок розчину, неправильне дозування хімічних протиморозних добавок. Усе це знижує міцність кладки після її відтавання.

2.3.4. Дефекти фундаментів

Під дефектом фундаментів розуміють такий їхній стан, коли конструкції, які на них спираються, отримують недопустимі деформації. Деформації будівель і споруд спільно з основою бувають:

- крен – вертикальна вісь будівлі або споруди відхиляється від первинного положення;
- прогин – великий розвиток осідань у середній частині будівлі й менше у торців;
- вигин – великий розвиток осідань з торців будівлі й менше в середній його частині;
- перекис – нерівномірний розвиток деформації на короткій відстані по довжині будівлі.

Випадки недостатньої міцності тіла фундаментів через помилки при проєктуванні дуже рідкісні. Найчастішою причиною помилок

prevents free deformation of the stone in the horizontal direction. Empty vertical joints are stress concentrators. Masonry with such joints is easily blown out, and its thermal conductivity increases significantly.

While working in winter conditions, there are cases of using stone that has not been cleared of snow and ice, reducing mortar grades, and improperly dosing chemical anti-freeze additives. All this reduces the strength of the masonry after it thaws.

2.3.4. Foundations defects

A defect in foundations is defined as a condition in which the structures bearing on them are subject to unacceptable deformations. Deformations of buildings and structures together with the foundation could be:

- roll – the vertical axis of a building or structure deviates from its original position;
- deflection – a large development of shrinkage in the middle part of the building and less at the ends;
- bending – a large development of shrinkage at the ends of the building and less in the middle part;
- skew – uneven development of deformation over a short distance across the length of the building.

Cases of insufficient strength of the foundation body due to design errors are extremely rare. The most

при проектуванні фундаментів є неповнота даних про геологічну будову й тектонічні структури району будівництва.

У процесі риття котловану пошкоджуються шари ґрунту, найбільш близькі до підшви фундаменту, тобто саме ті, стиснення яких особливо сильно впливає на осідання фундаментів. Деякі ґрунти у природному стані досить щільні й мало стискуються, але дуже сильно пошкоджуються при механічному впливі землерийних і транспортних машин, надмірному зволоженні та стають сильно ущільненими.

При виготовленні та монтажі збірних та монолітних фундаментів найчастіше зустрічаються такі дефекти:

- зниження міцності бетону в порівнянні з проєктною;
- невідповідність арматури за діаметром, кількістю і якістю класам сталі в проєкті;
- недотримання необхідної товщини захисного шару бетону;
- зміщення арматури з проєктного положення;
- зменшення проєктних розмірів фундаментів;
- зміщення фундаментів у плані й по висоті;
- неякісне виконання монолітних залізобетонних поясів у фундаментах;

common reason for the errors in foundation design is incomplete data on the geological structure and tectonic structures of the construction area.

During the excavation process, the soil layers closest to the foundation footing are damaged, i.e. those whose compression has a particularly strong effect on foundation settlement. Some soils are naturally quite dense and slightly compressible, but are significantly destroyed by the mechanical impact of excavation and transport machines, excessive moisture, and as a result can become highly compressed.

In the manufacture and installation of prefabricated and monolithic foundations, the following defects are most common:

- reduced concrete strength compared to the design strength;
- mismatch of reinforcement in diameter, quantity and quality to the steel classes in the design;
- failure to comply with the required thickness of the protective layer of concrete;
- displacement of reinforcement from the design position;
- reduction of the design dimensions of foundations;
- displacement of foundations in plan and in height;
- poor quality of monolithic reinforced concrete belts in foundations;

– відсутність або неякісне виконання горизонтальної та вертикальної гідроізоляції фундаментів.

Зниження міцності бетону позначається насамперед на міцності фундаментів на продавлювання і на похилих перерізах.

Зменшення товщини захисного шару бетону призводить до корозії і знижує термін служби фундаменту.

Зменшення розмірів фундаментів збільшує тиск на ґрунт і їх осадку.

Зсув у плані стрічкових фундаментів призводить до ексцентриситету прикладення навантаження від стін, погіршує умови роботи як фундаментів, так і стін.

Неякісне виконання залізобетонних поясів у фундаментах знижує їх жорсткість у вертикальній площині, збільшує нерівномірність осідання.

Відсутність або неякісне виконання горизонтальної гідроізоляції стін викликає при експлуатації підвищення вологості стін.

2.3.5. Дефекти та пошкодження, викликані помилками в проєктах

Проектування будинків, що зводяться індустріальними методами, супроводжуються помилками, які викликані новизною та відсутністю певних норм та правил.

Недостатнє знання властивостей застосовуваних матеріалів та

– absence or poor quality of horizontal and vertical waterproofing of foundations.

Reduction in concrete strength has a major impact on the compressive strength of foundations and on inclined sections.

Reduction of the thickness of the protective concrete layer leads to corrosion and a reduction in the service life of the foundation.

Reduction in the size of the foundations increases the pressure on the soil and their shrinkage.

Displacement in the plan of strip foundations leads to eccentricity of the load application from the walls, which negatively affects the operating conditions of both the foundations and the walls.

Poor manufacturing of reinforced concrete belts in foundations reduces their rigidity in the vertical plane and increases the unevenness of shrinkage.

The absence or poor quality of horizontal waterproofing of walls leads to an increase in wall moisture during operation.

2.3.5. Defects and damage caused by errors in the projects

The design of buildings constructed using industrial methods is accompanied by mistakes caused by the novelty and lack of certain rules and regulations.

Insufficient knowledges of the properties of the materials used and

їхньої зміни властивостей з часом призвели до серйозних пошкоджень окремих збірних елементів і будівель загалом. Це передусім стосується матеріалів, які застосовували для теплоізоляції стін (багатошарові зовнішні стіни), неправильне використання яких призвело до їх промерзання і зволоження. Проектування надмірно тонкого фактурного шару призвело до значних пошкоджень, тріщин захисного шару і проникненню вологи всередину стіни.

Основними недоліками, що призводять до зволоження будівельних конструкцій, є недостатній кут нахилу скатів покрівлі, недостатній діаметр водостічних жолобів і труб, недостатні ухили підвіконних зливів і т. ін.

Мають свої особливості реконструкції будівель і споруд.

У будівлях, що експлуатуються понад 20 років, необхідно розглядати роботу деяких конструкцій як спільну, на відміну від нового проектування. Так, опори однопрогонових металевих балок наближаються до затискання при досягненні кладкою 100 % міцності, оскільки майже виключається поворот опірної частини балок щодо своєї осі.

Фахівці проектних організацій не завжди використовують при перевірочних розрахунках несучої здатності фундаментів теорію консолідації ґрунтів під подошвою фундаментів при експлуатації будівлі

changes in their properties over time have led to serious damages of individual prefabricated elements and buildings as a whole. It refers primarily to the materials used for thermal insulation of the walls (multilayer exterior walls), the improper use of which led to their freezing and moisture. The design of an excessively thin textured layer led to significant damages, cracks in the protective layer and moisture penetration into the wall.

The main disadvantages that lead to moisture of building structures are: insufficient angle of inclination of roof slopes, insufficient diameter of water gutters and pipes, insufficient slopes of window sill drains, etc.

The reconstruction of buildings and structures has its own peculiarities.

In buildings that have been in operation for more than 20 years, it is necessary to consider the functioning of some structures as joint, as opposed to new design. For example, the pillars of single-span metal beams come to compression when the masonry reaches 100% strength, as there is almost no rotation of the supporting part of the beams about their axis.

Specialists of design organisations do not always use the theory of soil consolidation under the foundation sole in verification calculations

понад 25 років під впливом власної ваги будівлі. Якщо не брати це до уваги у проєктній документації, то може бути закладене рішення щодо розширення підшви фундаменту, або з укріплення ґрунтів, що різко збільшує фінансові та трудові витрати при ремонті будівлі.

Особливу увагу при капітальному ремонті з повною зміною перекриттів на збірні залізобетонні необхідно приділяти якості цегляної кладки, її несучої здатності, наявності вентиляційних каналів і особливо димоходів від пічного опалення. Функціонуючі димоходи значною мірою послабляють цегляну кладку, і неврахування цього може призвести до аварійної ситуації. Серйозним конструктивним прорахунком вважається відсутність утеплювача по торцях залізобетонних плит, прогонів, металевих балок при товщині зовнішніх стін менше ніж 64 см, у результаті чого відбувається місцеве промерзання кладки. При реконструкції старих будівель у багатьох випадках виникає необхідність влаштування прибудов. Щоб уникнути появи тріщин у вузлах спряження старої кладки з новою, закладають підшву фундаментів прибудови на глибині існуючих фундаментів, а також обов'язково виконують шпунт із просмолених дощок між існуючим фундаментом із заглибленням його на 50-60 см, передбачаючи осадковий шов між новою і старою кладкою.

of the bearing capacity of foundations when operating of the building for more than 25 years under the influence of the building's own weight. Ignoring this, the project documentation may contain a solution to expand the foundation sole or to strengthen the soil, which significantly increases the financial and labour costs of building repairs.

During major repairs with a complete replacement of slabs on precast concrete ones, special attention should be paid to the quality of the brickwork, its bearing capacity, the presence of ventilation ducts and especially chimneys from stove heating. Existing chimneys significantly weaken the brickwork, and ignoring this can lead to an emergency. The absence of insulation at the ends of reinforced concrete slabs, girders, and metal beams with a thickness of the outer walls of less than 64 cm is considered a serious design flaw, resulting in local freezing of the masonry. During the reconstruction of old buildings, in some cases, it becomes necessary to build extensions. To avoid cracks in the junctions between the old and new masonry, the sole of the foundation of the extension is laid at the depth of the existing foundations. It is also imperative to make a tongue and groove of resinous boards between the existing foundation, deepening it by 50-60 cm and providing for a sedimentary joint between the new and old masonry.

2.3.6. Руйнування викликані деформаціями ґрунтів

Враховуючи, що основи та фундаменти знаходяться в закритому стані, основними припущеннями їх ненадійного технічного стану й одночасно приводом до проведення обстежень є:

- деформації будівель, споруд і їх окремих будівельних конструкцій (крен, вигин, кручення, перекис, прогин, тріщини, розломи та ін.);
- осідання ґрунтів навколо будівель і споруд, а також осідання підлог в підвальних приміщеннях;
- деформації і руйнування фундаментів і стін з боку підвальних приміщень;
- підтоплення території навколо будівлі і споруди, а також підвальних приміщень в зв'язку зі зміною ґрунтових вод, аварій побутових і технічних систем водопостачання і каналізації;
- порушення зовнішнього водовідведення (вимощення, водостічних труб, дренажних систем).

Найбільш характерними ознаками деформації ґрунтових основ є:

- нерівномірні й місцеві осідання;
- фактичні осідання, що перевищують допустимі значення;
- випирання ґрунту основ з-під підшви фундаменту.

Основними причинами деформацій ґрунтових основ є:

2.3.6. Destruction caused by soil deformation

Taking into account the fact that the bases and foundations are in a closed state, the main assumptions of their unreliable technical condition and at the same time the reason for inspection are:

- deformations of buildings, structures and their individual building structures (roll, bend, torsion, skew, deflection, cracks, faults, etc.);
- subsidence of soils around buildings and structures, as well as subsidence of floors in basements;
- deformation and destruction of foundations and walls from basements;
- flooding of the area around the building and structure, as well as basements due to changes in groundwater, failures of domestic and technical water supply and sewage systems;
- disruption of external drainage (paving, drainage pipes, drainage systems).

The most characteristic signs of deformation of soil bases are:

- uneven and local subsidence;
- actual subsidence exceeding the permissible values;
- bulging of the foundation soil from under the foundation sole.

The main reasons for deformations of soil foundations are:

- exceeding the design loads on the foundation;

- перевищення розрахункових навантажень на основу;
- зовнішні динамічні навантаження (сейсмічні і вибухові та ін.);
- зміна рівня ґрунтових вод, температурного режиму, а також фізико-механічних характеристик ґрунтів основ у період будівництва й експлуатації будівель і споруд;
- замала або неправильна глибина закладання фундаментів;
- помилка при проектуванні інженерно-геологічних випробувань та розрахунків в проектуванні.

Найбільш характерними пошкодженнями і дефектами фундаментів є:

- недопустимі значення величин деформацій і зміщення фундаментів у плані і по висоті (крен, вигин, кручення, перекіс, прогин, осадка і т. ін.);
- тріщини, сколи, злам фундаменту;
- оголення арматури, корозія в тілі бетонних фундаментів;
- руйнування матеріалу каменю і розчину у швах кам'яної кладки фундаментів;
- гниття елементів дерев'яних фундаментів (паль, лежнів, стільців і т. ін.);
- пошкодження вертикальної і горизонтальної гідроізоляції фундаментів.

Основними причинами пошкодження і дефектів фундаментів є:

- деформації ґрунтових основ;
- перевищення розрахункових навантажень на фундаменти;

- external dynamic loads (seismic and explosive, etc.);
- changes of the groundwater level, temperature regime, as well as physical and mechanical characteristics of the foundation soils during the construction and operation of buildings and structures;
- insufficient or incorrect depth of foundation laying;
- errors in the design of engineering and geological tests and calculations in the design.

The most typical damages and defects in foundations are:

- unacceptable values of deformation and displacement of foundations in plan and in height (roll, bend, torsion, skew, deflection, subsidence, etc.);
- cracks, chips, fracture of the foundation;
- reinforcement exposure, corrosion in the body of concrete foundations;
- destruction of the material of stone and mortar in the joints of masonry of foundations;
- rotting of elements of wooden foundations (piles, ground brace, chairs, etc.);
- damage to the vertical and horizontal waterproofing of foundations.

The main reasons for damages and defects in foundations are:

- deformations of soil bases;
- exceeding design loads on foundations;

- механічні пошкодження при оголенні фундаментів, введенню і заміні комунікацій;
- динамічні впливи сейсмічного і вибухоподібного характеру, порушення режиму роботи технічного обладнання, робота транспортних і будівельних машин і ін.;
- старіння матеріалів фундаментів і гідроізоляції;
- вплив агресивного середовища, значне зволоження;
- помилки при проектуванні фундаментів.

Основний вигляд деформації ґрунтів – це ущільнення їх при стисненні. Що виникає під дією нормальних зусиль, докладених до елементу ґрунту, і відбувається здебільшого за рахунок взаємного переміщення (зрушень, поворотів) твердих мінеральних частинок, що викликає зменшення пористості ґрунту. Характеристиками деформативності ґрунтів є коефіцієнт відносної стисливості або обернено пропорційний до нього модуль загальної деформації і коефіцієнт відносної поперечної деформації, аналогічний модулю пружності і коефіцієнт Пуассона пружних тіл.

При будівництві нових споруд і реконструкції діючих часто виникає необхідність передати на ґрунти основи значні навантаження. У складних ґрунтових умовах ці навантаження (статичні, динамічні) викликають великі й часто нерівномірні осідання фундаментів споруд.

- mechanical damages during exposure of foundations, installation and replacement of communications;
- dynamic effects of seismic and explosive nature, violation of the technical equipment operation mode, operation of transport and construction machines, etc.;
- aging of foundation materials and waterproofing;
- influence of aggressive environment, significant moistening;
- errors in foundation design.

The main type of soil deformation is compression compaction. It occurs under the influence of normal forces applied to a soil element and is mainly due to the mutual displacement (shifts, rotations) of solid mineral particles, which causes a decrease in soil porosity. The characteristics of soil deformability are the coefficient of relative compressibility or the inversely proportional modulus of total deformation and the coefficient of relative transverse deformation, similar to the elasticity modulus and Poisson's ratio of elastic objects.

During the construction of new buildings and the reconstruction of existing ones, it is often necessary to transfer significant loads to the foundation soils. In difficult soil conditions, these loads (static and dynamic) produce large and often uneven subsidence of the foundations of structures.

Розглянемо деякі основні види ґрунтів та їх характеристики.

Скелясті ґрунти – найбільш надійні, міцні, не просідають, не розмиваються, не спучуються. Фундамент можна зводити безпосередньо на поверхні такого ґрунту, без будь-якого заглиблення в них.

Піщані – мають властивість до ущільнення під навантаженням, просадочні, не затримують воду і при промерзанні не спучуються.

Супіски та суглинки – ґрунти, що займають проміжне положення між піщаними і глинистими ґрунтами. Вони містять від 3 до 30 % включень глини. При вмісті глини від 10 до 30 % ґрунт відносять до суглинка, при більш низькому вмісті – до супіску.

Глинисті ґрунти можуть стискуватися, розмиватися і при замерзанні спучуються. Ці ґрунти не надійні для зведення фундаменту, який повинен закладатися на всю глибину промерзання.

До складу заходів, що усувають або зменшують деформації основ, складених просідаючими ґрунтами, входять такі:

1. Ущільнення просідаючих ґрунтів попереднім замочуванням, у тому числі з використанням глибинних вибухів.

Спосіб рекомендується застосовувати для усунення просадочності ґрунтів, зниження їх деформативності та підвищення несучої спроможності при товщах просідання заглубшки понад 8 м, які

There are some basic types of soil and their characteristics.

Rocky soils are the most reliable, durable, and do not sink, erode or swell. The foundation can be built directly on the surface of such soil, without any deepening into them.

Sandy – have the property of compaction under load, are non-permeable, do not retain water and do not swell when freezing.

Sandy loams and loams are soils that are in between sandy and clay soils. These soils contain from 3 to 30 % clay inclusions. If the clay content is between 10 and 30 %, the soil is classified as loam, and if it is lower, it is classified as sandy loam.

Clay soils can be compressed, eroded and swell during freezing. These soils are not reliable for the construction of foundations, which should be laid to the full depth of freezing.

The measures to eliminate or reduce deformations of foundations composed of subsiding soils include the following:

1. Compaction of subsidence soils by preliminary soaking, including the use of deep explosions.

The method is recommended to eliminate soil subsidence, reduce their deformability and increase the bearing capacity with subsidence thicknesses over 8 m deep, which are characterised by subsidence from their own weight. The method is effective for compacted soils,

характеризуються просіданням від власної ваги. Застосування способу ефективно при ущільнювальних ґрунтах, які представлені пілуватими пісками, супісками або лесоподібними суглинками з щільністю сухого ґрунту не більше $15,0 \text{ kN/m}^3$ і коефіцієнтом фільтрації не менше $0,05 \text{ м/добу}$.

Усунення властивостей просідання ґрунтів верхнього недоущільненого шару потужністю $2,5\text{--}4,0 \text{ м}$ слід виконувати: пошарового влаштування ґрунтових, гравійно-піщаних, щебених та інших піщаних подушок; доущільнення ґрунтів важкими трамбівками; прорізкою верхнього шару фундаменту.

2. Регульоване замочування просідаючих ґрунтів.

Спосіб регульованого замочування може застосовуватися для будівництва споруд до 16 поверхів включно для усунення властивостей просідання ґрунтів на товщах із максимальною величиною просідання від власної ваги ґрунту до $1,5 \text{ м}$, які не належать до зсувних, карстових сейсмічних територій. Застосовується в процесі зведення будинків і споруд з ущільненням ґрунтів основи під дією зовнішнього навантаження та власної ваги ґрунту.

При просіданні ґрунтів від власної ваги до $0,5 \text{ м}$ застосовують одно стадійне замочування у процесі зведення об'єкта, а понад $0,5 \text{ м}$ – замочування здійснюється у

which are represented by dusty sands, sandy loams or loess loams with a dry soil density of no more than 15.0 kN/m^3 and a filtration coefficient of at least 0.05 m/day .

Elimination of the subsidence properties of the soil of the upper incomplete layer with a thickness of $2.5\text{--}4.0 \text{ m}$ should be carried out by layering soil, gravel-sand, crushed stone, and other sand cushions; by compaction of the soil with heavy tampers; and by cutting through the upper layer of the foundation.

2. Regulated wetting of subsiding soils.

The method of regulated wetting can be used for the construction of buildings up to 16 floors inclusively. It is also can be used to eliminate the properties of soil subsidence in strata with a maximum subsidence from the soil's own weight of up to 1.5 m , which are not related to landslide, karst seismic areas. It is used in the construction of buildings and structures with compaction of the base soils under the influence of external loads and the soil's own weight.

In case of subsidence of soils from their own weight up to 0.5 m , one-stage wetting is used during the building construction process. In case of subsidence of soils from their own weight over 0.5 m , wetting is carried out in two stages: the first

дві стадії: перша – до зведення будинку або споруди, друга – у процесі його зведення.

3. Способи ущільнення основ слабких водо насичених ґрунтів.

На практиці для зниження величини і нерівномірності осідань фундаментів часто влаштовують піщані подушки. З їх допомогою вдається зменшити глибину закладання фундаментів і розподілити тиск на велику площу, зменшити розміри фундаментів. Піщані подушки влаштовують із середньо- і крупнозернистих пісків, щебеню, гравію, граф віно-піщаної суміші.

У ряді випадків доцільно застосовувати вапняні палі. У товщі ґрунтів під захистом обсадних труб пробурюють свердловини діаметром 30...50 см. Їх заповнюють негашеним вапном, шаром близько одного метра. У обсадних трубах спускають трамбівку масою 300...400 кг і роблять ущільнення. Знову насипають шар вапна й утрамбовують. Ґрунт ущільнюється при зануренні труби і після трамбування вапна. При взаємодії негашеного вапна з водою в порах ґрунту відбувається гашення. Внаслідок цього збільшується діаметр вапняної палі на 60...80 % і додатково ущільнюється ґрунт навколо палі. Крім того, при гасінні вапна виділяється велика кількість тепла. Температура піднімається до 200 °C, внаслідок чого вологість навколишнього ґрунту зменшується, а характеристики міцності

one is carried out before the construction of a building or structure, the second one is carried out during its construction.

3. Methods of compaction of the bases of weak water-saturated soils.

In practice, sand pads are often used to reduce the magnitude and unevenness of foundation subsidence. With their help, it is possible to reduce the depth of foundation laying and distribute the pressure over a large area, reduce the size of the foundations. Sand pads are made of medium- and coarse-grained sands, crushed stone, gravel, and gravel-sand mixtures.

In some cases, it is reasonable to use lime piles. Boreholes with a diameter of 30...50 cm are drilled in the soil thickness under the protection of casing pipes. They are filled with quicklime lumps, with a layer of about one metre. A rammer weighing 300...400 kg is lowered into the casing pipes and compacted. A layer of lime is poured again and tamped down, etc. The soil is compacted when the pipe is immersed and after the lime has been tamped. When quicklime interacts with water in the pores of the soil, it is quenched. As a result of this process, the diameter of the lime pile is increased by 60 to 80 % and the soil around the pile is further compacted. In addition, a large amount of heat is generated during the lime quenching process. The temperature rises to 200 °C, which reduces the

збільшуються. Далі проводять поверхневе ущільнення ґрунту важкими трамбівками. Піщані палі влаштовують шляхом забивання в ґрунт металевої труби з закритим кінцем. Порожнину заповнюють піском з ретельним ущільненням. Навколо стовбура палі утворюється ущільнена зона слабого ґрунту діаметром до півтора метри (при діаметрі палі 0,4...0,5 м).

На практиці іноді застосовують електрохімічну обробку ґрунтів для підвищення несучої здатності основ споруд, створення огорожень при проходці котлованів і траншей, боротьби з морозним здиманням, із зсувами. Вона використовується для зміцнення всіх видів ґрунтів з коефіцієнтом фільтрації менше 0,5 м/добу (дрібних і пилюватих пісків, супісків, суглинків, глин, мулів, торфу). Електрохімічна обробка розділяється на електроосушення, електролітичну обробку й електросилікатизацію.

Довготривале зміцнення можна отримати при введенні хімічних добавок.

Підсилення ґрунтів основ методом силікатизації представляє собою процес нагнітання в ґрунт закріплюючих розчинів через попередньо занурені перфоровані трубки (ін'єктори). При цьому штучно змінюються будівельні властивості ґрунтів в результаті взаємодії з спеціальними хімічними речовинами, які надають ґрунтам допоміжну міцність, стійкість, знижують водопроникність.

moisture content of the surrounding soil and increases the strength characteristics. The next step is to compact the soil with heavy tampers. Sand piles are installed by hammering a metal pipe with a closed end into the ground. The hollow is filled with sand with careful compaction. A compacted zone of weak soil up to one and a half metres in diameter is formed around the pile shaft (with a pile diameter of 0.4...0.5 m).

In practice, sometimes electrochemical soil treatment is used to increase the bearing capacity of the foundations of structures, to create fences when digging pits and trenches, to combat frost heaving and landslides. It is used to strengthen all types of soils with a filtration coefficient of less than 0.5 m/day (fine and dusty sands, sandy loams, loams, clays, silt, peat). Electrochemical treatment is divided into electro-drying, electrolytic treatment and electrosilicatization.

Long-term strengthening can be achieved by introducing chemical additives.

Strengthening of base soils by silicization is the process of injection of fixing solutions into the soil through pre-submerged perforated tubes (injectors). This process artificially modifies the construction properties of soils because of interaction with special chemicals that give the soil additional strength, stability, and reduce water penetration.

Self-monitoring questions

Питання до самоконтролю

1. Що розуміють під терміном «дефект будівельної конструкції»?

2. Чим відрізняється дефект від пошкодження конструкції?

3. Які основні причини виникнення дефектів у будівельних конструкціях?

4. В чому полягає причина та небезпека усадки бетону?

5. Вплив вогню на залізобетонні конструкції?

6. Які типові пошкодження спостерігаються у кам'яних кладках під дією нерівномірних осідань фундаментів?

7. Як впливають агресивні середовища на довговічність бетонних і залізобетонних споруд?

8. Які наслідки мають температурні деформації для кам'яних і бетонних елементів?

9. Які ви знаєте дефекти фундаментів.

10. Перелічити дефекти кам'яних конструкцій.

11. Види руйнувань внаслідок деформації ґрунтів?

12. Які профілактичні заходи дозволяють запобігти утворенню небезпечних дефектів у бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкціях?

1. What is meant by the term "defect of a building structure"?

2. How does a defect differ from structural damage?

3. What are the main causes of defects in building structures?

4. What is the cause and danger of concrete shrinkage?

5. The effect of fire on reinforced concrete structures?

6. What typical damages are observed in masonry under the influence of uneven foundation settlements?

7. How do aggressive environments affect the durability of concrete and reinforced concrete structures?

8. What are the consequences of temperature deformations for masonry and concrete elements?

9. What foundation defects do you know?

10. List the defects of masonry structures.

11. What types of damage occur as a result of soil deformation?

12. What preventive measures help to avoid the formation of dangerous defects in concrete, reinforced concrete, and masonry structures?

CHAPTER 3 CRACKS IN BUILDING STRUCTURES

РОЗДІЛ 3 ТРІЩИНИ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

3.1. Загальні відомості і класифікація

При обстеженні будівельних конструкцій відповідальним етапом є дослідження тріщиноутворення, тобто встановлення причин, що спричинило їх виникнення, та визначення динаміки розвитку. Це зумовлено тим фактом, що тріщини в будівельних конструкціях є єдиним дефектом, що має тенденцію до зростання і може стати причиною як пошкодження естетичного виду споруди, так і структурної цілісності загалом.

У зв'язку з цим розуміння причин виникнення тріщин будівельних конструкцій, їх класифікація та знання методів і засобів їх спостереження є важливою складовою моніторингу технічного стану будівель і споруд.

За ступенем небезпеки для несучих та огорожувальних конструкцій всі тріщини поділяють на три групи:

- нешкідливі тріщини, що погіршують лише якість облицювального шару (рис. 3.1, а);
- небезпечні тріщини, що викликають значне послаблення перерізів, розвиток яких продовжується з високою інтенсивністю (рис. 3.1, б);

3.1. General information and classification

While examining building structures, the appropriate stage is the study of crack formation, specifically: establishing the reasons that prompted their occurrence and determining the dynamics of development. This is because cracks in building structures are the only defect that tends to grow and can cause damage to both the aesthetic appearance of the structure and the structural integrity as a whole.

In this regard, understanding the causes of cracks in building structures, their classification and knowledge of methods and means of their observation are an important component of monitoring the technical condition of buildings.

According to the degree of danger to load-bearing and enclosing structures, all cracks are divided into three groups:

- Harmless cracks that only worsen the quality of the decorating layer (Fig. 3.1, a);
- Dangerous cracks that cause significant weakening of cross sections, the development of which continues with high level of intensity (Fig. 3.1, b);

– тріщини посередньої небезпечності, які погіршують експлуатаційні властивості, знижують надійність і довговічність конструкцій, але не сприяють повному їх руйнуванню.

– Moderate cracks that worsen operational properties, reduce the reliability and durability of structures, but do not contribute to their complete destruction.



Рис. 3.1. Тріщини будівельних конструкцій:

а – тріщини в облицювальному шарі;

б – тріщини несучих елементів конструкції /

Cracks in building structures:

а – cracks in the facing layer;

б – cracks in the load-bearing elements of the structure

Тріщини залізобетонних конструкцій. Для залізобетонних конструкцій тріщини є характерним видом руйнування. Різ характеру тріщин залізобетонних конструкцій можна визначити причину їх появи і технічний стан конструкції загалом. При дії навантажень на елементи залізобетонних конструкцій у них можуть виникати тріщини з певною шириною розкриття.

Так, тріщини, розкриття яких у розтягнутій зоні складає значення до 0,1 мм, називаються волосяними, вони не становлять небезпеки і вказують на нормальну роботу конструкції в умовах прикладеного навантаження. Водночас тріщини із розкриттям 0,2...0,5 мм і більше свідчать про перенавантаження конструкції. Розкриття тріщин більше як

Cracks in reinforced concrete structures. Cracks are a normal type of destruction for reinforced concrete structures. The nature of cracks in reinforced concrete structures can determine the cause of their appearance and the technical condition of the structure as a whole. When loads are applied to elements of reinforced concrete structures, cracks with a certain opening width may appear in them.

Thus, the opening of cracks in the stretched zone up to 0.1 mm is called hairline, does not pose a danger and indicates the normal operation of the structure under the conditions of the applied load. While cracks with an opening of 0.2 - 0.5 mm and more indicate overloading of the structure. The opening of

2 мм у розтягнутій зоні свідчить про руйнування конструкції з можливим розривом арматури або порушенням її анкерування.

Нижче наведено класифікацію тріщин, яка може бути використана для встановлення категорії технічного стану будівель і споруд:

1. Характеристики ширини поверхових тріщин, мм:

- супертонка – більше ніж 0,1;
- дуже тонка – 0,1...0,3;
- тонка – 0,3...1;
- помірно широка – 1...2;
- широка – 2...5;
- дуже широка – 5...10;
- надширока – 10.

2. Характеристики відстані між близько розташованими тріщинами, м:

- надблизько розміщені – більше як 0,025;
- дуже близько розташовані – 0,025...0,1;
- близько розташовані – 0,1...0,25;
- відстань в міру – 0,25...0,5;
- велика відстань – 0,5...1;
- дуже велика відстань – 1...10;
- надвелика відстань – більше як 10;
- ізольована – одна.

У залізобетонних конструкціях найчастіше трапляються такі види тріщин:

1. В елементах, що працюють по балковій схемі (балки, прогони) виникають тріщини (рис. 3.2), перпендикулярні (нормальні) до поздо-

cracks more than 2 mm in the stretched zone indicates the destruction of the structure with a possible rupture of the reinforcement or violation of its anchoring.

Below is a classification of cracks that can be used when establishing the categories of technical condition of buildings and structures:

1. Characteristics of the width of cracks, mm:

- super thin - more than 0.1;
- very thin - 0.1...0.3;
- thin - 0.3...1;
- moderately wide - 1...2;
- wide - 2...5;
- very wide - 5...10;
- super wide - 10.

2. Characteristics of the distance between closely spaced cracks, m:

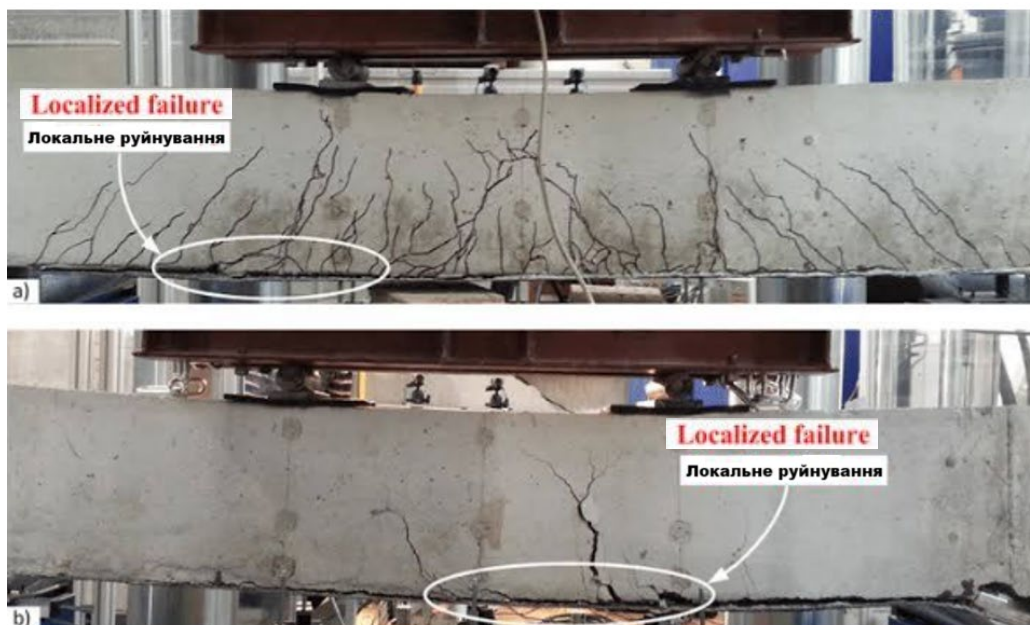
- super closely spaced - more than 0.025;
- very closely spaced - 0.025...0.1;
- closely spaced - 0.1...0.25;
- moderately spaced - 0.25...0.5;
- large spaced - 0.5...1;
- very large spaced - 1...10;
- super large spaced - more than 10;
- isolated - alone.

In reinforced concrete structures, the following types of cracks are most commonly encountered:

In elements operating according to the beam scheme (beams, girders), cracks (Fig. 3.2) perpendicular (normal) to the longitudinal axis occur due to the appearance of tensile

вжньої осі, внаслідок появи розтягуючих напружень у зоні дії максимальних моментів і тріщини, похилі до поздовжньої осі, викликані головними розтягуючими силами згинальних напруг у зоні. Вертикальні та похилі тріщини в прогонових ділянках балок і прогонів свідчать про недостатню їхню несучу здатність за згинальним моментом. В елементах, що згинаються, переважно появі тріщин сприяє також збільшення прогинів і кутів повороту. Утворення похилих тріщин на опорних кінцях балок і прогонів свідчить про недостатню несучу здатність вздовж похилого перерізу.

stresses in the area of maximum moments, as well as cracks inclined to the longitudinal axis, caused by principal tensile forces of bending stresses in the zone. Vertical and inclined cracks in the span sections of beams and girders indicate insufficient load-bearing capacity with respect to the bending moment. In bending elements, the appearance of cracks is usually also facilitated by an increase in deflections and rotation angles. The formation of inclined cracks at the support ends of beams and girders indicates insufficient load-bearing capacity along inclined sections.



**Рис. 3.2. Характер розтріскування залізобетонних балок /
Cracking pattern of reinforced concrete beams**

2. У плитах тріщини виникають (рис. 3.3) у середній частині плити (мають напрямок упоперек робочого прогону та максимальне розкриття на нижній поверхні), на опорних ділянках (мають напрямок

2. In slabs, cracks appear (Fig. 3.3) in the central part of the slab (oriented across the effective span and have maximum opening on the bottom surface), and in the support areas (they are also oriented across the effective span and have maximum

уперек робочого прогону та максимальне розкриття на верхній поверхні плити). Виникають також радіальні та кінцеві тріщини з можливим відпаданням захисного шару та руйнуванням бетону плити та тріщини вздовж арматури по нижній площині стіни. Тріщини на опорних ділянках плит уперек робочого прогону свідчать про недостатню несучу здатність згинального опорного моменту. Змінання бетону стиснутої зони вказує на небезпеку повного руйнування плити.

opening on the top surface of the slab). Radial and terminal cracks may also occur, possibly leading to the detachment of the protective layer and the destruction of the slab concrete, as well as cracks along the reinforcement on the lower surface of the wall. Cracks in the support areas of slabs across the effective span indicate insufficient load-bearing capacity with respect to the bending support moment. Crushing of concrete in the compressed zone indicates the danger of complete slab failure.

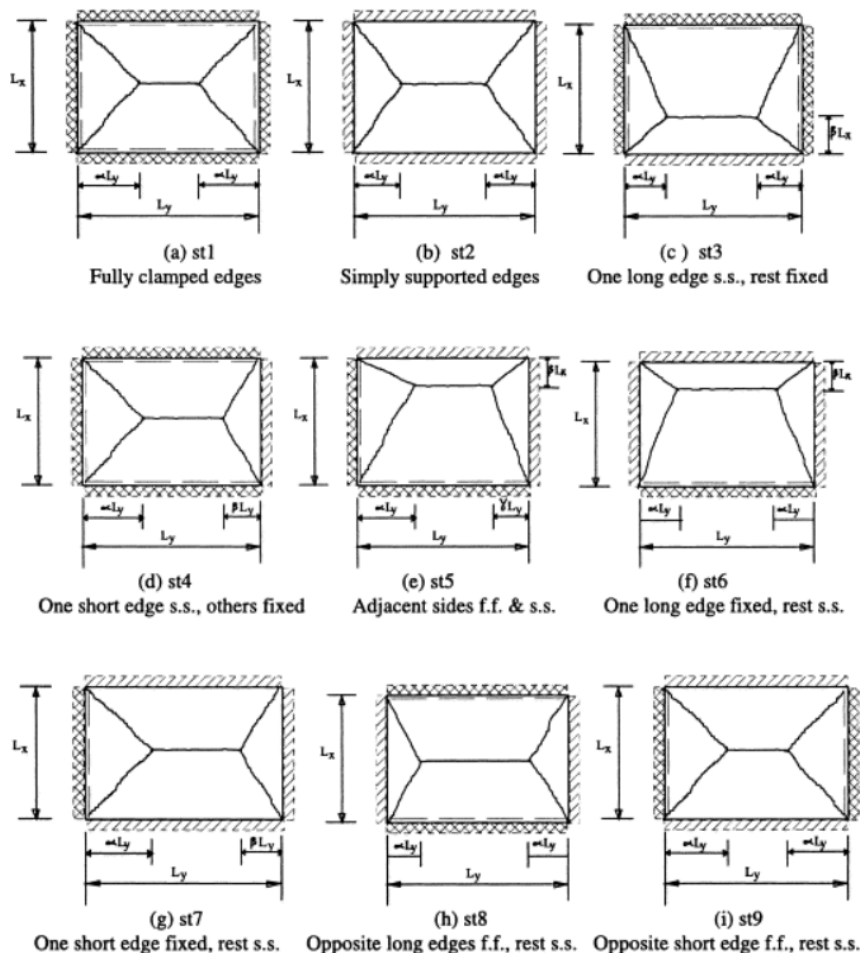


Рис. 3.3. Тріщини в залізобетонних плитах /
Cracks in reinforced concrete slabs

3. У колонах утворюються вертикальні та горизонтальні тріщини. Тріщини на гранях можуть з'явитися

In columns, vertical and horizontal cracks can form. Cracks on the surfaces may appear as a result of

внаслідок надмірного вигину стрижнів арматури. Поздовжні тріщини вздовж арматури в стислих елементах (рис. 3.4) свідчать про руйнування, пов'язані з втратою стійкості (випинанням) поздовжньої стиснутої арматури через недостатню кількість поперечної арматури.

excessive bending of reinforcement bars. Longitudinal cracks along the reinforcement in compressed elements (Fig. 3.4) indicate failures associated with loss of stability (bulging) of longitudinal compressed reinforcement due to insufficient transverse reinforcement.

Горизонтальні тріщини в колонах / Horizontal cracks in columns



а / а – На колоні з'явилися горизонтальні тріщини / Horizontal cracks appeared on column

Похилі тріщини в колонах / Inclined shear cracks in columns



б / б – З'явилися похилі зсувні тріщини / Incline shear cracks appeared

Рис. 3.4. Тріщиноутворення в залізобетонних колонах / Cracking in reinforced concrete columns

Горизонтальні тріщини в залізобетонних колонах не становлять безпосередньої небезпеки, якщо

Horizontal cracks in reinforced concrete columns do not pose an immediate danger if their width is

ширина їх не велика. Однак такі тріщини можуть сприяти корозії металу.

Тріщини розміром до 0,1 мм називають волосяними і здебільшого їх не відносять до категорії небезпечні. Тріщини від 0,1 до 0,5 мм є найбільш частими, і підлягають більш ретельному обстеженню і локалізації. Тріщини від 0,5 до 1 мм зазвичай потребують термінового ремонту (якщо це силові тріщини). Їх можна класифікувати таким чином, мм:

- волосяна – менш як 0,1;
- допустима – від 0,1 до 0,3;
- крупна – від 0,5 до 0,7;
- дуже крупна (небезпечна) – від 0,7 до 3;
- розлом – понад 3.

Тріщини кам'яних та армокам'яних конструкцій. Руйнування кам'яних конструкцій від навантаження відбувається поступово з появою видимих слідів руйнування у вигляді тріщин. Тріщини від пере навантаження в окремих цеглинах або волосяні тріщини, що перетинають не більше ніж двох рядів кладки не є небезпечними з погляду міцності та несучої здатності конструкції.

Вертикальні та похилі тріщини в несучих стінах і колонах висотою більш ніж чотири ряди кладки, вертикальні тріщини в місцях з'єднання пілястри зі стіною, вертикальні й похилі тріщини під опорами балок і ферм довжиною понад 30 см свідчать про аварійний стан

small. However, such cracks can contribute to metal corrosion.

Cracks up to 0.1 mm are called hairline cracks and are generally not classified as dangerous. Cracks from 0.1 to 0.5 mm are the most common and require more thorough inspection and localization. Cracks from 0.5 to 1 mm usually need urgent repair (if they are structural cracks) and can be classified as follows, in mm:

- hairline – less than 0.1;
- acceptable – from 0.1 to 0.3;
- large – from 0.5 to 0.7;
- very large (dangerous) – from 0.7 to 3;
- fracture – more than 3.

Cracks in stone and reinforced stone structures. The destruction of stone structures due to loading occurs gradually, with visible signs of damage appearing in the form of cracks. Cracks from overloading in individual bricks or hairline cracks that cross no more than two rows of masonry are not considered dangerous in terms of the strength and load-bearing capacity of the structure.

Vertical and inclined cracks in load-bearing walls and columns that extend more than four rows of masonry, vertical cracks at the junction of pilasters with the wall, and vertical and inclined cracks under beam and truss supports longer than 30 cm indicate an emergency condition of the structure due to overloading.

конструкції внаслідок її перенавантаження.

Виявлені в несучих кам'яних конструкціях тріщини слід оцінювати з позиції роботи кладки при стисканні. Розрізняють чотири стадії роботи кладки під навантаженням при її стисканні (рис. 3.5).

Cracks found in load-bearing stone structures should be assessed from the perspective of the masonry's performance under compression. There are four stages of masonry behavior under load during compression (Fig. 3.5).

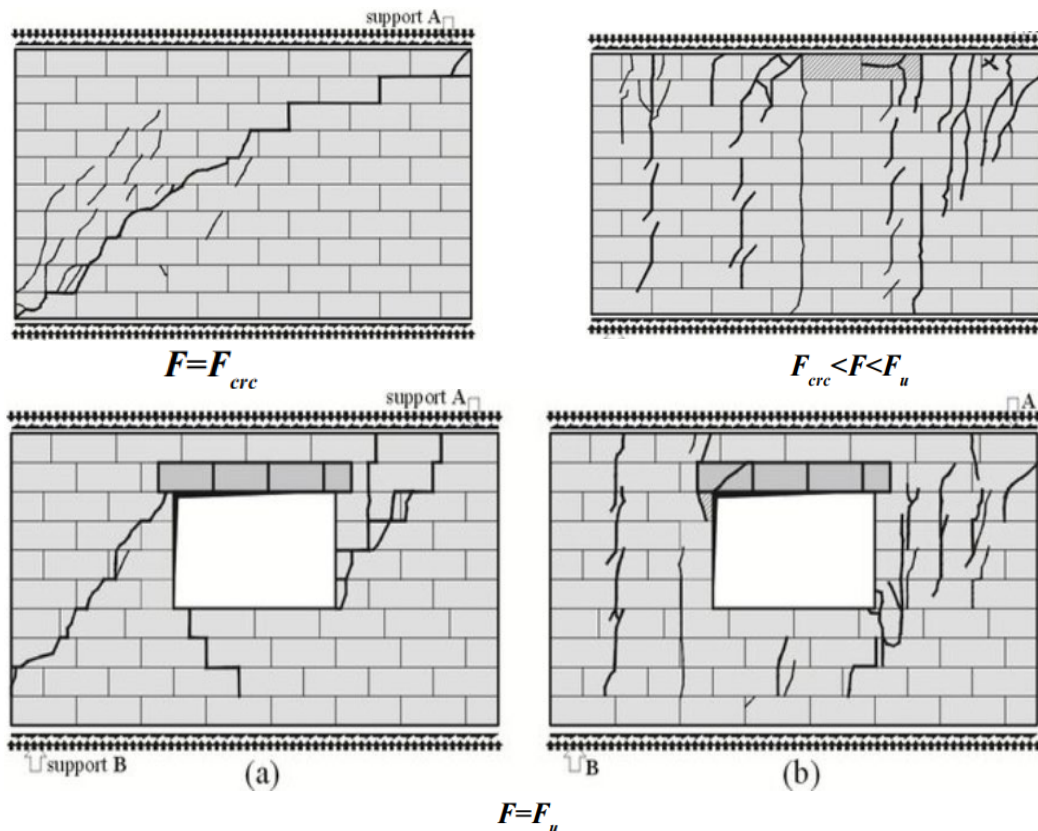


Рис. 3.5. Стадії роботи цегляної кладки при стисканні:

F - зусилля у кладці; F_{crc} - зусилля у кладці, при якому утворюються тріщини; F_u - руйнівні зусилля /

Stages of brickwork operation under compression:

F - masonry force; F_{crc} - masonry force at which cracks form; F_u - destructive force

Вертикальні і похилі тріщини в місцях примикання простінків із підвіконною частиною стіни є результатом різниці напружень в кладці на цих ділянках (рис. 3.6).

Vertical and inclined cracks at the junctions of lintels with the window sill portion of the wall are result a of the difference in stresses within the masonry in these areas (Fig. 3.6).

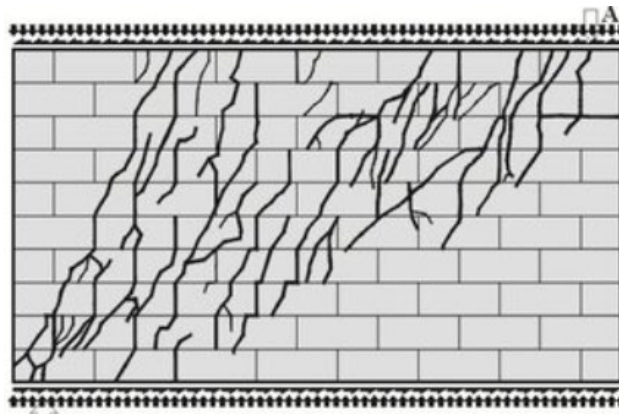


Рис. 3.6. Тріщиноутворення кам'яних стін (Cracking patterns of walls) / Cracking patterns of walls

Основними зовнішніми ознаками відхилення або випинання стін є: зсув або вихід з гнізд у кам'яних стінах кінців балок міжповерхових перекриттів, крокв, обрешітки даху тощо; наявність вертикальних тріщин; відшарування зовнішніх стін від внутрішніх поперечних у місцях взаємного примикання. Відхилення стін, навіть незначне, можна виявити за наявності тріщин у штукатурці стель біля карнизів уздовж стін, що обстежуються. Протяжність таких тріщин на рівні того чи іншого поверху показує наявність відхилень стіни в межах її довжини.

3.2. Методи та засоби спостереження за тріщинами

У разі наявності тріщин у несучих конструкціях будівель і споруд необхідно організувати систематичне спостереження за їхнім станом і можливим розвитком з тим, щоб з'ясувати характер деформацій конструкцій і ступінь їх небезпеки для подальшої експлуатації.

The main external signs of deviation or bulging of walls includes displacement or movement of the ends of beams in the inter-floor slabs, rafters, roof battens, etc., out of their sockets in stonewalls; the presence of vertical cracks; and the delamination of external walls from internal cross walls at points of mutual contact. Even slight deviations in the walls can be detected by the presence of cracks in the ceiling plaster near the cornices along the walls being inspected. The extent of such cracks at a given floor level indicates the presence of wall deviations along its length.

3.2. Methods and means of cracks observation

While cracks appear in the load-bearing structures of buildings and constructions, it is necessary to organize systematic monitoring of their condition and potential development in order to determine the nature of structural deformations and

Тріщини виявляються шляхом огляду поверхонь конструкцій, а також вибіркового зняття з конструкцій захисного або оздоблювального покриття.

Слід визначити положення, форму, напрямок, розповсюдження по довжині, ширину розкриття, глибину, а також встановити, продовжується або припинився їхній розвиток. Для цього, на допомогу людському оку, при спостереженні за тріщинами, широкого використання набули такі технічні засоби:

1. Картки для визначення ширини розкриття тріщини.
2. Цифрові штангенциркулі.
3. Мікроскопи для визначення ширини тріщин.
4. Маяки (цементні, скляні, полімерні).
5. Датчик лінійного переміщення.
6. Георадар.

Найпростішим способом визначення ширини розкриття тріщин бетонних та залізобетонних конструкцій є тріщиномірні картки (рис. 3.7) з точністю до 0,05 мм. Промисловістю випускаються картки, що дають змогу контролювати ширину тріщини від 0,05 до 7,0 мм. Це зручний інструмент розміром з кредитну картку, що легкістю поміщається в кишені.

assess their risk level for continued operation.

Cracks are detected through inspection of the surfaces of structures, as well as selective removal of protective or finishing coatings.

It is essential to determine the location, shape, direction, lengthwise spread, width of opening, and depth of the cracks, as well as to establish whether they are progressing or have stopped.

To assist the human eye during crack monitoring, the following technical tools are widely used:

1. Crack comparator cards or crack-width comparators;
2. Digital calipers;
3. Crack width microscopes;
4. Crack monitors (cement, glass, or polymer);
5. Linear Displacement Transducer (LVDT);
6. Ground Penetrating Radar (GPR).

The simplest method for determining the crack width in concrete and reinforced concrete structures is the use of crack comparator cards (Fig. 3.7), with an accuracy of up to 0.05 mm. The industry produces cards that allow for monitoring crack widths ranging from 0.05 to 7.0 mm. This is extremely convenient tool of a credit card sized.



Рис. 3.7. Зовнішній вигляд картки для визначення ширини розкриття тріщин / Appearance of the card for determining the width of crack opening

Методика вимірювання ширини тріщин за допомогою тріщиномірних карток дуже здійснюється відповідно до стандарту ASTM C 1579-13 і передбачає пересування шкали картки по дефекту, доки вона не вирівнюється з шириною тріщини бетонної конструкції. Для підвищення точності вимірювання, дослідження проводять двічі.

Іншим ефективним засобом дослідження ширини розкриття тріщин є цифровий штангенциркуль із точністю вимірювання 0,01 мм (рис. 3.8).

The method for measuring crack width using crack comparator cards is carried out in accordance with ASTM C 1579-13. It involves moving the card's scale along the defect until it aligns with the crack width in the concrete structure. To increase measurement accuracy, the procedure is performed twice.

Another effective tool for examining crack width is a digital caliper, which provides measurement accuracy up to 0.01 mm (Fig. 3.8).



Рис. 3.8. Цифровий штангенциркуль для вимірювання ширини тріщин бетону/залізобетону / Digital caliper for measuring the width of cracks in concrete/reinforced concrete

Вимірювач постачається у пластиковому футлярі й містить набір для вимірювань, що складається з таких елементів:

- цифровий штангенциркуль (вимірювач тріщин);
- 100 дисків із нержавіючої сталі діаметром 6,3 мм;
- пара кутових дисків для контролю тріщин у кутових елементах конструкції;
- пластикової підкладки;
- картки реєстрації тріщин для запису змін ширини тріщини;
- закріплення.

Методика досліджень полягає в наступному: спочатку на поверхню конструкції, що контролюється, на відстані 80...100 мм з обох боків від тріщини встановлюються і фіксуються металеві диски. Лінія дисків повинна бути перпендикулярна тріщині, як показано на рис. 3.8. Відстань між дисками вимірюється та записується в картку реєстрації. Через певний проміжок часу вимірювання повторюють шляхом встановлення губок цифрового штангенциркуля на попередньо улаштовані диски. Таким чином, швидкість і тенденції розвитку тріщини стають очевидними при кожному наступному вимірюванні.

Мікроскоп для вимірювання ширини тріщин розглянемо на прикладі приладу компанії ELE International, Велика Британія (рис. 3.9).

The measuring kit is supplied in a plastic case and includes a measurement set consisting of the following components:

- Digital caliper (crack gauge);
- 100 stainless steel discs with a diameter of 6.3 mm;
- A pair of angled discs for monitoring cracks in corner structural elements;
- Plastic base plate;
- Crack monitoring cards for recording crack width changes;
- Mounting accessories.

The testing method is as follows: metal discs are initially installed and fixed on the surface of the structure being monitored, at a distance of 80...100 mm on both sides of the crack. The line of discs should be perpendicular to the crack, as shown in the figure. The distance between the discs is measured and recorded on the monitoring card. After a certain period, the measurement is repeated by placing the jaws of the digital caliper on the previously installed discs. In this way, the speed and trend of crack development become clear with each subsequent measurement.

We will examine the crack width microscope using the example of a device from ELE International, UK (Fig. 3.9).



Рис. 3.9. Мікроскоп для вимірювання ширини розкриття тріщин бетону / Microscope for measuring the width of concrete crack opening

Мікроскоп встановлюється безпосередньо на поверхню конструкції таким чином, щоб лінза об'єктива була розташована на поверхні над тріщиною. При цьому не потребується видалення декоративного шару бетону або улаштування додаткових монтажних елементів.

Такий мікроскоп забезпечує 40-кратне збільшення зображення та діапазон вимірювання від 0,02 мм до 4,00 мм, що дозволяє здійснювати високоточні вимірювання для широкого спектра ширини тріщин.

На рис. 3.10 представлено знімки, зроблені під час вимірювання ширини тріщини на оптичному мікроскопі.

The microscope is placed directly onto the surface of the structure in such a way that the objective lens is positioned above the crack. This setup does not require the removal of the decorative concrete layer or the installation of additional mounting elements.

This type of microscope provides 40 times magnification and a measurement range from 0.02 mm to 4.00 mm, allowing for highly accurate measurements across a wide range of crack widths.

Fig. 3.10 shows images taken during crack width measurements using an optical microscope.

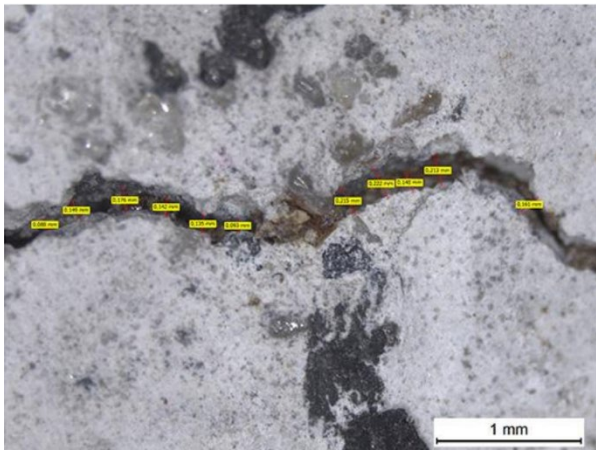


Рис. 3.10. Вимірювання ширини тріщини під оптичним мікроскопом / Measurement of crack width under the optical microscope

Для визначення розвитку тріщини на неї встановлюють маяк, який під час розкриття тріщини зсувається або розривається. Маяк, виконаний із цементу, скла або полімеру, встановлюють у місці найбільшого розвитку тріщини. Під час спостереження за розвитком тріщини по довжині кінці тріщини під час кожного огляду фіксують поперечними штрихами. Поряд із кожним штрихом проставляють дату огляду. Розташування тріщин схематично наносять на креслення розгортки стін будівлі або конструкції, позначаючи номери та дату встановлення маяків.

Найбільш просте рішення має пластинчастий маяк (рис. 3.11). Він складається з двох металевих, скляних або пластикових пластинок, які мають риски і які укріплені на розчині так, щоб при розкритті тріщини пластинки ковзали одна по іншій. Краї пластинок повинні бути паралельні одна одній. Після прикріплення пластинок до конструкції відзначають на них номер і

To monitor crack development, a crack-monitor (also known as a "tell-tale") is installed on the crack. As the crack widens, the monitor shifts or breaks. The monitor, made of cement, glass, or polymer, is placed at the point of greatest crack development. When observing the crack's propagation over time, the crack ends are marked with transverse lines during each inspection, and the date of the inspection is noted next to each mark. The crack locations are schematically plotted on the elevation drawings of the building or structure, indicating the monitor numbers and installation dates.

The simplest type is the plate-type monitor (Fig. 3.11). It consists of two metal, glass, or plastic plates with measurement lines, mounted in such a way that when the crack opens, the plates slide relative to each other. The edges of the plates must be parallel. After attaching the plates to the structure, the monitor number and installation date are

дату установки маяка. За вимірами відстані між рисками визначають величину розкриття тріщини.

marked on them. The distance between the lines is measured to determine the crack width.

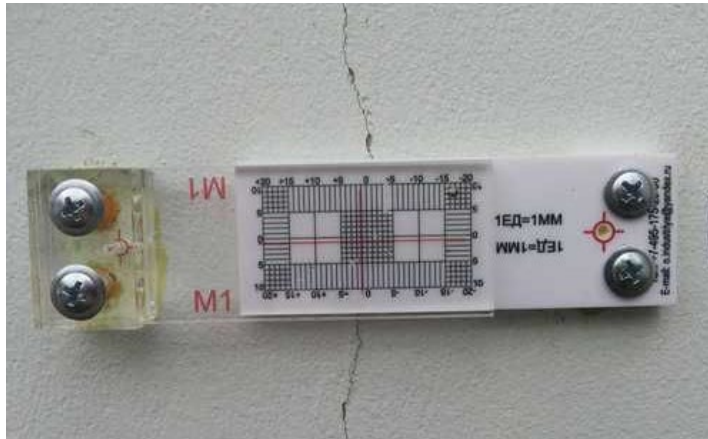


Рис. 3.11. Пластинчастий маяк / Plate-type monitor

Сучасним рішенням є застосування багаторазових одно- та дво-осьових цифрових маяків. Зовнішній вигляд такого обладнання наведено на рис. 3.12. Маяк встановлюється на прозорих полімерних пластинах. Роздільна здатність маяку становить 0,01 мм.

A modern solution involves the use of reusable single-axis and dual-axis digital crack monitors. The appearance of such equipment is shown in Fig. 3.12. The monitor is mounted on transparent polymer plates. The resolution of the monitor is 0.01 mm.



Рис. 3.12. Цифровий маяк марки E1 компанії Saugnac / Digital monitor E1 from Saugnac brand

За результатами досліджень на кожну тріщину складають графік її розкриття і заносять в акт спостереження за тріщинами, у якому вказують дату огляду, креслення з

Based on the research results, a crack opening chart is created for each crack and included in the crack monitoring report. This report

розташуванням тріщин і маяків, відомості про відсутність або появу нових тріщин.

Більш складним засобом спостереження за розвитком тріщин бетонних та кам'яних конструкцій є датчик лінійного переміщення (*Linear Variable Displacement Transducer*) надалі (LVDT). Цей прилад використовується для безперервного моніторингу розвитку тріщин з метою запобігання можливого швидкого їх розкриття або у випадку, коли місце розташування тріщини недоступне для використання простіших методів спостереження.

Датчик складається з центрального осердя, що рухається в циліндричній порожнині пристрою, що містить систему котушок, що перетворюють механічне зміщення сердечника в сигнал електричної напруги.

Принципом роботи LVDT є взаємодія. Первинна котушка, розташована в центральній частині циліндра, на яку подається змінний струм, створює магнітне поле всередині порожнистого циліндра, куди вставляється осердя. Дві вторинні котушки, що мають однакову кількість обмоток, але протилежних полярностей, розміщені еквідистантно на крайніх сторонах циліндра, біля первинної обмотки. Коли сердечник рухається між котушками, дві частини вторинної котушки отримують різні напруги через різну взаємну індуктивність.

contains the inspection date, drawings indicating the crack and monitor locations, and information about the presence or absence of new cracks.

A more advanced method for monitoring the development of cracks in concrete and masonry structures is the Linear Variable Displacement Transducer (LVDT). This device is used for continuous monitoring of crack progression to prevent rapid widening or in cases where the crack location is inaccessible for simpler observation methods.

The LVDT consists of a central core that moves within a cylindrical cavity containing a system of coils that convert the core's mechanical displacement into an electrical voltage signal.

The working principle of the LVDT is mutual induction. The primary coil, located in the central part of the cylinder and powered by alternating current, generates a magnetic field inside the hollow cylinder where the core is inserted. Two secondary coils, each with an equal number of windings but opposite polarities, are symmetrically placed on either side of the primary coil. As the core moves between the coils, the two halves of the secondary coil receive different voltages due to varying mutual inductance.

The LVDT is capable of detecting changes in displacement between

LVDT здатний фіксувати з дуже високою точністю зміну зміщення між двома фіксованими точками в діапазоні міліметрів або, навіть, кількох сантиметрів. Схематичне зображення датчика та його зовнішній вигляд наведено на рис. 3.13.

Незважаючи на високий рівень точності, установка вимагає обережності та уваги, особливо у випадку обстеження історичних будівель. Оскільки LVDT надає інформацію про переміщення лише між двома точками та вздовж попередньо визначеного напрямку, локальна поведінка, отримана датчиком, має бути, наскільки це можливо, типовою для глобальної поведінки об'єкта, що досліджується. З цієї причини вибір точки встановлення повинен враховувати загальну поведінку конструкції, місцеві умови структурних частин, а також фактичну консистенцію складового матеріалу, включаючи блоки (каміння або цеглу), будівельні розчини та взаємодію між ними.

Принцип роботи георадара (*Ground-penetrating radar*) подібний до будь-якого іншого радара. Георадар (надалі GPR) – це залежна від часу електромагнітна техніка, яка може надавати 2D або 3D радіолокаційні зображення з високою роздільною здатністю. Цей геофізичний метод був розроблений протягом останніх 30 років, головним чином для дослідження неглибокої поверхні землі, будівельних

two fixed points with extremely high accuracy, within a range of millimeters or even several centimeters. A schematic diagram and the appearance of the sensor are shown in Fig. 3.13.

Despite its high level of accuracy, LVDT installation requires care and attention, especially when inspecting historical buildings. Since the LVDT provides displacement information only between two points and along a predefined direction, the local behavior detected by the sensor should be representative of the global behavior of the structure under investigation as much as possible. For this reason, the selection of the installation point must take into account the overall structural behavior, local conditions of the structural components, and the actual consistency of the constituent materials, including blocks (stone or brick), construction mortars, and their interactions.

The operating principle of ground-penetrating radar (GPR) is similar to that of any other radar system. GPR is a time-dependent electromagnetic technique that can provide high-resolution 2D or 3D radar images. This geophysical method has been developed over the past 30 years, mainly for investigating shallow subsurface areas, construction materials, and infrastructure such as foundations, roads, and bridges. GPR uses the principle

матеріалів та інфраструктури, такої як основи і фундаменти, дороги, мости тощо. Георадар використовує принцип розсіювання електромагнітних хвиль для виявлення прихованих об'єктів і працює в діапазоні частот від 10 МГц до 3 ГГц.

of electromagnetic wave scattering to detect hidden objects and operates within a frequency range from 10 MHz to 3 GHz.

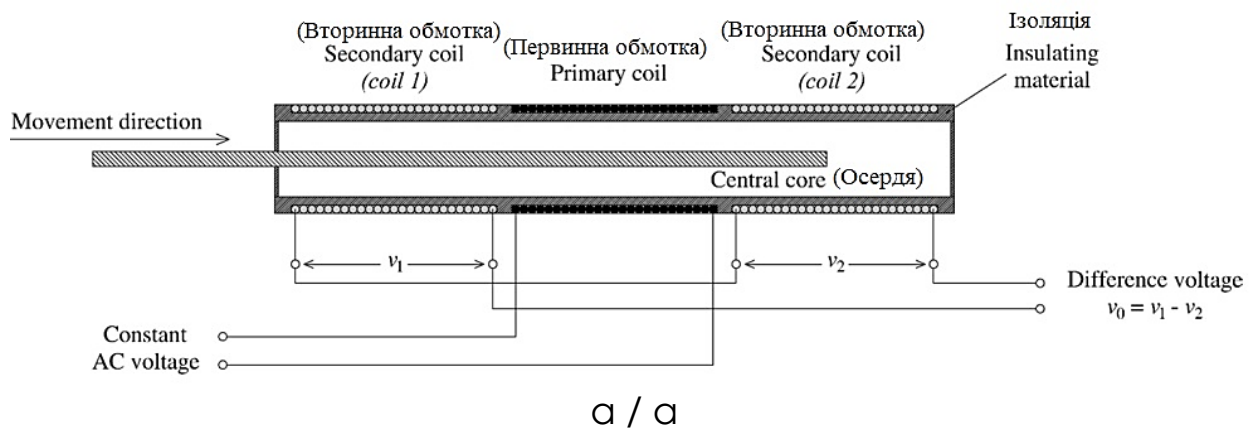


Рис. 3.13. Схематичне зображення (а) та принцип улаштування LVDT (б) для моніторингу розвитку тріщин / Schematic representation (a) and principle of LVDT arrangement (b) for monitoring crack development

Передавальна антена випромінює електромагнітну хвилю, яка поширюється крізь матеріал зі швидкістю, що визначається головним чином електричними властивостями матеріалу. Якщо хвиля стикається з порожниною, що є границею розділу фаз між матеріалом і пустотою з різними електричними властивостями, то частина енергії

A transmitting antenna emits an electromagnetic wave that propagates through the material at a speed primarily determined by the material's electrical properties. When the wave encounters a void or a boundary between materials with different electrical properties, part of the wave energy is "reflected" back to the surface while

хвилі «відбивається» назад на поверхню, а частина її енергії продовжує рухатися вглиб. Хвиля, яка відбивається назад на поверхню, уловлюється приймальною антеною та записується на цифровий запам'ятовуючий пристрій для подальшої інтерпретації (рис. 3.14).

the rest continues to penetrate deeper. The reflected wave is captured by a receiving antenna and recorded on a digital storage device for further interpretation (Fig. 3.14).

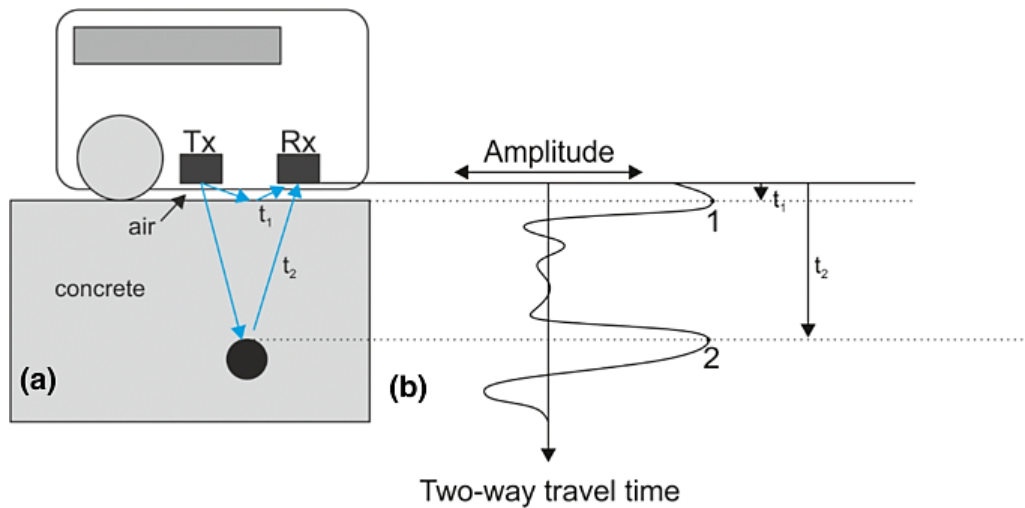


Рис. 3.14. Схематичне зображення принципу роботи георадару (а) та амплітуди розповсюдження електромагнітних хвиль в товщі бетону (б) / Schematic representation of the principle of operation of a ground penetrating radar (a) and the amplitude of propagation of electromagnetic waves in the concrete layer (b)

Компанією SPH Engineering було розроблено і впроваджено інноваційні наземні георадарні системи, призначені для інтеграції з безпілотниками (рис. 3.15). Ці системи використовують передові технології, забезпечуючи ефективний збір даних про глибину. Використовуючи GPR, інтегрований із дронами, стає можливим зазирнути всередину елементу будівельної конструкції, розташованої на значній висоті. Така інтеграція сприяє як більш безпечній роботі, захищаючи персонал від потенційних ризиків, так і революціонізує дослідницьку діяльність з підвищеною точністю та ефективністю.

SPH Engineering has developed and implemented innovative ground-penetrating radar (GPR) systems designed for integration with drones (Fig. 3.15). These systems utilize advanced technologies to enable efficient depth data collection. By using drone-integrated GPR, it becomes possible to examine the interior of structural elements located at significant heights. This integration not only enhances safety by protecting personnel from potential hazards but also revolutionizes investigative work by increasing both precision and efficiency.



Рис. 3.15. Фото суміщеної роботи георадара із безпілотними системами / Photo of combined operation of GPR with drones

В якості висновків до розділу можна зазначити, що на сьогоднішній день існують широкий спектр методів та засобів спостереження за тріщинами, що відрізняються за своєю простотою реалізації та чутливістю. Ступінь застосовності кожного з них буде визначатись насамперед ступенем відповідальності конструкції та її окремих елементів.

As a conclusion to the chapter, it can be noted that today there is a wide range of methods and tools for observing cracks, which differ in their simplicity of implementation and sensitivity. The degree of applicability of each of them will be determined, first of all, by the degree of responsibility of the structure and its individual elements.

References

Список рекомендованої літератури

1. Exploring Crack Reduction in High-Performance Concrete: The Impact of Nano-Silica, Polypropylene, and 4D Metallic Fibers / Alvansazyazdi Mohammadfarid, Farinango Diego, Yaucan Javier, Cadena Alexander, Santamaria Jorge, Bonilla Pablo, Leon Mario, Debut Alexis, Feizbahr Mahdi, Leon Luis, Ayala Byron, Cpi Procedia // *International Journal of Engineering & Technology Sciences*. – 2024. – 13 p.

2. Numerical and analytical predictions of the limit load of rectangular two way slabs / O. R. Famiyesin, K.M.A. Hossain, Y. H. Chia, P.A. Slade // *Computers & Structures*. – 2001. – Vol. 79, Issue 1. – Pp. 43-52. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(00\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(00)00113-9).

1. Alvansazyazdi, Mohammadfarid, Farinango, Diego, Yaucan, Javier, Cadena, Alexander, Santamaria, Jorge, Bonilla, Pablo, Leon, Mario, Debut, Alexis, Feizbahr, Mahdi, Leon, Luis, Ayala, Byron, Cpi, Procedia. (2024). Exploring Crack Reduction in High-Performance Concrete: The Impact of Nano-Silica, Polypropylene, and 4D Metallic Fibers. *International Journal of Engineering & Technology Sciences*.

2. Famiyesin, O.R., Hossain, K.M.A., Chia, Y.H., Slade, P.A. (2001). Numerical and analytical predictions of the limit load of rectangular two way slabs. *Computers & Structures*, 79(1), 43-52.

3. Santhosh K. V. A Smart Displacement Measuring Technique Using Linear Variable Displacement Transducer / K. V. Santhosh, B. K. Royo // *Procedia Technology*. – 2012. – № 4(854). – P. 861.

4. Sarthak Joshi. Linear Variable Differential Transducer (LVDT) & Its Applications in Civil Engineering / Sarthak Joshi, Shrikant Madhav Harle // *International Journal of Transportation Engineering and Technology*. – 2017. – Vol. 3, No. 4. – Pp. 62-66. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ijtet.20170304.13>.

5. Shokrabadi Mehran. Ground Penetrating Radar (GPR) Applications in Concrete Pavements / Shokrabadi Mehran, Joshaghani Alireza // *International Journal of Pavement Engineering*. – 2022. – Volume 23, Issue 13. – Pp. 4504-4531. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1954182>.

6. Барашиков А. Я. Оценка технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений / А. Я. Барашиков. – Київ : НМЦ Держнаглядохорпраці України, 1998. – 238 с.

7. Кліменко В. З. Випробування та обстеження будівельних конструкцій і споруд / В. З. Кліменко, І. Д. Белов. – Київ : Основа, 2005. – 208 с.

8. Панкевич О. Д. Діагностування тріщин будівельних конструкцій за допомогою нечітких баз знань : монографія / О. Д. Панкевич, С. Д. Штовба. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 108 с.

9. Федоренко М. М. Про утворення тріщин і роботу розтягнутого бетону між тріщинами в елементах залізобетонних конструкцій / М. М. Федоренко // *Будівельні матеріали і конструкції*. – 1968. – № 4. – С. 39–46.

[https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(00\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(00)00113-9).

3. Santhosh, K.V., Royo, B.K. (2012). A Smart Displacement Measuring Technique Using Linear Variable Displacement Transducer. *Procedia Technology*, 4, 854 – 861.

4. Sarthak Joshi, Shrikant Madhav Harle. (2017). Linear Variable Differential Transducer (LVDT) & Its Applications in Civil Engineering. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 3(4), 62-66. <https://doi.org/10.11648/j.ijtet.20170304.13>.

5. Shokrabadi, Mehran, Joshaghani, Alireza. (2022). Ground Penetrating Radar (GPR) Applications in Concrete Pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(13), 4504-4531. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1954182>.

6. Барашиков А. Я. Оценка технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений. Київ : НМЦ Держнаглядохорпраці України, 1998. 238 с.

7. Кліменко В. З., Белов І. Д. Випробування та обстеження будівельних конструкцій і споруд. Київ : Основа, 2005. 208 с.

8. Панкевич О. Д., Штовба С. Д. (2005). Діагностування тріщин будівельних конструкцій за допомогою нечітких баз знань : монографія. УНІВЕРСУМ-Вінниця.

9. Федоренко М. М. (1968). Про утворення тріщин і роботу розтягнутого бетону між тріщинами в елементах залізобетонних конструкцій. *Будівельні матеріали і конструкції*, (4), 39–46.

Self-monitoring questions

Питання до самоконтролю

1. Які основні причини появи тріщин у будівельних конструкціях?

2. Як можна класифікувати тріщини за їх?

3. Які типи тріщини виникають в конструкціях, що працюють за балковою схемою?

4. Які типи тріщини виникають в залізобетонних колонах?

5. Наведіть приклади тріщин плит перекриття.

6. У чому відмінності між тонкими та структурними тріщинами?

7. Як волога або усадка матеріалів сприяють розтріскуванню?

8. Тріщини в кам'яних та армокам'яних конструкціях.

9. Як тріщини можуть впливати на довговічність та безпеку конструкції?

10. Наведіть приклади тріщин, спричинених зовнішніми навантаженнями?

11. Які методи використовуються для виявлення та вимірювання тріщин у будівлях?

12. У чому полягає принцип роботи датчика лінійного переміщення?

13. У чому полягає принцип роботи георадару?

1. What are the main causes of cracks in building structures?

2. How can cracks be classified?

3. What types of cracks occur in structures designed with a beam system?

4. What types of cracks occur in reinforced concrete columns?

5. Give examples of cracks in floor slabs.

6. What are the differences between hairline cracks and structural cracks?

7. How do moisture or material shrinkage contribute to cracking?

8. Cracks in masonry and reinforced masonry structures.

9. How can cracks affect the durability and safety of a structure?

10. Give examples of cracks caused by external loads.

11. What methods are used to detect and measure cracks in buildings?

12. What is the working principle of a linear displacement sensor?

13. What is the working principle of a ground-penetrating radar (GPR)?

CHAPTER 4 INSPECTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES

РОЗДІЛ 4 ОБСТЕЖЕННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

4.1. Загальні відомості

Основними нормативними документами щодо обстеження будівель та споруд на території України є:

1. ДСТУ 9273:2024 Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість;

2. ДБН В.1.2-14:2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд;

3. ДБН В.1.2-6:2008 Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість;

4. ДБН В.1.2-7:2008 Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека;

5. ДБН В.1.2-9:2008 Основні вимоги до будівель і споруд. Безпека експлуатації;

6. ДБН В.1.2-XX:201X (проект) Експлуатаційна придатність будівель та споруд. Основні положення.

Основною метою технічного обстеження є визначення поточного технічного стану конструкцій будинків і споруд, виявлення ступеня фізичного зносу, дефектів, з'ясування експлуатаційних характеристик конструкцій, прогнозування їхньої

4.1. General Information

The main regulatory documents governing the inspection of buildings and structures in Ukraine are:

1. DSTU-N B V.1.2-18:2016 – Guidelines for the inspection of buildings and structures to determine and assess their technical condition.

2. DBN V.1.2-14:2018 – General principles of ensuring reliability and structural safety of buildings and structures.

3. DBN V.1.2-6:2008 – Basic requirements for buildings and structures. Mechanical resistance and stability.

4. DBN V.1.2-7:2008 – Basic requirements for buildings and structures. Fire safety.

5. DBN V.1.2-9:2008 – Basic requirements for buildings and structures. Operational safety.

6. DBN V.1.2-XX:201X (draft) – Operational suitability of buildings and structures. General provisions.

The main goal of a technical inspection is to determine the current technical condition of building structures, assess the degree of physical deterioration and defects, evaluate the operational characteristics of the structures, and forecast

поведінки в майбутньому. При обстеженні технічного стану будівлі або споруди одержувана інформація має бути достатньою для ухвалення обґрунтованого рішення про можливість її подальшої безаварійної експлуатації.

Відповідно до ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 розрізняють планове та позапланове обстеження будівель і споруд. Планове обстеження технічного стану будівель та споруд проводиться не пізніше ніж через два роки після їх уведення в експлуатацію. Надалі обстеження технічного стану будівель та споруд проводиться не рідше одного разу на 10 років і не рідше одного разу на п'ять років для будівель та споруд або їх окремих елементів, що працюють у несприятливих умовах (агресивні середовища, вібрації, підвищена вологість, сейсмічність району 7 балів і більше та ін.).

Передумовами для здійснення позапланових обстежень є:

- закінчення нормативних термінів експлуатації будівель та споруд;
- виявленні значні дефекти, пошкодження та деформації у процесі технічного обслуговування, що здійснюється власником будівлі (споруди);
- за результатами наслідків пожеж, стихійних лих, аварій, пов'язаних із руйнуванням будівлі (споруди);
- ініціатива власника об'єкта;

their future behavior. During the inspection of a building or structure, the information obtained must be sufficient to make a well-grounded decision about the possibility of its continued safe operation.

According to [DSTU-N B V.1.2-18:2016], there are two types of inspections: scheduled and unscheduled. Scheduled inspections of the technical condition of buildings and structures must be carried out no later than two years after they are put into operation. Subsequently, such inspections should be conducted at least once every 10 years and at least once every five years for buildings, structures, or individual elements that operate under adverse conditions (aggressive environments, vibrations, high humidity, seismicity of 7 or more on the MSK scale, etc.).

Unscheduled inspections are conducted in the following cases:

- Upon the expiration of the standard service life of the building or structure;
- If significant defects, damages, or deformations are discovered during routine maintenance performed by the owner;
- As a result of fires, natural disasters, or accidents that caused structural damage;
- At the initiative of the property owner;
- When the functional purpose of the building or structure changes;

- зміни технологічного призначення будівлі (споруди);

- розпорядження органів, уповноважених на ведення державного будівельного нагляду.

Необхідність проведення обстежень, їхній обсяг, склад і характер залежить від поставлених конкретних завдань. Підставою для обстеження можуть бути такі причини:

- наявність дефектів та пошкоджень конструкцій (наприклад, внаслідок силових, корозійних, температурних чи інших впливів, у тому числі нерівномірних просідань фундаментів), які можуть знизити характеристики міцності, деформативні характеристики конструкцій та погіршити експлуатаційний стан будівлі загалом;

- збільшення експлуатаційних навантажень та впливів на конструкції при переплануванні, модернізації та збільшенні поверховості будівлі;

- реконструкція будівель навіть у випадках, що не супроводжуються;

- збільшенням навантажень;

- виявлення відступів від проєкту, що знижують несучу здатність та експлуатаційні якості конструкцій;

- відсутність проєктно-технічної та виконавчої документації;

- зміна функціонального призначення будівель та споруд;

- відновлення перерваного будівництва будівель та споруд за відсутності консервації або через

- Upon the order of state construction supervision authorities.

The necessity, scope, and nature of the inspections depend on the specific tasks assigned. The grounds for initiating an inspection may include the following reasons:

The presence of defects and damage to structures (e.g., due to mechanical, corrosive, thermal, or other effects, including uneven foundation settlements), which may reduce the strength and deformation characteristics of the structures and impair the overall operational condition of the building;

- An increase in operational loads and impacts on structures due to renovation, modernization, or adding additional stories to a building;

- Reconstruction of buildings, even in cases that do not involve load increases;

- Detection of deviations from the design that reduce the load-bearing capacity and operational performance of the structures;

- Absence of design-technical and as-built documentation;

- Change in the functional purpose of buildings and structures;

- Resumption of halted construction of buildings and structures in the absence of preservation measures, or more than three years after halting construction even if preservation was performed;

три роки після припинення будівництва при виконанні консервації;

- деформації ґрунтових основ;
- необхідність контролю та оцінки стану конструкцій будівель, розташованих поблизу від споруд, що будуються;

- необхідність оцінки стану будівельних конструкцій, які зазнали впливу пожежі, стихійних лих природного характеру або техногенних аварій;

- необхідність визначення придатності виробничих та громадських будівель для нормальної експлуатації, а також житлових будівель для проживання в них.

4.2. Етапи і порядок обстежень

Технічне обстеження будівель та споруд проводиться в кілька етапів, серед яких є:

- попереднє (візуальне) обстеження;
- детальне (інструментальне) обстеження;
- дослідження характеристик матеріалів у лабораторних умовах.
- узагальнення результатів обстеження.

Попереднє (візуальне) обстеження проводять з метою попередньої оцінки технічного стану будівельних конструкцій за зовнішніми ознаками, а також для визначення необхідності проведення подальшого детального інструментального обстеження. Основою попереднього обстеження є огляд

- Soil foundation deformations;
- Need to monitor and assess the condition of structures in buildings located near construction sites;
- Need to assess the condition of structures affected by fire, natural disasters, or technological accidents;
- Need to determine the suitability of industrial and public buildings for normal operation, as well as residential buildings for habitation.

4.2. Stages and Procedure of Inspections

The technical inspection of buildings and structures is carried out in several stages, which include:

- Preliminary (*visual*) inspection;
- Detailed (*instrumental*) inspection;
- Laboratory testing of material characteristics;
- Summarization of the inspection results.

The preliminary (*visual*) inspection is performed to make an initial assessment of the technical condition of structural elements based on external signs, as well as to determine the need for a more detailed instrumental inspection. The basis of

будівлі або споруди та окремих конструкцій із застосуванням різного роду вимірювальних інструментів та приладів (рулетки, штангенциркулі, прогиноміри, тензометри, а також фотоапарати, 3D-сканери та навіть дрони для повітряної зйомки).

До складу робіт із попереднього обстеження входять:

- загальний огляд будівлі;
- збір загальних відомостей про будівлю (час будівництва, терміни експлуатації);
- загальна характеристика об'ємно-планувального і конструктивного рішень і систем інженерного обладнання;
- виявлення особливостей технології виробництва для виробничих будівель з позиції їхнього впливу на будівельні конструкції;
- визначення фактичних параметрів мікроклімату або виробничого середовища, температурно-вологісного режиму приміщення, наявності агресивних до будівельних конструкцій технологічних виділень, збір відомостей про антикорозійних заходах;
- гідрогеологічні умови ділянки й загальні характеристики ґрунтів основ;
- ознайомлення з архівними матеріалами вишукувань;
- вивчення матеріалів, які проводилися раніше на цьому об'єкті

the preliminary inspection is the visual survey of the building or structure and its individual components using various measuring tools and devices (measuring tapes, calipers, deflection meters, strain gauges, as well as cameras, 3D scanners, and even drones for aerial photography).

The preliminary inspection includes the following activities:

- General survey of the building;
- Collection of general information about the building (construction period, service life);
- General characterization of the building's spatial layout, structural solutions, and engineering systems;
- Identification of production technology features in industrial buildings in terms of their impact on building structures;
- Determination of actual microclimate or production environment parameters, temperature-humidity regime of the premises, presence of aggressive technological emissions affecting structures, and collection of data on anti-corrosion measures;
- Hydrogeological conditions of the site and general characteristics of foundation soils;
- Review of archival survey materials;

обстежень виробничого середовища та стану будівельних конструкцій.

Результатом проведення попереднього (візуального) обстеження є:

- схеми та відомості дефектів та пошкоджень з фіксацією їхніх місць та характеру;
- описи, фотографії дефектних ділянок;
- результати перевірки наявності характерних деформацій будівлі чи споруди та їхніх окремих будівельних конструкцій (прогини, нахили, вигини, перекоси, розломи тощо);
- встановлення аварійних ділянок (за наявності);
- уточнена конструктивна схема будівлі або споруди;
- виявлені несучі конструкції по поверхнях та їх розташування;
- уточнена схема місць виробок, розтинів, зондування конструкцій;
- особливості прилеглих ділянок території, вертикального планування, організації відведення поверхневих вод;
- оцінка розташування будівлі або споруди в забудові;
- попереднє оцінювання технічного стану будівельних конструкцій, інженерного обладнання, електричних мереж та засобів зв'язку (при необхідності), що визначається за ступенем ушкоджень та характерними ознаками дефектів.

– Study of previously conducted investigations on the production environment and the condition of building structures at the site.

The results of the preliminary (visual) inspection include:

- Diagrams and records of defects and damages with precise identification of their locations and nature;
- Descriptions and photographs of defective areas;
- Results of assessments for characteristic deformations in the building or structure and their individual structural elements (deflections, tilts, bends, distortions, fractures, etc.);
- Identification of emergency zones (if any);
- Refined structural scheme of the building or structure;
- Identification and layout of load-bearing structures by floors;
- Clarified scheme of exploration areas, openings, and probing of structures;
- Characteristics of adjacent land plots, elevation planning, and surface water drainage systems;
- Assessment of the location of a building or structure in urban development;
- Preliminary assessment of the technical condition of building structures, engineering equipment, electrical networks, and communication systems (if necessary), determined by the degree of damage and visible signs of defects.

Детальне (інструментальне) обстеження технічного стану будівлі або споруди включає в себе такі види робіт:

- вимірювання необхідні для виконання цілей обстеження геометричних параметрів будівель або споруд, конструкцій, їхніх елементів і вузлів;
- інженерно-геологічні дослідження (у разі потреби);
- інструментальне визначення параметрів дефектів та пошкоджень;
- визначення фактичних характеристик матеріалів основних несучих конструкцій та їхніх елементів;
- вимір параметрів експлуатаційного середовища, властивого технологічному процесу в будівлі та споруді;
- визначення реальних експлуатаційних навантажень та впливів, що сприймаються обстежуваними конструкціями з урахуванням впливу деформацій ґрунтів основи;
- визначення реальної розрахункової схеми будівлі або споруди та її окремих конструкцій;
- визначення зусиль у несучих конструкціях, що сприймають експлуатаційні навантаження;
- перевірочний розрахунок несучої здатності конструкцій за результатами обстеження;
- аналіз причин появи дефектів та пошкоджень у конструкціях;

The detailed (instrumental) inspection of the technical condition of a building or structure includes the following activities:

- Measurements required for assessing geometric parameters of the buildings or structures, their elements, and joints;
- Engineering and geological investigations (if necessary);
- Instrumental determination of defect and damage parameters;
- Determination of actual characteristics of materials used in primary load-bearing structures and their elements;
- Measurement of parameters of the operational environment related to the building's or structure's technological processes;
- Determination of actual operational loads and impacts borne by the structures under inspection, taking into account deformations in foundation soils;
- Determination of the actual structural analysis model of the building or structure and its individual components;
- Calculation of internal forces in load-bearing structures under operational loads;
- Verification of load-bearing capacity of structures based on inspection results;
- Analysis of the causes of defects and damages in the structures;

– складання підсумкового документа (висновку) з висновками за результатами обстеження.

Дослідження характеристик матеріалів в лабораторних умовах здійснюється, як правило із використанням методів і засобів руйнівного та неруйнівного контролю якості.

Узагальнення результатів досліджень полягає у складанні такої документації:

– технічний звіт, що містить результат обстеження плани в розрізі будівлі з геологічними профілями, конструктивні особливості будівлі, фундаментів, їхня геометрія;

– схеми розташування реперів і марок; опис прийнятої системи вимірювань; фотографії, графіки й епюри горизонтальних і вертикальних переміщень, кренів, розвитку тріщин, перелік факторів, що сприяють виникненню деформацій;

– оцінка міцнісних та деформаційних характеристик ґрунтів основ і матеріалу конструкцій);

– технічний висновок про категорію технічного стану будівлі з оцінками можливості сприйняття їм додаткових деформацій або інших впливів, зумовлених новим будівництвом або реконструкцією, а в разі необхідності - перелік заходів для підсилення конструкцій і зміцнення ґрунтів основ.

Дані про технічний стан будівельних конструкцій, висновки про можливість їх подальшої експлуатації або завдання про детальне

– Preparation of the final document (conclusion) with findings based on the inspection results.

Laboratory testing of material properties is typically carried out using both destructive and non-destructive quality control methods and tools.

The summarization of research results involves the preparation of the following documentation:

– A technical report containing inspection results (building plans and sections with geological profiles, structural features of the building and foundations, their geometry);

– Layout diagrams of benchmarks and markers; a description of the adopted measurement system; photographs, charts, and diagrams of horizontal and vertical displacements, tilts, crack development, and a list of factors contributing to deformation;

– An assessment of the strength and deformation characteristics of foundation soils and structural materials;

– A technical conclusion on the building's technical condition category, including an evaluation of its capacity to withstand additional deformations or other effects resulting from new construction or reconstruction. If necessary, a list of measures for strengthening the structures and stabilizing the foundation soils is included.

Data on the technical condition of structural elements, conclusions on the feasibility of further operation,

обстеження, які визначають на стадії попереднього обстеження, бажано представляти у вигляді таблиці (табл. 4.1).

or tasks for detailed inspection identified during the preliminary inspection are preferably presented in tabular form (Table 4.1).

Таблиця 4.1 – Технічний стан обстежуваних конструкцій

Table 4.1 – Technical Condition of Inspected Structures

Найменування будівельних конструкцій, приміщень, осей, відміток / Name of Structural Elements, Rooms, Axes, Elevations	Конструктивні рішення, матеріали / Structural Solutions, Materials	Характер і розмір дефекту або пошкодження (з зазначенням дати обстеження) / Nature and Size of Defect or Damage (with Inspection Date)	Можлива причина виникнення / Possible Cause of Occurrence	Висновки про можливість подальшої експлуатації або задачі детального обстеження / Conclusion on Feasibility of Further Use or Tasks for Detailed Inspection
1	2	3	4	5

Таким чином, технічне обстеження будівель і споруд з метою встановлення категорії їх технічного стану є комплексним завданням, що потребує залучення інженерів із обстеження з високою кваліфікацією, а також високоточного обладнання.

Thus, technical inspection of buildings and structures to establish the category of their technical condition is a complex task that requires the involvement of highly qualified inspection engineers, as well as high-precision equipment.

4.3. Категорія технічного стану будівель і споруд

На підставі результатів обстеження та перевірочних розрахунків проводять оцінювання категорій технічного стану несучих конструкцій. Відповідно до ДСТУ 9273:2024 «Настанова щодо обстеження будівель і споруд» для визначення та оцінювання їхнього технічного стану, розрізняють такі категорії технічного стану будівель і споруд:

4.3. The Categories of Technical Condition of Buildings and Structures

Based on the results of the inspection and verification calculations, the technical condition categories of load-bearing structures are assessed. The following technical condition categories of buildings and structures are distinguished:

1. Normal;
2. Satisfactory;

- 1 – нормальний;
- 2 – задовільний;
- 3 – не придатний до нормальної експлуатації;
- 4 – аварійний.

До нормального належить категорія технічного стану – 1. На елементах відсутні пошкодження, які перешкоджають нормальній експлуатації об'єкта, фактичні навантаження не перевищують розрахункових норм.

До задовільного відносять категорію – 2. Можуть бути присутніми деякі відхилення від проєкту, дефекти, які знижують довговічність конструкції, але не заважають експлуатації будови за призначенням. Потрібні заходи захисту конструкції та дотримання встановлених вимог щодо його використання.

Непридатне до нормальної експлуатації – категорія 3. Об'єкт не відповідає вимогам категорій 1 і 2. Проте при аналізі пошкоджень є можливість приведення його в належний стан шляхом ремонту й посилення конструкцій. Необхідно виконати ремонт, підсилення або заміну конструкції, а до завершення цих заходів використовувати об'єкт за обмеженим режимом експлуатації, контролюючи стан конструкції, навантаження та впливи.

Аварійне – категорія 4. Будівля не відповідає вимогам 1 і 2 категорій. У процесі аналізу дефектів не виявлено можливість ремонту й посилення конструкцій. Необхідно негайно виключити перебування людей у зоні можливого обвалення та/або

3. Unsuitable for normal operation;

4. Hazardous (Emergency).

Category 1 – Normal condition: No damage is present that would hinder the normal use of the facility. Actual loads do not exceed the calculated norms.

Category 2 – Satisfactory condition: Some deviations from the design and defects may be present, reducing the durability of the structure but not interfering with its intended use. Protective measures and adherence to established usage requirements are necessary.

Category 3 – Unsuitable for normal operation: The structure does not meet the criteria of categories 1 and 2. However, based on damage analysis, it is possible to bring it into proper condition through repair and reinforcement. Until these measures are completed, the building must be used under restricted conditions with regular monitoring of structural condition, loads, and effects.

Category 4 – Emergency condition: The structure does not meet the criteria of categories 1 and 2, and defect analysis shows no possibility for repair or reinforcement. Immediate evacuation of people from the risk zone is required, and measures must be taken to prevent collapse until repairs, reinforcement, or demolition are carried out.

вжити заходів, які унеможливають таке обвалення до проведення ремонту, підсилення або заміни конструкції або до ліквідації об'єкта.

Класифікаційні ознаки технічного стану (категорій) основних типів бетонних та залізобетонних конструкцій наведені в таблиці 4.2.

Classification criteria for the technical condition categories of major types of concrete and reinforced concrete structures are provided in Table 4.2.

Таблиця 4.2 – Класифікаційні ознаки технічного стану бетонних та залізобетонних конструкцій

Table 4.2 – Classification Criteria for the Technical Condition of Concrete and Reinforced Concrete Structures

№/ No.	Категорія технічного стану / The Category of Technical Condition	Ознаки стану / Condition Indicators	Причини появи дефектів / Causes of Defects	Наслідки / Consequences
1	2	3	4	5
1.	Нормальний / Normal	Тріщини, що не мають чіткої орієнтації кордонів, які розташовані на поверхні / Cracks with no clear orientation, located on the surface	Усадка в результаті порушення температурного режиму і вологісної обробки бетонної суміші, властивостей цементу і т. ін. / Shrinkage due to improper temperature and moisture curing, cement properties, etc.	Не впливають на несучу здатність. Можуть знижувати довговічність / Do not affect load-bearing capacity. May reduce durability
2.	Задовільний / Satisfactory	Волосяні тріщини уздовж арматури, як наслідок появи іржі на поверхні / Hairline cracks along reinforcement caused by rust	Корозія арматури виникає при втраті бетоном його захисних властивостей / Corrosion of reinforcement due to loss of protective properties of concrete	Зниження несучої здатності до 5 %. Може знизити тривалість використання поверхні / Reduction in load-bearing capacity up to 5 %. May reduce surface lifespan

Закінчення таблиці 4.2 / End of table 4.2

1	2		3	4	5
3.	Непридатний для нормальної експлуатації / Unsuitable for normal operation		Пошкодження арматури і закладних елементів (надрізи, розриви і т. ін.) найчастіше в поєднанні із попередніми дефектами / Damage to reinforcement and embedded parts (notches, tears, etc.), often with prior defects	Механічні пошкодження / Mechanical damage	Зниження несучої здатності пропорційно площі перетину / Reduction in load-bearing capacity proportional to cross-sectional area
4.	Аварійний / Hazardous (Emergency)		Розриви або зміщення поперечної арматури в зоні похилих тріщин; розриви робочої арматури / Breaks or displacement of transverse reinforcement in areas of diagonal cracks; breaks in main reinforcement	Перенавантаження конструкції / Overloading of the structure	Виникає ймовірність обвалення / Risk of collapse

Класифікаційні ознаки технічного стану (категорій) основних типів кам'яних та армокам'яних конструкцій наведено в таблиці 4.3.

Classification Criteria for the Technical Condition (Categories) of Main Types of Masonry and Reinforced Masonry Structures are presented in Table 4.3.

Таблиця 4.3 – Класифікаційні ознаки технічного стану кам'яних та армокам'яних конструкцій**Table 4.3 – Classification Criteria for the Technical Condition of Masonry and Reinforced Masonry Structures**

№/ No.	Категорія технічного стану / The Category of Technical Condition	Ознаки стану / Condition Indicators	Кількісна оцінка / Quantitative Assessment
1	2	3	4
1.	Нормальний / Normal	Дефектів та пошкоджень немає / No defects or damage present	–
2.	Задовільний / Satisfactory	Виморожування та вивітрювання мурування, відшарування облицювання на глибину до 0,5 см товщини. Вертикальні та косі тріщини (незалежно від довжини та ширини розкриття), що перетинають не більше двох рядів мурування / Frost damage and weathering of masonry, delamination of facing to a depth of up to 0.5 cm. Vertical and diagonal cracks (regardless of length and width) intersecting no more than two rows of masonry	До 15 / Up to 15
3.	Непридатний для нормальної експлуатації / Unsuitable for normal operation	Виморожування та вивітрювання мурування, відшарування облицювання на глибину до 2,0 см товщини. Вертикальні та косі тріщини у несучих стінах та стовпах, на висоту не більше чотирьох рядів мурування. Нахилання, випирання стін та фундаментів в межах поверху не більше, ніж на 1/6 їхньої товщини. Наявність вертикальних тріщин між поздовжніми та поперечними стінами: розривання або висмикування окремих сталевих з'єднань та анкерів кріплення стін до колон і перекриттів. Місцеве пошкодження мурування на глибину до 2 см під опорами ферм, балок, прогонів та перемичок у вигляді тріщин на кінцях опор, що перетинають не більше двох рядів мурування. Зміщення плит перекриттів на опорах не більше ніж на 1/5 глибини закладання, але не більше 2 см / Frost damage and weathering of masonry, delamination of facing up to 2.0 cm deep. Vertical and diagonal cracks in load-bearing walls and piers extending up to four rows of masonry. Tilting or bulging of walls and foundations within a story not exceeding 1/6 of their thickness. Presence of vertical cracks between longitudinal and transverse walls; rupture or pulling out of individual steel connectors and anchors attaching walls to columns and slabs.	15–25

Закінчення таблиці 4.3 / End of table 4.3

1	2	3	4
		Local masonry damage up to 2 cm deep under supports of trusses, beams, girders, and lintels in the form of end cracks intersecting no more than two masonry rows. Displacement of floor slabs at supports not exceeding 1/5 of the embedment depth, but no more than 2 cm	
4.	Аварійний / Hazardous (Emergency)	Обвалення ділянок стін. Виморожування та вивітрювання мурування на глибину понад 2,0 см товщини. Вертикальні та косі тріщини (крім температурних та осадочних) у несучих стінах та стовпах на висоту не більше восьми рядів мурування. Нахилення та випирання стін у межах поверху на 1/3 їх товщини та більше. Зміщення (зсування) стін, стовпів та фундаментів у горизонтальних швах або штрабі. Відривання поздовжніх стін від поперечних у місцях їх перетину, розривання або висмикування сталевих з'єднань та анкерів кріплення стін до колон і перекриттів. Пошкодження мурування під опорами ферм, балок або перемичок у вигляді тріщин, роздрібнення каменю або зміщення рядів мурування у горизонтальних швах на глибину більше 2 см; наявність вертикальних або косих тріщин, що перетинають більше чотирьох рядів мурування. Зміщення плит перекриттів на опорах більше, ніж на 1/5 глибини закладання у стіну / Collapse of wall sections. Frost damage and weathering of masonry deeper than 2.0 cm. Vertical and diagonal cracks (excluding thermal and settlement) in load-bearing walls and piers up to eight masonry rows high. Tilting and bulging of walls within a story by 1/3 of their thickness or more. Horizontal displacement (shearing) of walls, piers, and foundations in horizontal joints or along diagonal grooves. Separation of longitudinal walls from transverse ones at their junctions, rupture or pulling out of steel connectors and anchors fixing walls to columns and slabs. Masonry damage under supports of trusses, beams, or lintels in the form of cracks, stone fragmentation, or displacement of masonry rows in horizontal joints to a depth of more than 2 cm; presence of vertical or diagonal cracks intersecting more than four rows of masonry. Displacement of floor slabs at supports exceeding 1/5 of the embedment depth into the wall	25–50

Класифікаційні ознаки технічного стану (категорій) основ та фундаментів наведені в таблиці 4.4.

Classification Criteria for the Technical Condition (Categories) of Foundations and Subgrades are provided in Table 4.4.

Таблиця 4.4 – Класифікаційні ознаки технічного стану основ та фундаментів

Table 4.4 – Classification Criteria for the Technical Condition of Foundations and Subgrades

№/ No.	Категорія технічного стану / The Category of Technical Condition	Ознаки стану / Condition Indicators	Кількісна оцінка / Quantitative Assessment
1	2	3	4
1.	Нормальний / Normal	Дрібні тріщини у цоколі; фізико-геологічні процеси і явища, які негативно впливають на умови експлуатації будинку або споруди, відсутні / Minor cracks in the plinth; no physical or geological processes or phenomena negatively affecting the operating conditions of the building or structure	Ширина розкриття тріщин до 1,5 мм / Crack width up to 1.5 mm
2.	Задовільний / Satisfactory	Окремі глибокі тріщини у цоколі і стінах; викривлення горизонтальних ліній цоколя; місцеві вибоїни, відколи, порушення штукатурного шару цоколя; Деформації, що порушують нормальну експлуатацію будівель, відсутні; місцеві деформації поверхні ґрунтів, вимощення, полів, локальне замочування ґрунтів / Isolated deep cracks in the plinth and walls; distortion of horizontal lines of the plinth; local potholes, spalling, and damage to the plaster layer of the plinth; no deformations affecting the normal operation of the building; local surface deformations of the soil, pavements, or grounds; localized soil soaking.	Ширина розкриття тріщин до 6мм; нерівномірне осідання з прогином стін до 0.01; пошкодження на площині до 25 % / Crack width up to 6 mm; uneven settlement with wall deflection up to 0.01; damage affecting up to 25% of the surface
3.	Непридатний для нормальної експлуатації / Unsuitable for normal operation	Наскрізні тріщини у цоколі з поширенням на висоту будівлі; викривлення і значне осідання окремих ділянок із стабілізацією деформацій; Деформації, які порушують нормальну експлуатацію будівлі; проявлення різкої втрати стійкості ґрунтів / Through cracks in the plinth extending up the height of the building; distortion and significant settlement of individual areas with stabilized deformations; deformations affecting the normal operation of the building; signs of sudden loss of soil stability	Ширина розкриття тріщин до 20-30 мм. Окремі тріщини до 70 мм. Нерівномірне осідання з прогином стін більше 0.01 / Unsuitable for normal operation Crack width up to 20–30 mm; isolated cracks up to 70 mm; uneven settlement with wall deflection greater than 0.01
4.	Аварійний / Hazardous (Emergency)	Прогресуючі наскрізні тріщини на висоту будинку; нерівномірні осідання фундаментів, руйнування цоколя, перекоси прорізів, зсув плит та балок; руйнування конструктивних елементів, що визначають стійкість будівлі; деформації аварійного характеру; прогресуючі деформації ґрунтової основи /	Ширина розкриття тріщин більше 90-100 мм; відносна різниця осідань більше 0.002 /

Закінчення таблиці 4.4 / End of table 4.4

1	2	3	4
		Progressive through cracks extending up the height of the building; uneven settlement of foundations; destruction of the plinth, distortion of openings, displacement of slabs and beams; failure of structural elements critical to the building's stability; emergency-type deformations; progressive soil subgrade deformations	Crack width greater than 90–100 mm; relative settlement difference greater than 0.002

Аналізуючи вищезазначене можна дійти висновку, що категорія технічного стану будівель і споруд будь-якого призначення визначатиметься, перш за все, рівнем дефектності і, відповідно, ступенем їх впливу на несучу здатність елементів конструкцій.

Analyzing the above, we can conclude that the category of technical condition of buildings and structures of any purpose will be determined, first of all, by the level of defects and, accordingly, the degree of their impact on the bearing capacity of structural elements.

References

Список рекомендованої літератури

1. ДБН В.1.2-14-2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд.

2. ДБН В.1.2-6:2021 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість.

3. ДСТУ 9273:2024 Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість.

4. Якименко О. В. Технічна експлуатація будівель та споруд : навч. посібник / О. В. Якименко, К. О. Кітьова; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 247 с.

1. ДБН В.1.2-14-2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд.

2. ДБН В.1.2-6:2021 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість.

3. ДСТУ 9273:2024 Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість.

4. Якименко О. В., Кітьова К. О. (2019). *Технічна експлуатація будівель та споруд*. ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.

Self-monitoring questions

Питання до самоконтролю

1. Яка мета обстеження будівель та споруд?

2. Які основні етапи обстеження будівлі?

3. Як проводиться візуальний огляд споруди та яке його значення?

4. Які види вимірювань та інструментальні методи використовуються під час обстежень?

5. Як оцінюється технічний стан бетонних та залізобетонних конструкцій?

6. Як оцінюється технічний стан кам'яних та армокам'яних конструкцій?

7. Яка процедура обстеження несучих елементів будівлі?

8. Як документуються тріщини, деформації та інші дефекти під час обстеження?

9. Яку роль відіграє дослідження ґрунту та ділянки в процесі обстеження?

10. Як аналізуються та інтерпретуються результати обстеження?

11. Які рекомендації щодо технічного обслуговування, ремонту або підсилення на основі результатів обстеження?

12. Як часто слід проводити періодичні огляди будівель та споруд?

13. Як вимоги безпеки та нормативні акти включені в процес обстеження?

1. What is the purpose of inspecting buildings and structures?

2. What are the main stages of a building inspection?

3. How is a visual inspection of a structure conducted, and what is its importance?

4. What types of measurements and instrumental methods are used during inspections?

5. How is the technical condition of concrete and reinforced concrete structures assessed?

6. How is the technical condition of masonry and reinforced masonry structures assessed?

7. What is the procedure for inspecting the load-bearing elements of a building?

8. How are cracks, deformations, and other defects documented during an inspection?

9. What role does soil and site investigation play in the inspection process?

10. How are inspection results analyzed and interpreted?

11. What recommendations can be made for maintenance, repair, or reinforcement based on inspection findings?

12. How often should periodic inspections of buildings and structures be conducted?

13. How are safety requirements and regulatory standards incorporated into the inspection process?

CHAPTER 5 TECHNICAL SUPPORT FOR INSPECTIONS

РОЗДІЛ 5 ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБСТЕЖЕНЬ

5.1. Загальна інформація

Детальне інструментальне обстеження (надалі діагностика) має суттєве значення для оцінки безпеки конструкції, особливо для процесів моніторингу та технічного обслуговування з погляду забезпечення тривалості життєвого циклу будівлі.

Як уже було зазначено в розділі 1, будівлі та споруди на території України, поряд із пошкодженнями, викликаними бойовими діями через російською агресією, демонструють глибокий стан деградації внаслідок їх фізичного і морального зносу. Явища старіння особливо актуальне, коли йдеться про історичну спадщину, що вимагає приділяти більше уваги оцінці властивостей оригінальних будівельних матеріалів, оскільки відсутня будь-яка інформація стосовно їхніх механічних властивостей. У зв'язку з цим діагностика технічного стану елементів таких будівель та споруд повинна проводитися таким чином, щоб уникнути серйозних структурних пошкоджень.

Сучасні методи діагностики дозволяють визначити додаткові зміни станів конструкцій, що з'являються

5.1. General Information

Detailed instrumental inspection (hereinafter referred to as diagnostics) plays a significant role in assessing the safety of structures, especially for monitoring and maintenance processes aimed at ensuring the longevity of a building's life cycle.

As shown in chapter 1, buildings and structures in Ukraine, in addition to damage caused by military actions resulting from Russian aggression, exhibit profound degradation due to physical and moral aging. Aging phenomena are particularly critical when it comes to historical heritage, requiring greater attention to the assessment of the original building materials' properties, especially given the lack of information regarding their mechanical characteristics. Consequently, diagnostics of the technical condition of such buildings and structures must be conducted in a way that avoids serious structural damage.

Existing diagnostic methods allow for the detection of additional state changes in structures that may occur during transportation. In new buildings and structures, during the

під час транспортування. У нових будівлях та спорудах, на стадії зведення та приймання їх в експлуатацію, об'єктивну інформацію про їх стан можна отримати лише за умови використання сучасної вимірювальної апаратури.

Підвищені вимоги пред'являються до методів технічної діагностики при аналізі причин аварій унаслідок пошкоджень конструкцій у процесі монтажу та експлуатації будівель, а також катастроф та аварій із людськими жертвами.

На сьогодні всі існуючі методи діагностики будівель та споруд можна поділити на три групи:

1. Неруйнівні методи.
2. Напівруйнівні методи.
3. Руїнівні методи.

Класифікація методів контролю залежності від їхньої інвазивності наведено на рис. 5.1.

Разом із тим, спостерігається стрімкий розвиток і впровадження інформаційних технологій у будівельній галузі, застосування яких дозволяє вирішувати широкий спектр складних технічних завдань, у тому числі пов'язаних з діагностикою, ідентифікацією дефектів, відновлення та посилення несучих елементів конструкцій на всіх етапах життєвого циклу будівлі.

construction stage and commissioning, objective information about their condition can only be obtained using modern measuring equipment.

Higher standards are applied to technical diagnostic methods when analyzing the causes of failures resulting from structural damages during the assembly and operation of buildings, as well as in disasters and accidents involving human casualties.

Today, all existing diagnostic methods for buildings and structures can be divided into three groups:

1. Non-destructive tests;
2. Semi-destructive (or Minor-destructive) tests;
3. Monitoring methods.

A classification of control methods based on their invasiveness is shown in Fig. 5.1.

At the same time, there is a rapid development and implementation of information technologies in the construction sector, which allows solving a wide range of complex technical tasks, including diagnostics, defect identification, restoration, and reinforcement of load-bearing structural elements at all stages of a building's life cycle.

Non-Destructive Testing methods / Неруйнівні методи контролю	Напівруйнівні методи контролю / Minor Destructive Testing methods	Руйнівні методи контролю / Monitoring methods
1. Акустичні методи контролю / Acoustic control methods: метод акустичної емісії; ультразвукова дефектоскопія; акустична томографія / acoustic emission method; ultrasonic flaw detection; acoustic tomography 2. Магнітні методи контролю / Magnetic control methods: георадар; магнітна та електромагнітна дефектоскопія / georadar; magnetic and electromagnetic flaw detection 3. Контроль виробів про-свічуванням радіаційним випромінюванням / Product control by radiation irradiation	1. Механічні методи контролю / Mechanical inspection methods: випробування на відрив; відрив зі сколюванням; метод пружного відскоку; метод ударного імпульсу / pull-off test; chipping test; elastic rebound test; shock pulse test 2. Випробування із пластичним домкратом (Flat-jack tests) / Flat-jack tests 3. Огляд за допомогою гнучких бороскопів / Flexible borescope inspection	1. Статичні випробування / Static tests 2. Динамічні випробування / Dynamic tests

Рис. 5.1. Класифікація методів контролю якості будівельних конструкцій / Classification of methods for quality control of building structures

Застосування інформаційних технологій пов'язано з обробкою великої кількості даних систем автоматизованого проектування і підготовки технологічного процесу виробництва (CAD/CAM систем), системи управління будівлями (BMS, Building Management System), систем планування ресурсів (ERP-system, Enterprise Resource Planning), систем інформаційного моделювання будівель (BIM, Building Information Modeling). Остання набула особливої популярності у всьому світі. Це зумовлено насамперед її високою ефективністю в цих процесах, оскільки традиційні

The use of information technologies is associated with the processing of large volumes of data from computer-aided design and manufacturing systems (CAD/CAM systems), Building Management Systems (BMS), Enterprise Resource Planning systems (ERP systems), and Building Information Modeling (BIM) systems. BIM has gained particular popularity worldwide due to its high efficiency in these processes, as traditional methods of diagnosing existing buildings often involve a large amount of manual and instrumental measurements.

методи діагностики існуючих будівель зазвичай пов'язані із великою кількістю ручних – інструментальних вимірювань. Якість таких досліджень буде повністю залежати від кваліфікації та психіко-фізіологічних особливостей контролера, що є менш ефективним і схильним до помилок.

У той час як BIM-технології можуть з легкістю автоматизувати й систематизувати збір і обробку даних завдяки виключенню людського фактору, покращити якість управління інформацією та сприяти ефективній комунікації та співпраці, тобто зменшити вірогідність помилок у майбутньому.

Створення та застосування BIM-моделі існуючих будівель дає можливість контролю та управління системами об'єкта; що в свою чергу дозволяє забезпечити необхідні параметри безпеки та нормативні експлуатаційні показники будівлі, а також зменшення економічного збитку, який виникає внаслідок раптових аварій.

З огляду на вищесказане, BIM-технології слід розглядати як окремі, не менш важливі засоби забезпечення та контролю технічних та експлуатаційних характеристик будівель та споруд протягом всього їхнього життєвого циклу.

The quality of such manual surveys is highly dependent on the qualifications and psycho-physiological characteristics of the inspector, making them less efficient and more prone to errors. In contrast, BIM technologies can easily automate and systematize data collection and processing by eliminating the "human factor," improving information management quality, and promoting effective communication and collaboration thus reducing the likelihood of future errors.

Furthermore, the creation and application of a BIM model for existing buildings enables the control and management of a facility's systems, which in turn ensures the necessary safety parameters and compliance with operational standards, while also reducing economic losses caused by sudden failures.

Considering the above, BIM technologies should be viewed as an independent and equally important means of ensuring and monitoring the technical and operational characteristics of buildings and structures throughout their entire life cycle.

5.2. Засоби неруйнівного контролю

Нині для оцінки технічного стану будівель і споруд широкого впровадження набули BIM-орієнтовані інструменти, засновані на побудові числової моделі будівлі (так званого числового двійника), що дозволяє змодельовати статичну та динамічну структурну поведінку конструкції в умовах діючих навантажень. Застосування таких моделей дозволяє значно підвищити продуктивність оцінки стану існуючих будівель і споруд.

Водночас застосування таких цифрових моделей пов'язано з певними складнощами, здебільшого зумовлених необхідністю забезпечення високої точності цифрових двійників. Чим складніша конструкція, тим складніша повинна бути цифрова модель, що відображатиме поведінку конструкції в реальних умовах.

Підвищення точності цифрової моделі можливе лише за умови проведення детального (візуального та інструментального) обстеження конструкції, а саме:

1. Визначити структурну цілісність та геометрію елементів конструкції;
2. Визначити фізико-хімічні та механічні властивості матеріалів;
3. Визначити зони погіршення стану та пошкоджень елементів конструкції. Встановити природу цих пошкоджень;

5.2. Non-Destructive Testing Tools

Today, BIM-oriented tools, based on the creation of a digital model of a building (the so-called digital twin), have been widely adopted for assessing the technical condition of buildings and structures. These models allow for the simulation of the static and dynamic structural behavior of a structure under operational loads. The use of such models significantly increases the efficiency of condition assessments for existing buildings and structures.

However, the use of digital models is associated with certain challenges, primarily due to the need to ensure high accuracy of the digital twins. The more complex the structure, the more complex the digital model must be to accurately reflect the real behavior of the structure.

Improving the accuracy of the digital model is only possible through detailed (visual and instrumental) inspection of the structure, specifically to:

1. Determine the structural integrity and geometry of structural elements;
2. Identify the physicochemical and mechanical properties of materials;
3. Detect areas of deterioration and damage in structural elements

4. Визначити характер армування та глибину її закладання без пошкоджень самого об'єкту досліджень.

У зв'язку із вищезазначеним, для визначення поточного технічного стану конструкції незамінними стають технічні засоби неруйнівного контролю (NDT), що забезпечують збір даних про конструкцію без її пошкодження.

Із рис. 5.1 видно, що до основних методів неруйнівного контролю належать:

1. Акустичні метод контролю (*Sonic Methods of Testing*): Метод акустичної емісії або акустичного луна; Ультразвукова дефектоскопія; Акустична томографія.

2. Магнітні методи контролю Георадари (GPR) тощо;

3. Інфрачервона термографія.

Розглянемо детально сутність кожного з цих методів.

5.2.1. Акустичні методи випробування

Акустичний контроль – неруйнівний контроль внутрішньої структури об'єкта, що ґрунтується на застосуванні пружних коливань, які збуджуються чи виникають в об'єкті контролю. Метод отримав широкого поширення з метою контролю якості залізобетону, кам'яної кладки, металевих конструкцій для визначення характеристик та дефектів щільності матеріалів (пор, тріщин, відшарування тощо).

and determine the nature of the damage;

4. Identify the reinforcement layout and depth without damaging the investigated object.

In this regard, technical means of non-destructive testing (NDT) become indispensable for assessing the current technical condition of structures, providing data collection without causing any damage.

As shown in the figure 5.1, the main non-destructive testing methods include:

1. Acoustic Testing Methods: Sonic Emission Tests/Sonic Echo Tests; Ultrasonic Pulse Velocity Tests; Acoustic Tomography.

2. Magnetic Field Testing Methods: Ground Penetrating Radar (GPR), etc.

3. Infrared Thermography.

We will now take a closer look at each of these methods.

5.2.1. Sonic Methods of Tests

Acoustic testing is a non-destructive method used to assess the internal structure of an object, based on the use of elastic vibrations that either are induced or naturally occur within the object under inspection. This method has gained widespread use for quality control of reinforced concrete, masonry, and metal structures, specifically for determining material characteristics and detecting defects such as pores, cracks and delamination.

Акустичні методи неруйнівного контролю поділяються на дві підгрупи: активні та пасивні. До активних належать методи, що засновані на випроміненні акустичного сигналу (зондувального імпульсу) в об'єкт контролю, та дослідженні сигналу, що пройшов, та/або відбитого сигналу. Яскравим представником активного акустичного контролю є ультразвукова дефектоскопія.

До пасивних належать методи, що ґрунтуються на реєстрації та вивченні сигналів, утворених у результаті проходження в об'єкті контролю певних фізичних процесів (наприклад, розвиток тріщини під навантаженням). Пасивні методи також називають ще методами акустичної емісії.

Збудження акустичних (ультразвукових) хвиль та їх розповсюдження.

Акустичними (пружними) хвилями називають механічні збурення (деформації), що розповсюджуються в пружному тілі. При розповсюдженні пружних хвиль частинки середовища не переносяться, а лишень здійснюють коливання відносно точок рівноваги.

Залежно від напрямку коливання часток (коливальних рухів) у пружному тілі щодо напрямку розповсюдження хвилі виділяють такі типи акустичних хвиль:

1. Об'ємні хвилі: P – хвилі (поздовжні хвилі); S – поперечні хвилі (хвилі зсуву);

Acoustic non-destructive testing methods are divided into two subgroups: active and passive.

Active methods are based on emitting an acoustic signal (a probing pulse) into the object and analyzing the transmitted and/or reflected signal. A prime example of active acoustic testing is ultrasonic flaw detection.

Passive methods involve recording and analyzing signals generated by physical processes occurring within the object (for example, crack development under load). Passive methods are also referred to as acoustic emission methods.

Generation and propagation of acoustic (ultrasonic) waves

Acoustic (elastic) waves are mechanical disturbances (deformations) that propagate through an elastic body. During the propagation of elastic waves, the particles of the medium do not travel but merely oscillate relative to their equilibrium positions.

Depending on the direction of particle oscillations relative to the wave propagation direction, the following types of acoustic waves are distinguished:

1. Bulk waves: P – waves (primary or longitudinal waves); S – waves (secondary or shear waves);

2. Surface waves: L – waves (transverse waves, a type of shear

2. Поверхневі хвилі: L – хвилі (поперечні хвилі); R – хвилі або хвилі Релея (поверхневі еліптичні хвилі).

При генерації P – хвиль частинки коливаються в тому ж напрямку, що і хвиля, як показано на рис. 5.2. Така хвиля може бути збуджена в твердому тілі, рідині або газовому середовищі.

surface wave); R – wave or Rayleigh waves (surface elliptical waves).

While generating P – waves, the particles oscillate in the same direction as the wave propagation, as shown in Fig. 5.2. Such waves can be generated in solids, liquids, or gaseous media.

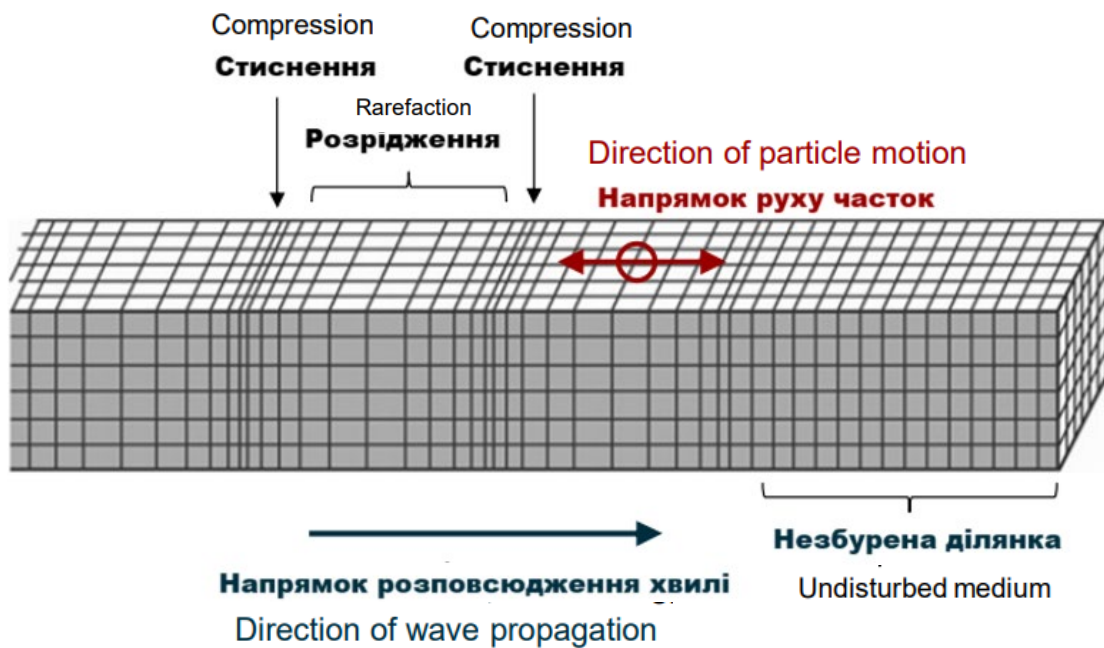
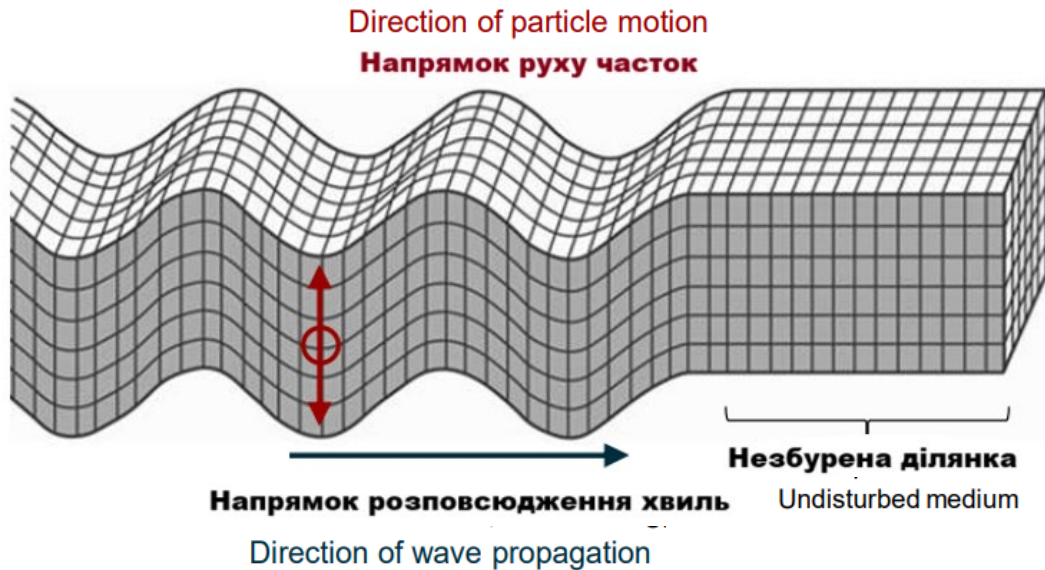


Рис. 5.2. Напрямок розповсюдження P – хвиль у твердому тілі / Direction of P – waves propagation in a solid body

При розповсюдженні S – хвиль частинки коливаються в напрямку, перпендикулярному напрямку поширення хвилі. Частинки коливаються вгору та вниз навколо своїх індивідуальних положень рівноваги (рис. 5.3). Така хвиля може бути збуджена лише у твердому тілі, що здатне пружно пручатися деформації зсуву.

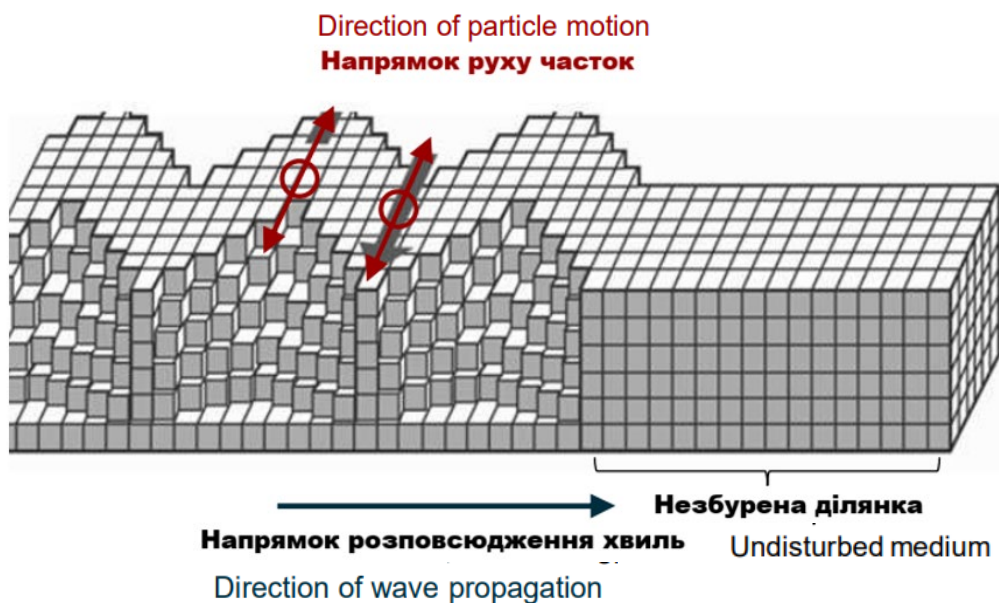
When S – waves propagate, the particles oscillate in a direction perpendicular to the direction of wave propagation. The particles move up and down around their individual equilibrium positions (Fig. 5.3). Such a wave can only be generated in a solid body capable of elastically resisting shear deformation.



**Рис. 5.3. Напрямок розповсюдження S – хвиль у твердому тілі /
Direction of propagation of S – waves in a solid**

На вільній поверхні твердого тіла можуть бути збуджені L – хвилі або R – хвилі, або хвилі Релея, частки у яких рухаються по еліптичній траєкторії. При проходженні L – хвилі, частинки коливаються в напрямку, перпендикулярному напрямку поширення хвилі (рис. 5.4).

On the free surface of a solid body, L – waves or R – waves (Rayleigh waves) can be generated, in which the particles move along an elliptical trajectory. When an L – wave passes, the particles oscillate in a direction perpendicular to the direction of wave propagation (Fig. 5.4).



**Рис. 5.4. Напрямок розповсюдження L – хвиль у твердому тілі /
Direction of propagation of L – waves in a solid body**

При наведенні R – хвиль у матеріалі, частинки поєднують як поздовжній, так і поперечний рух, створюючи еліптичні траєкторії (рис. 5.5).

When R – waves (Rayleigh waves) are induced in a material, the particles exhibit both longitudinal and transverse motion, creating elliptical trajectories (Fig. 5.5).

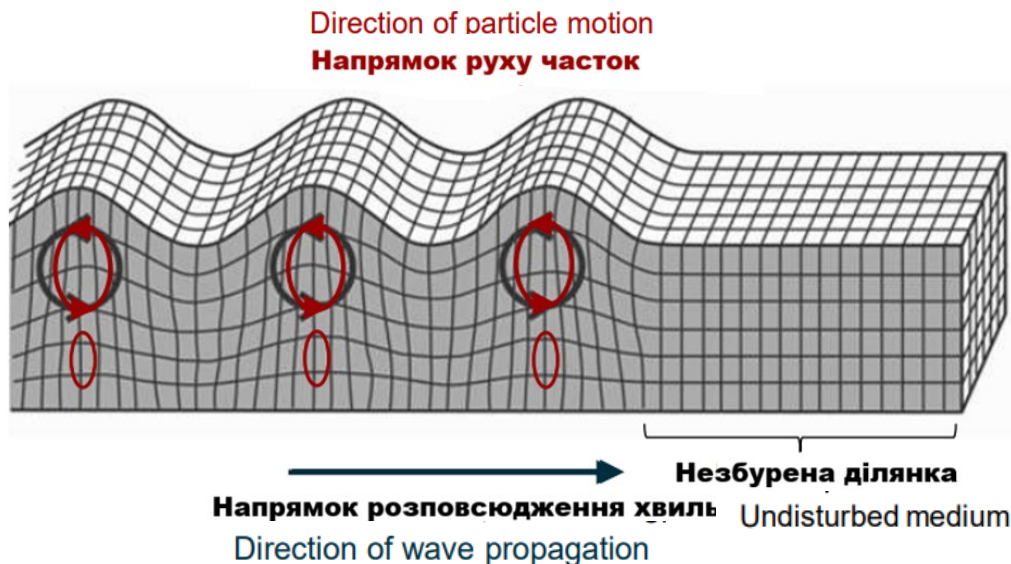


Рис. 5.5. Напрямок розповсюдження R – хвиль у твердому тілі / Direction of propagation of R waves in a solid

Основними властивостями плоских хвиль ізотропних твердих матеріалів є:

1. Довжина хвилі (λ) прямо пропорційна швидкості (V) хвилі та обернено пропорційна частоті (f) хвилі, що визначається як:

$$\text{Wavelength } (\lambda) = \frac{\text{Velocity } (v)}{\text{Frequency } (f)}.$$

2. Частота (f) обернено пропорційна періоду (T):

$$\text{Frequency } (f) = \frac{1}{\text{Period } (T)}.$$

Залежно від частоти генерованих хвиль всі основні види випробувань пружними хвилями можна представити у вигляді таблиці 5.1.

The main properties of plane waves in isotropic solid materials are:

– Wavelength (λ) is directly proportional to the wave velocity (V) and inversely proportional to the wave frequency (f), defined as:

2. Frequency (f) is inversely proportional to the period (T):

Depending on the frequency of the generated waves, all major types of elastic wave testing can be presented in the following table (Table 5.1).

Таблиця 5.1 – Методи випробування пружними хвилями
Table 5.1 – Elastic wave testing methods

№	Види випробувань / Types of tests	Групи методів / Method groups	Частота хвиль / Wave frequency	Область застосування / Scope
1.	Метод акустичного луна / Acoustic Echo Method	пасивні методи / Passive methods	20 Гц – 20 кГц / 20 Hz – 20 kHz	Використовуються для виявлення відшарування рядів кладки, визначення порожнеч і пошкоджених ділянок, кількісного визначення тріщин і кореляції швидкостей з механічними властивостями матеріалу / Used to detect delamination of masonry rows, identify voids and damaged areas, quantify cracks, and correlate velocities with the mechanical properties of the material
2.	Ультразвуковий контроль / Ultrasonic Pulse Velocity Tests	активні методи / Active methods	20 кГц – 150 кГц / 20 kHz – 150 kHz	
3.	Акустична томографія / Acoustic Tomography			

Метод акустичної луни (Sonic Echo Tests).

Метод акустичної луни - це неруйнівний метод оцінювання властивостей матеріалу, заснований на принципі поширення пружних хвиль усередину матеріалу. Метод отримав поширення для оцінки фізичних розмірів та цілісності сталевих виробів, бетону (наприклад, паль), кам'яної кладки, дерев'яних конструкцій тощо.

Обладнання для випробування включає в себе молоток, приймач (геофон/акселерометр), встановлений на вершині палі або на поверхні цегляної кладки, і систему збору даних (рис. 5.6).

Техніка контролю передбачає генерацію хвильової енергії за допомогою механічного впливу (удару молотком) по поверхні контролюваного виробу. Результуюча

Sonic Echo Test Method

The Sonic Echo method is a non-destructive testing technique used to assess material properties, based on the principle of elastic wave propagation into the material. This method is widely applied for evaluating the physical dimensions and integrity of steel components, concrete (such as piles), masonry, wooden structures, and more.

The testing equipment includes a hammer, a receiver (geophone/accelerometer) placed on top of the pile or on the surface of the masonry, and a data acquisition system (Fig. 5.6).

The testing technique involves generating wave energy by applying a mechanical impact (hammer strike) on the surface of the inspected element. The resulting

Обстеження, діагностика та впровадження ВІМ-технологій у будівництві

хвиля напруги стиснення поширюється крізь матеріал виробу, поки не досягне тильної сторони виробу.

compressive stress wave propagates through the material until it reaches the backside of the object.



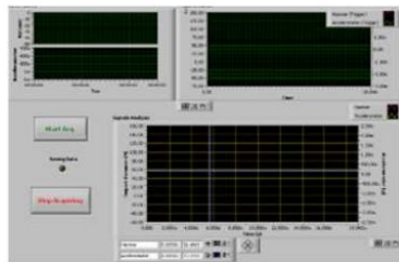
Інструментальний молоток /
Instrumented hammer



Приймаючий перетворювач /
Receiver transducer



Вимірювальний блок /
DAQ system



Аналітичний блок /
Acquisition test & Analysis

Рис. 5.6. Обладнання акустичного випробування будівельних конструкцій / Equipment for acoustic testing of building structures

Залежно від розміщення джерела акустичних хвиль (місця удару молотка) і перетворювача-приймача розрізняють такі методи акустичного контролю (рис. 5.7):

1. Прямий метод.
2. Напівпрямий метод.
3. Непрямий метод.

Depending on the placement of the acoustic wave source (hammer strike location) and the receiving transducer, the following acoustic testing methods are distinguished:

1. Direct method.
2. Semi-direct method.
3. Indirect method.

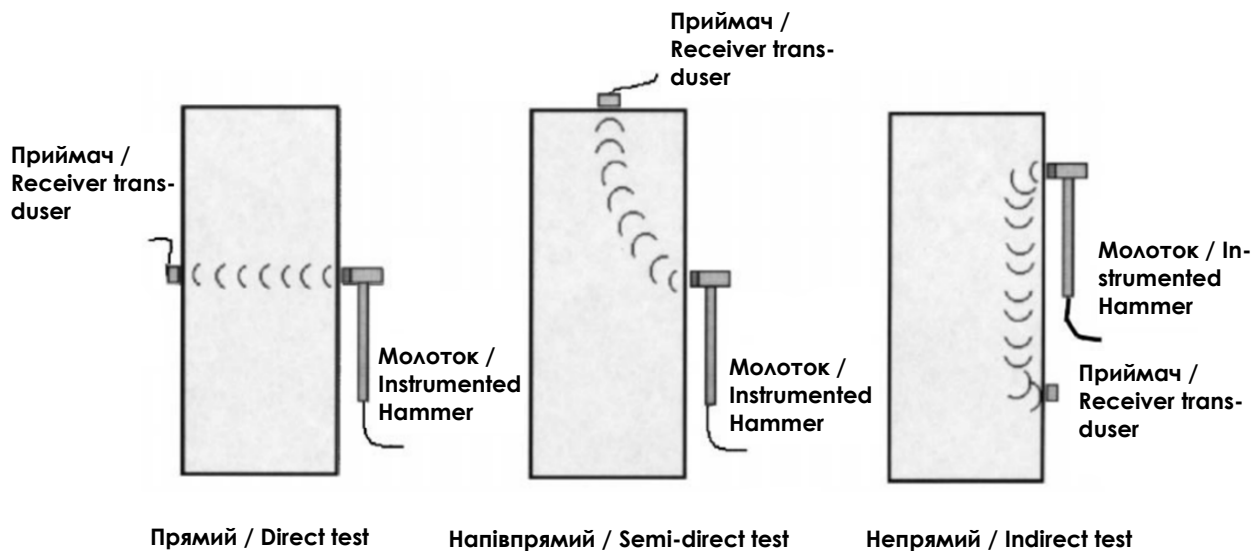


Рис. 5.7. Класифікація методів акустичного контролю якості / Classification of acoustic quality control methods

Методи, засновані на вимірюванні швидкості та часі розповсюдження еластичних хвиль, створених короточасним точковим ударом, для проходження між молотком і приймачем, розташованим на відомій відстані один проти одного (рис. 5.8).

The methods are based on measuring the velocity and travel time of elastic waves generated by a short-duration point impact, as they propagate between the hammer and the receiver, which are positioned at a known distance from each other (Fig. 5.8).

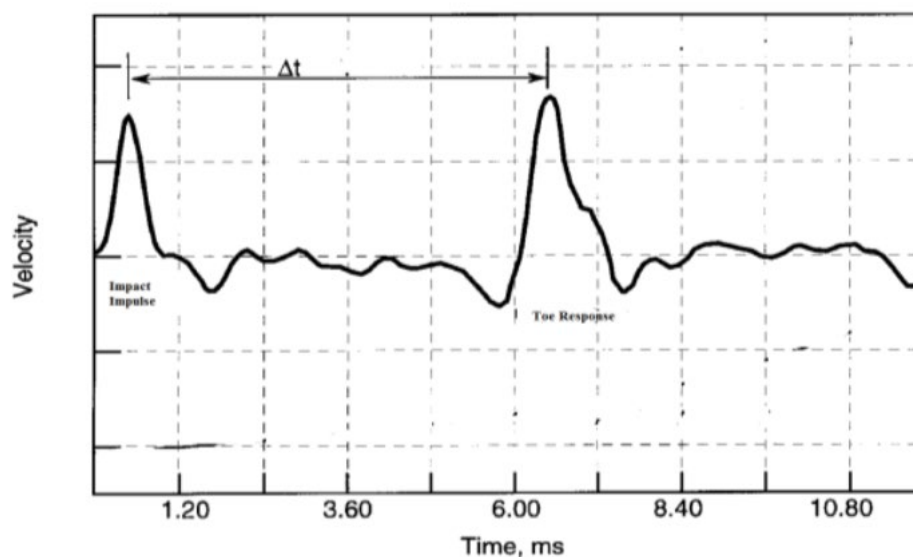


Рис. 5.8. Визначення залежності часу розповсюдження хвилі від її швидкості / Determination of the dependence of the wave propagation time on its velocity

Швидкість проходження акустичних хвиль розраховується як:

$$V_p = \frac{L}{t}.$$

Швидкість механічних хвиль може бути пов'язаною із властивостями матеріалу виробу, що контролюється такими залежностями:

1. Для 1D – тіла:

$$V_p = \sqrt{\frac{1}{\rho}}.$$

2. Для 2D – тіла:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{(1-\nu^2)}}.$$

3. Для 3D – тіла:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}.$$

де E – модуль Юнга;

ρ – щільність матеріалу виробу;

ν – коефіцієнт Пуассона.

Як видно із рис. 5.8, *прямий метод акустичного контролю* може бути використаний за умови двостороннього доступу до виробу, що досліджується (контроль кам'яної кладки стін, простінків, контроль залізобетонних балок, колон тощо). За таких умов реалізації методу у виріб наводяться повздовжні P – хвилі (рис. 5.9).

The velocity of acoustic wave propagation is calculated as:

The velocity of mechanical waves can be related to the material properties of the tested object by the following relationships:

1. For a 1D body:

2. For a 2D body:

3. For a 3D body:

where E – Young's modulus;

ρ – the density of the product material;

ν – Poisson's ratio.

As shown in the Fig 5.8, the *direct acoustic testing method* can be used when there is double-sided access to the object under investigation (e.g., inspection of masonry walls, piers, reinforced concrete beams, columns, etc.). Under such conditions, longitudinal P – waves are introduced into the material (Fig. 5.9).

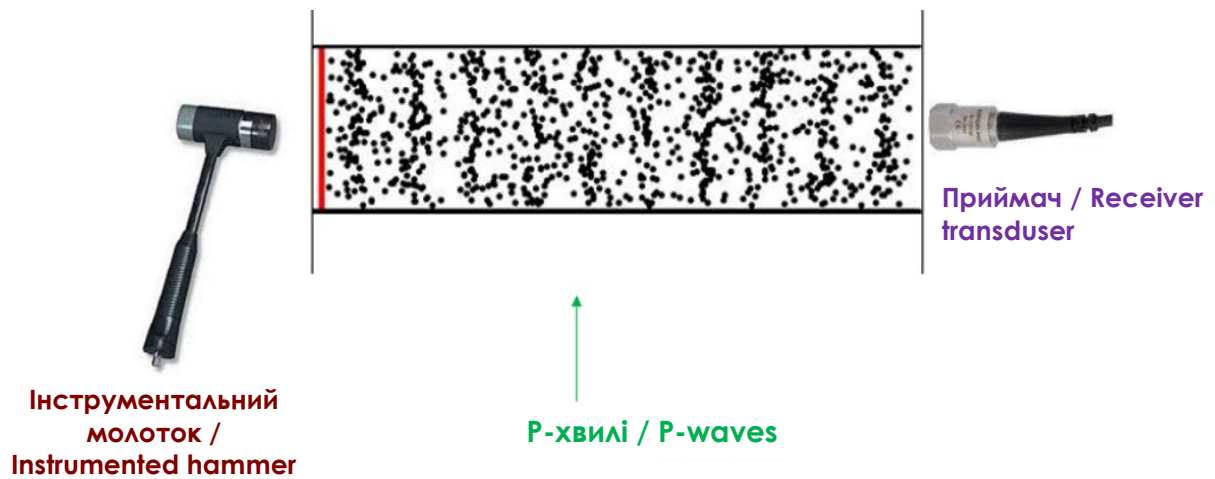


Рис. 5.9. Схематичне зображення прямого методу акустичного контролю / Schematic representation of the direct acoustic control method

За умов, коли двосторонній доступ до виробу неможливий або обмежений використовують напівпрямий метод акустичного контролю, що полягає в перпендикулярному розміщенні джерела пружних хвиль та ресиверу (акселерометру). При такій реалізації методу в товщі контрольованого виробу генеруються поперечні S – хвилі (рис. 5.10).

When two-sided access to the object is impossible or limited, the *semi-direct acoustic testing method* is used. This method involves the perpendicular placement of the elastic wave source and the receiver (accelerometer). In this configuration, transverse S – waves are generated within the thickness of the inspected object (Fig. 5.10).

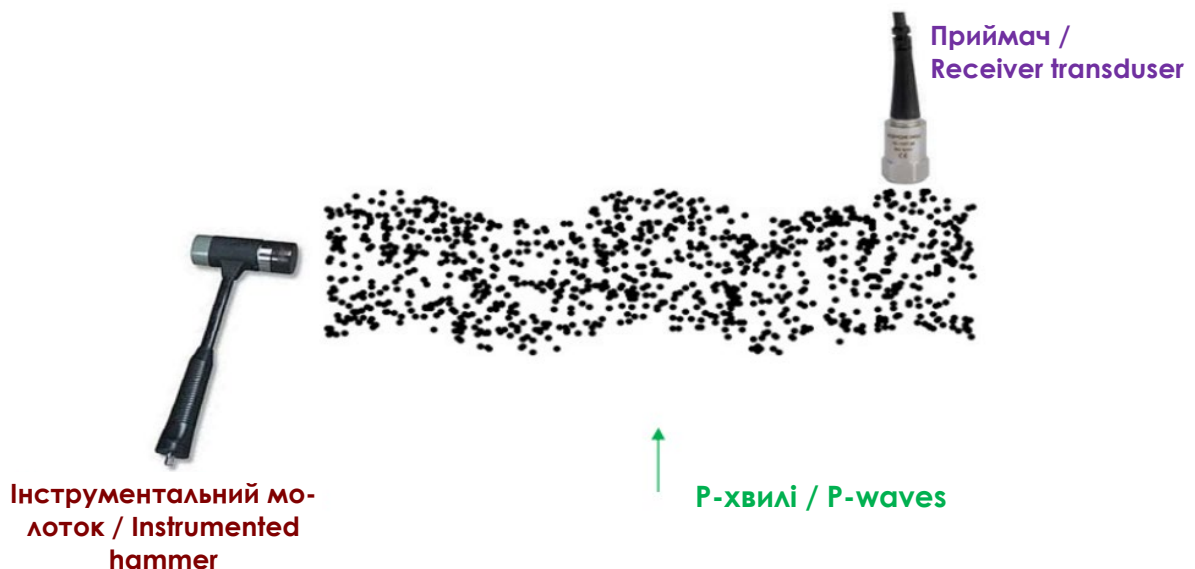


Рис. 5.10. Схематичне зображення напівпрямого методу акустичного контролю / Schematic representation of the semi-direct acoustic control method

Непрямий метод набув широкого поширення для контролю фундаментів, плит перекриття, елементів кам'яної кладки в умовах відсутності двостороннього доступу до контрольованого об'єкта. За таких умов джерело механічних коливань (молоток) та ресивер розміщуються в одній площині на одній поверхні виробу, що сприяє ініціалізації R – хвилі або хвиль Релея (рис. 5.11).

The *indirect method* has become widely used for inspecting foundations, floor slabs, and masonry elements in situations where two-sided access to the object is not available. In this method, the mechanical vibration source (hammer) and the receiver are placed on the same plane on a single surface of the object, which facilitates the initiation of R – waves or Rayleigh waves (Fig. 5.11).

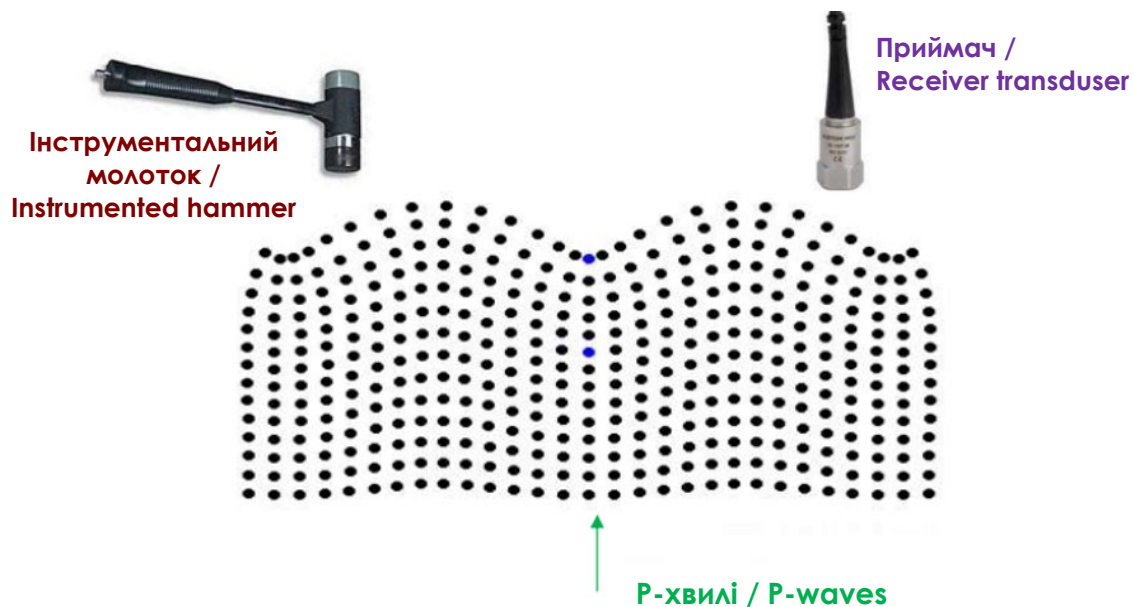


Рис. 5.11. Схематичне зображення непрямого методу акустичного контролю / Schematic representation of the indirect acoustic control method

Ультразвуковий контроль (Ultrasonic Pulse Velocity Tests)

Для збудження пружних коливань у різних матеріалах можуть бути використані перетворювачі: п'єзоелектричні, магнітострикційні, електромагнітно-акустичні (ЕМА) тощо. Найбільшого поширення отримали п'єзоелектричні перетворювачі, що являють собою пластину, виготовлену з монокристала

Ultrasonic Pulse Velocity Tests (UPVT)

To generate elastic vibrations in various materials, different types of transducers can be used, such as piezoelectric, magnetostrictive, and electromagnetic-acoustic (EMA) transducers.

Among these, piezoelectric transducers are the most widely used. They consist of a plate made

кварцу або п'єзокерамічних матеріалів, титанату барію, цирконат-титанат свинцю. На поверхню таких пластин наносять тонкі шари срібла, що слугують електродами, їх поляризують у постійному електричному полі.

У результаті керамічні пластини набувають п'єзоелектричних властивостей. При прикладанні до електродів змінної напруги п'єзоелемент починає здійснювати вимушені механічні коливання з частотою електричної напруги.

Амплітуда коливання пластини залежить від напруги на електродах і співвідношення частоти змінної напруги і власної частоти коливання пластини. Власна частота коливання пластини залежить від її товщини і швидкості пружних хвиль наступним співвідношенням: $f = C/2b$.

Якщо п'єзопластину прикласти до поверхні деталі, що контролюється, то в її матеріалі будуть збуджуватись та розповсюджуватись пружні хвилі. Залежно від режиму роботи генератора змінної електричної напруги їх можна випромінювати безперервно або у формі імпульсів. Розповсюдження високочастотних пружних хвиль відбувається за аналогією до законів геометричної оптики.

Проводячи випробування в різних точках конструкції, оцінюється якість та однорідність бетону. Локально збільшений час проходження передавального імпульсу (T) є показником втрати міцності,

of quartz single crystal or piezo ceramic materials such as barium titanate or lead zirconate-titanate. Thin silver layers are applied to the surface of these plates to serve as electrodes, and the plates are polarized in a constant electric field.

As a result, the ceramic plates acquire piezoelectric properties. When alternating voltage is applied to the electrodes, the piezoelectric element begins to perform forced mechanical oscillations at the frequency of the applied voltage.

The amplitude of the plate's oscillations depends on the voltage applied to the electrodes and the relationship between the frequency of the alternating voltage and the natural frequency of the plate's oscillations. The natural frequency of the plate's oscillations depends on its thickness and the velocity of elastic waves, following the relation: $f = C/2b$.

When a piezoelectric plate is applied to the surface of the object under inspection, elastic waves are generated and propagate through the material. Depending on the operating mode of the alternating voltage generator, they can emit continuously or in the form of pulses.

The propagation of high-frequency elastic waves occurs analogously to the laws of geometric optics. By conducting tests at various points of the structure, the quality and uniformity of the concrete are evaluated. A locally increased time

можливо, через низьку жорсткість матеріалу, розтріскування, стільникову структуру, порожнечи, замерзлий бетон, розшарування та інші неоднорідні ділянки, такі як ті, що виникають у результаті різних деградуючих механічних, хімічних та термічних навантажень.

УЗ імпульс може дифрагувати через розриви арматури, тим самим збільшуючи як час його проходження, так і довжину шляху (L). Оцінити однорідність бетонної конструкції, у такому випадку, можна за сіткою вимірювань, шляхом поступового переміщення перетворювачів по поверхнях об'єкту досліджень, як показано на рис. 5.12.

of transmitted pulse passage (T) indicates a loss of strength, possibly due to low material stiffness, cracking, cellular structure, voids, frozen concrete, delamination, and other heterogeneous areas resulting from various degrading mechanical, chemical, and thermal loads.

An ultrasonic pulse may diffract through breaks in the reinforcement, thereby increasing both the pulse propagation time and the path length (L). In such cases, the homogeneity of the concrete structure can be assessed using a measurement grid by gradually moving the transducers along the surfaces of the object under inspection, as shown in Fig. 5.12.

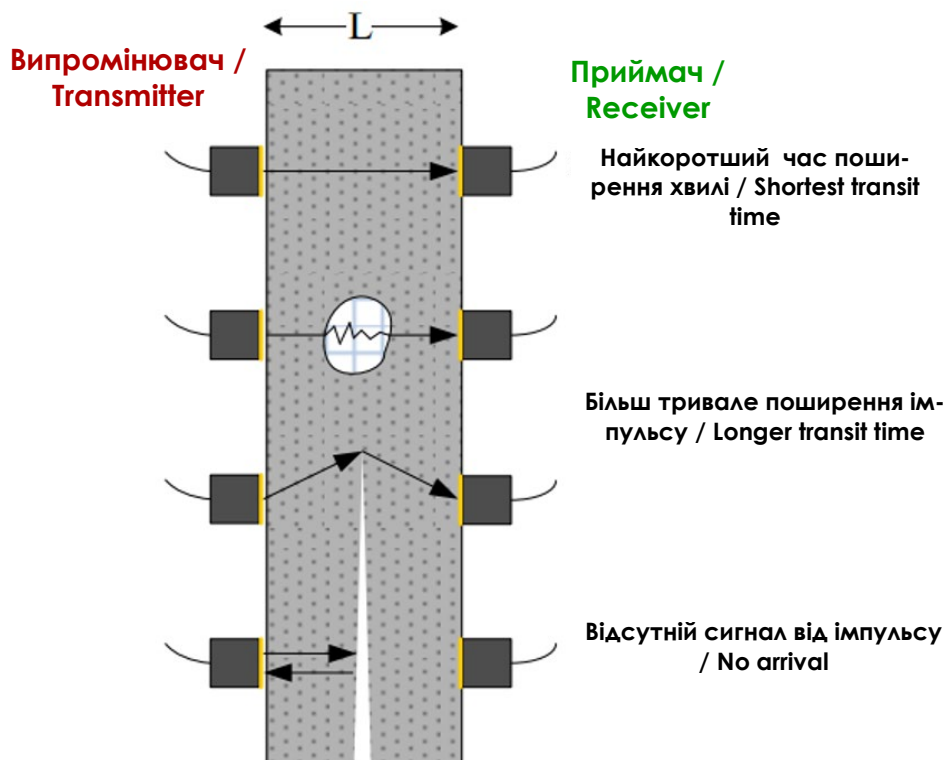


Рис. 5.12. Дослідження однорідності бетону ультразвуковою діагностикою / Study of concrete homogeneity by ultrasonic diagnostics

Таким чином, у конструкції локалізуються найбільш підозрілі (дефектні) ділянки, що дозволяє оператору сконцентруватися саме на них.

До переваг методу УЗ контролю слід віднести:

1. Висока чутливість до виявлення дрібних дефектів.
2. Велика проникна здатність.
3. Можливість точного виявлення місця розташування дефекту і його розмірів.
4. Можливість контролю при односторонньому доступі до об'єкта дослідження.

Однак, хоча УЗ метод може бути успішно використаний переважно для виявлення дефектів у бетоні, він не може визначити їхню природу.

Класифікація і характеристика ультразвукових методів контролю.

Залежно від кількості енергії, що поширюється від передавача до приймача, існують три основні типи розташування перетворювачів і, відповідно, методів УЗ контролю. Максимальна енергія поширюється шляхом розміщення перетворювачів на протилежних сторонах (*прямий метод*) у бетонній конструкції, що досліджується (рис. 5.13, а). У випадках, коли дві протилежні сторони недоступні, перетворювачі розміщуються або на сусідніх поверхнях (*напівпрямий метод*) (рис. 5.13, б), або на одній поверхні виробу (*непрямий метод*) (рис. 5.13, в).

Thus, the most suspicious (defective) areas of the structure are localized, allowing the operator to focus specifically on them.

Advantages of the ultrasonic testing method include:

1. High sensitivity to detecting small defects;
2. Great penetration depth;
3. Ability to accurately locate defects and measure their size;
4. Capability to inspect with access from only one side of the object.

However, while the UPV method is predominantly successful in detecting defects in concrete, it cannot determine their nature.

Classification and Characteristics of UPV Methods. Depending on the amount of energy transmitted from the transmitter to the receiver, there are three main types of transducer arrangements and, accordingly, UPV testing methods.

The maximum energy is transmitted when transducers are placed on opposite sides of the concrete structure under inspection (direct method) – Fig. 5.13, a. When opposite sides are inaccessible, the transducers are placed either on adjacent surfaces (semi-direct method) – Fig. 5.13, b, or on the same surface of the object (indirect method) – Fig. 5.13, c.

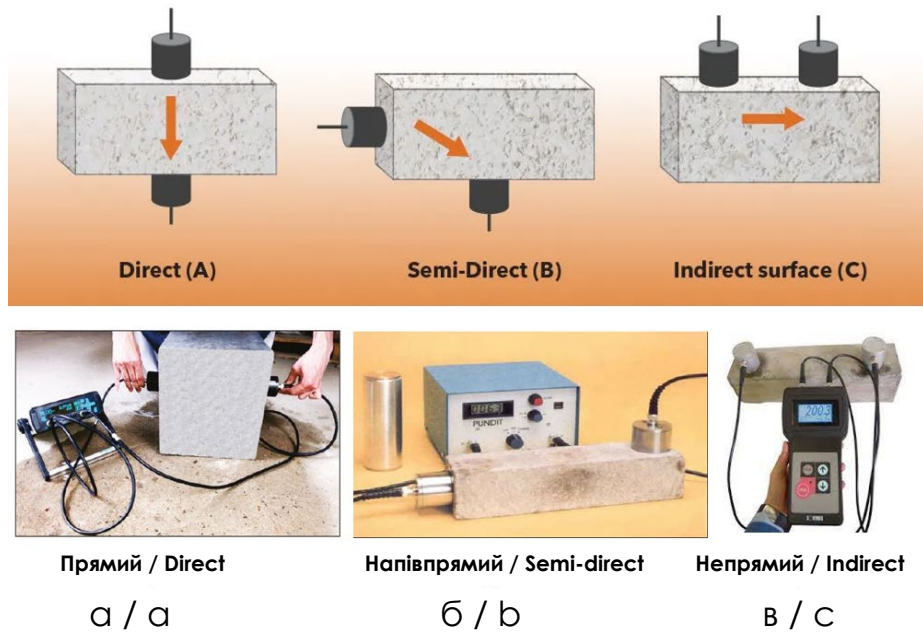


Рис. 5.13. Класифікація способів ультразвукового контролю бетону / Classification of ultrasonic concrete testing methods

Прямий метод забезпечує найбільшу чутливість, а отже, і найбільшу точність методу. З метою визначення якості бетону, використання прямого методу є найкращим варіантом, оскільки він забезпечує чітко визначений шлях, який можна легко виміряти. Для прямого методу вимірювана довжина шляху L – це відстань між перетворювачами.

Результати вимірювань, отримані напівпрямим методом, можуть бути задовільними лише тоді, коли кут між двома перетворювачами та, відповідно, довжина шляху імпульсу не надто великі. Під час виконання цього методу важливо кваліфікувати попередні вимоги, щоб отримати найкращі результати. Інакше є велика ймовірність того, що сигнали не будуть чіткими через ослаблення переданого імпульсу. Довжина пройде-

The *direct method* provides the highest sensitivity and, hence, the greatest accuracy. For assessing concrete quality, the direct method is the best choice because it ensures a clearly defined path that can be easily measured. In the direct method, the measured path length L is the distance between the transducers.

Results obtained using the *semi-direct method* may be satisfactory only when the angle between the two transducers and the path length is not too large. It is important to follow preparatory procedures carefully to obtain the best results. Otherwise, there is a high likelihood that the signals will be unclear due to attenuation of the transmitted pulse. The pulse path length in this method is not as clearly defined as in the direct method and can be

ного імпульсом шляху в цьому методі не чітко визначена, як у методі прямої передачі, і може бути виміряна як відстань від центру до центру граней перетворювачів.

Найменш чутливим є *непрямий* метод, оскільки амплітуда прийнятого сигналу може бути меншою за 3 % порівняно з прийнятим сигналом прямої передачі. Сигнал імпульсу на приймачі, в цьому випадку, дуже схильний до помилок, оскільки він здебільшого залежить від поширення імпульсу.

Обладнання УЗ контролю та технічні вимоги до нього. Обладнання, що входить до комплексу УЗ дефектоскопу складається із двох перетворювачів (передавача і приймача) та вимірювально-індикаторного блока, до складу якого входять генератор імпульсів, підсилювач сигналів, вимірювальне коло й дисплей. Схематичне зображення і загальний вигляд УЗ дефектоскопу наведено на рис. 5.14.

measured as the distance from center to center of the transducer faces.

The least sensitive is the *indirect method*, since the amplitude of the received signal may be less than 3% of that received in the direct transmission. The pulse signal at the receiver in this case is highly prone to errors, as it mostly depends on the propagation path.

Equipment and Technical Requirements for UPVT. The ultrasonic flaw detector set is made up of two transducers (transmitter and receiver) and a measuring-indicator circuit, which includes a pulse generator, signal amplifier, measuring circuit, and display. A schematic and general view of the UPVT flaw detector is shown in Fig. 5.14.

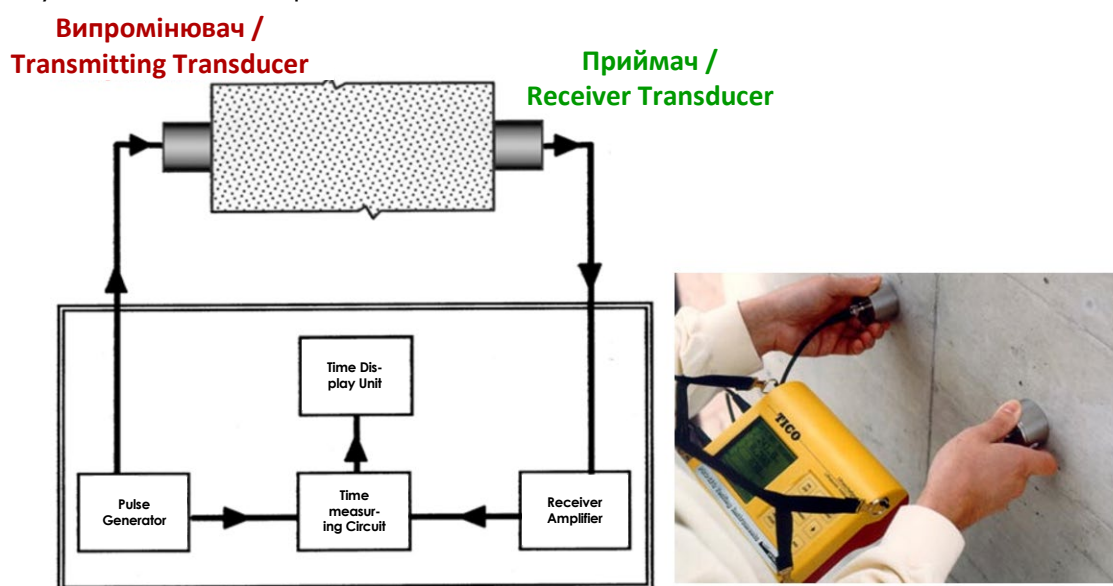


Рис. 5.14. Схематичне зображення і загальний вигляд УЗ дефектоскопу / Schematic image and general view of the ultrasonic flaw detector

У сучасних УЗ дефектоскопах застосовують такі три типи акустичних головок (перетворювачів): 1 – прямого типу; 2 – похилого типу або призматичні; 3 – роздільно-суміщені (рис. 5.15).

Пристрій прямого прозвучування з пласкою контактною поверхнею зображено на рис. 5.15, а. Цей щуп розрахований на збудження у виробі, що контролюється, повздовжніх хвиль і призначений для виявлення глибинних дефектів. Конструкцією щупа передбачено демпфування вільних коливань п'єзoeлементa.

Modern UPVT flaw detectors use the following three types of acoustic probes (*transducers*): 1 – straight; 2 – angled or wedge (prismatic); 3 – dual-element (Fig. 5.15).

The *straight transducer* with a flat contact surface is shown in Fig. 5.15, a. This transducer is designed to generate longitudinal waves in the test object and is used to detect deep-seated defects. The design includes damping of the piezo-element's free oscillations.

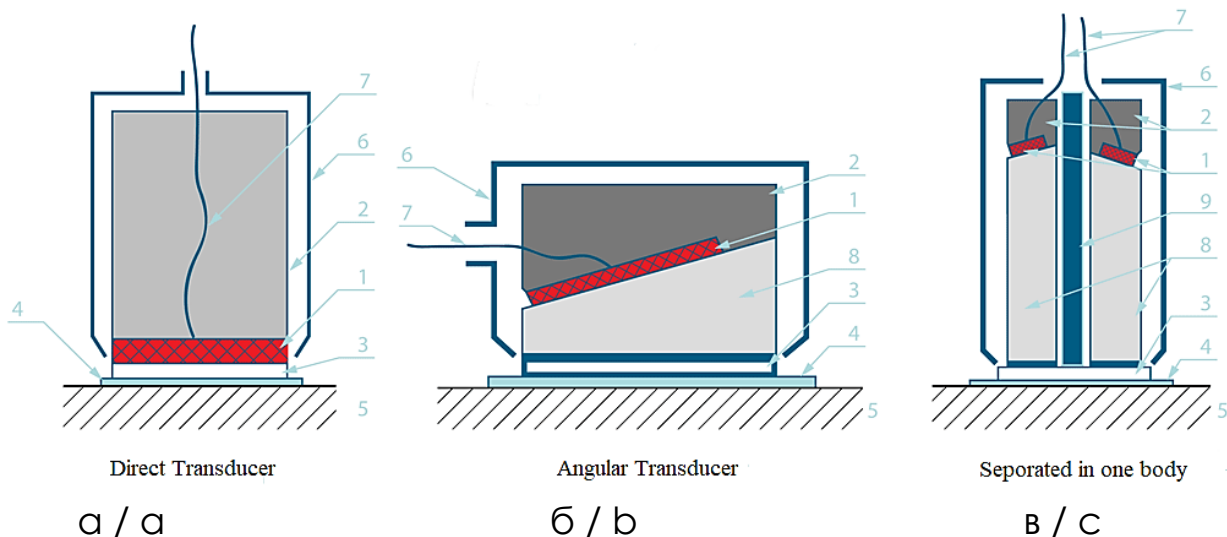


Рис. 5.15. Схема УЗ перетворювачів прямого типу (а), похилого типу (б), роздільно-суміщених (в):

1 – п'єзoeлемент; 2 – демпфер; 3 – захисне дно; 4 – шар мастила (для акустичного контакту); 5 – контрольований виріб; 6 – корпус; 7 – струмопідвід; 8 – призма; 9 – екран /

Scheme of ultrasonic transducers of direct type (a), inclined type (b), separate-combined (c):

1 – piezoelectric element; 2 – damper; 3 – protective bottom; 4 – layer of lubricant (for acoustic contact); 5 – controlled product; 6 – housing; 7 – power supply; 8 – prism; 9 – screen

Пристрій похилого (призматичного) перетворювача із пласкою контактною поверхнею наведено на рис. 5.15, б. Такий щуп розрахований на збудження, залежно від цілей контролю, нормальних хвиль і хвиль зсуву, що поширюються в виробі під різними кутами.

Призму щупа зазвичай виконують із органічного скла або плексигласу. П'єзоелемент розташовують на площадку, орієнтовану у відповідності до вибраного кута падіння.

На рис. 5.15, в наведено зображення роздільно-суміщеного щупа. Ця головка виконана у вигляді цільного, нерозбірного блока. Призми виготовляють із органічного скла із заданим кутом нахилу від якого буде залежати мінімальна і максимальна глибина прозвучування.

Основними характеристиками акустичних приладів є чутливість, максимальна глибина прозвучування, спосіб індикації дефектів, система селекції, роздільна здатність.

Чутливість УЗ дефектоскопу повинна бути достатньою для проведення контрольних операцій, що передбачені технічними умовами. Чутливість приладу визначається частотою пружних коливань, амплітудою електричного імпульсу, що збуджує п'єзоелемент і коефіцієнтом посилення. У більшості випадків промислового застосування УЗ діагностики виробів із різnorідних матеріалів, достатнім є використання імпульсів на частотах 1...75 кГц та 0,5...5,0 МГц.

The angled (wedge) transducer with a flat contact surface is shown in Fig. 5.15, b. Depending on the inspection goals, it is designed to generate normal or shear waves that propagate in the object at various angles. The wedge is usually made of organic glass or Plexiglas. The piezo-element is placed on a platform oriented according to the selected incident angle.

Fig. 5.15, c shows a dual-element transducer. This head is built as a solid, non-dismountable block. The wedges are made from organic glass with a specified angle, which determines the minimum and maximum testing depth.

Key Characteristics of Acoustic Devices Include: sensitivity; maximum testing depth; defect indication method; signal selection system; resolution.

The UPVT's flaw detector *sensitivity* must be sufficient for the inspection operations specified by technical regulations. Sensitivity is determined by the frequency of elastic oscillations, amplitude of the electric pulse exciting the piezoelement, and the amplification factor. In most industrial applications involving heterogeneous materials, frequencies of 1...75 kHz and 0.5...5.0 MHz are adequate.

The *maximum testing depth* is the maximum distance at which the device can detect a signal reflected

Максимальна глибина прозвучування – це максимальна відстань, на якій прилад здатний зафіксувати сигнал відбитий від тильної сторони поверхні виробу т. з. донний імпульс (притаманний для металів), або сигнал від випромінювача, що пройшов крізь товщу виробу.

Індикація дефектів здійснюється здебільшого за допомогою індикатору – приладу, що перетворює електричні імпульси в видимі зображення або сигнали, які можна почути. За допомогою індикатору оцінюють розміри дефекту і визначають його координати.

Нині є такі способи індикації: осцилографічні, звукові, світлові і стрілочні. Застосування того чи іншого способу індикації визначається умовами і задачами контролю.

Система селекції сигналів. Під час дефектоскопії індикатори можуть фіксувати відображення пружних хвиль не тільки від дефектів, а й від границь самого виробу, структурних неоднорідностей, що не є дефектами. При цьому, зафіксовані хибні сигнали можуть бути співмірні із сигналами, отриманими від дефектів.

Селективність контролю акустичним детектором досягається за рахунок застосування пошарового методу контролю виробу при якій передбачена амплітудна селекція, тобто, обмеження сигналу по мінімуму.

from the back side of the object (bottom echo for metals) or a signal transmitted through the object's thickness.

Defect indication is typically performed using an indicator – a device that converts electrical impulses into visible images or audible signals. The indicator helps evaluate defect size and determine its location. Currently, the following types of indication are used: oscillographic, acoustic, visual (light), and analog pointer. The choice depends on the inspection conditions and objectives.

Signal Selection System. During inspection, indicators may register reflections not only from defects but also from boundaries or structural heterogeneities that are not defects. In such cases, false signals may be comparable to defect signals.

Selectivity of the acoustic detector is achieved by applying a layer-by-layer inspection method, which includes amplitude selection i.e., setting a minimum threshold for signal registration.

5.2.2. Магнітні методи контролю будівельних конструкцій

Магнітні методи контролю є одним із ключових засобів неруйнівного технічного обстеження будівель і споруд, зокрема залізобетонних конструкцій. Їх застосування дозволяє без розкриття конструкцій отримати інформацію про розташування, діаметр та стан арматурних стержнів, визначити товщину захисного шару бетону, виявити корозійні пошкодження та можливі приховані дефекти.

Ці методи особливо важливі в умовах, коли: необхідно виконати технічну оцінку несучої здатності конструкцій; будівля експлуатується в агресивному середовищі; планується реконструкція чи капітальний ремонт; потрібно контролювати відповідність проєктній документації на стадії будівництва.

Основною перевагою магнітних методів є відсутність руйнування елементів конструкції, що дозволяє проводити обстеження без зупинки експлуатації об'єкта та без пошкодження його оздоблення. Висока точність визначення параметрів арматури забезпечує надійність отриманих результатів та дає змогу ухвалювати обґрунтовані проєктні рішення для подальшого ремонту чи підсилення споруди.

5.2.2. Magnetic Methods Tests

Magnetic testing methods are one of the key tools for non-destructive technical inspection of buildings and structures, particularly reinforced concrete constructions. Their use makes it possible to obtain information about the location, diameter, and condition of reinforcement bars, determine the thickness of the concrete cover layer, detect corrosion damage, and identify potential hidden defects without opening up the structure.

These methods are especially important when: a technical assessment of the load-bearing capacity of structures is required; the building is operated in an aggressive environment; reconstruction or major repairs are planned; or compliance with design documentation needs to be monitored during the construction phase.

The main advantage of magnetic methods is the absence of damage to structural elements, allowing inspections to be carried out without interrupting the building's operation or damaging its finishes. The high accuracy in determining reinforcement parameters ensures the reliability of the results and allows for well-informed design decisions regarding future repairs or reinforcement of the structure.

В обстеженні пам'яток архітектури та історичних будівель магнітні методи контролю мають особливе значення. Такі споруди часто мають обмежену доступність конструкційних елементів, а будь-яке втручання може завдати неоправданної шкоди їхній історико-культурній цінності. Нерідко під час реставраційних робіт виникає необхідність визначити наявність і стан арматурних сіток або стержнів, особливо в конструкціях, що зазнавали численних переробок або посилення у XX столітті.

Застосування магнітних методів у таких випадках дозволяє: зберегти автентичність конструкції, оскільки обстеження проводиться без розтину чи механічного втручання; отримати достовірну інформацію про стан прихованих елементів, які візуально недоступні; знизити ризики аварійних ситуацій під час проведення ремонтно-реставраційних робіт; задокументувати конструктивні особливості споруди для формування її технічного паспорта чи реставраційного проекту.

Особливо цінні такі методи для об'єктів, що мають підземні частини, залишки старих підвалів чи укріплень, де використання інших методів є ускладненим або неможливим.

Magnetic testing methods are of particular importance in the inspection of architectural monuments and historic buildings. Such structures often have limited accessibility to structural elements, and any intervention can cause irreparable harm to their historical and cultural value. During restoration works, there is often a need to determine the presence and condition of reinforcement meshes or bars, especially in structures that underwent multiple modifications or reinforcements during the 20th century.

The use of magnetic methods in such cases makes it possible to:

- Preserve the authenticity of the structure, as the inspection is performed without opening or mechanical interference;
- Obtain reliable information about the condition of hidden elements that are not visually accessible;
- Reduce the risk of emergency situations during repair and restoration work;
- Document the structural features of the building for the development of its technical passport or restoration project.

These methods are especially valuable for structures with underground parts, remnants of old basements, or fortifications, where the use of other techniques is difficult or impossible.

Магнітні методи контролю будівельних конструкцій застосовуються для неперервного, безконтактного й не руйнівного дослідження властивостей та стану армування в залізобетоні. Магнітний метод заснований на взаємодії магнітного або електромагнітного поля приладу зі сталевую арматурою залізобетонної конструкції.

Для визначення товщини захисного шару бетону й розташування сталеві арматури в залізобетонній конструкції застосовують магнітні, електромагнітні або вихреструменеві прилади, які містять у собі вимірювальний блок, вимірювальний перетворювач і блок живлення.

Кількість і розташування ділянок конструкції, що контролюються, призначають залежно від:

- мети і умов випробувань;
- особливостей проєктного рішення конструкції;
- технології виготовлення або зведення конструкції з урахуванням фіксації арматурних стержнів;
- умов експлуатації конструкції з урахуванням агресивності зовнішнього середовища.

Визначення товщини захисного шару бетону в збірних і монолітних залізобетонних конструкціях можна визначати за допомогою магнітних приладів, принцип дії яких засновано на вимірюванні магнітного поля двох паралельно розмі-

Magnetic testing methods for building structures are used for continuous, contactless, and non-destructive examination of the properties and condition of reinforcement in reinforced concrete. The magnetic method is based on the interaction of the magnetic or electromagnetic field of the device with the steel reinforcement of the reinforced concrete structure.

To determine the thickness of the concrete cover and the location of steel reinforcement in a reinforced concrete structure, magnetic, electromagnetic, or eddy current devices are used. These typically include a measurement unit, a transducer, and a power supply unit.

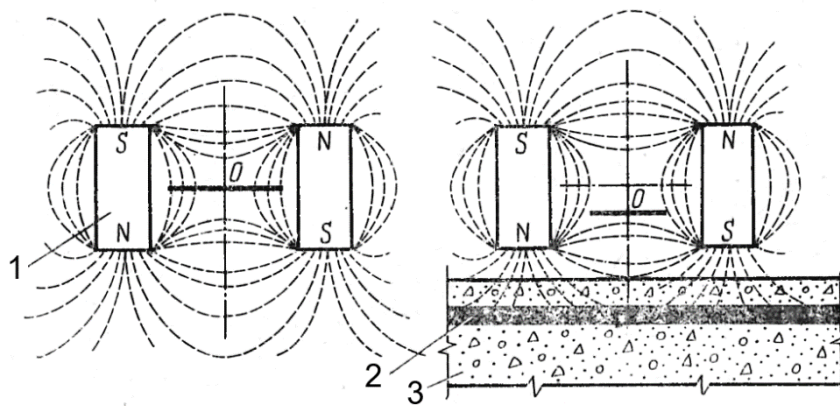
The number and location of the structure's sections to be inspected are determined based on:

- The purpose and conditions of the testing;
- The design characteristics of the structure;
- The construction or manufacturing technology used, considering the positioning of reinforcement bars;
- The operating conditions of the structure, taking into account the aggressiveness of the surrounding environment.

The thickness of the concrete cover in both precast and monolithic reinforced concrete structures can be determined using magnetic devices. The principle of operation is based on measuring the magnetic field generated by two prism-

щених магнітів призматичної форми при наближенні до арматури випробувального зразка. Схема магнітного поля таких приладів наведена на рис. 5.16, а.

shaped magnets arranged in parallel when approaching the reinforcement in the test sample. A diagram of the magnetic field generated by such devices is shown in Fig. 5.16, a.



а / a



б / b

**Рис. 5.16. Схема магнітного поля приладу (а),
прилад арматуроскоп NOVOTEST (б):**

1 – магніт; 2 – арматура; 3 – залізобетонний виріб /

Magnetic field diagram of the device (a), NOVOTEST rebar scope device (b):

1 – magnet; 2 – reinforcement; 3 – reinforced concrete product

Етапи виконання магнітного контролю такі:

1. Підготовка до роботи: вибір приладу (магнітометр, профілограф, ферроскоп); калібрування обладнання на еталонних зразках; визначення параметрів випробування (глибина сканування, точність).

2. Формування магнітного поля: використовується постійний магніт або електромагніт, магнітне поле проникає всередину конструкції, намагнічуючи металеві включення (арматуру).

3. Реєстрація магнітного сигналу: вторинне магнітне поле, створене арматурою, фіксується датчиком (зазвичай це магнітометр);

The Stages of Magnetic Tests:

1. Preparation: Selection of the device (magnetometer, profilograph, ferroscope); calibration of equipment using reference samples; determination of testing parameters (scanning depth, accuracy).

2. Magnetic Field Generation: A permanent magnet or electromagnet is used; the magnetic field penetrates the structure, magnetizing the metallic inclusions (reinforcement).

3. Magnetic Signal Detection: A sensor (typically a magnetometer) detects the secondary magnetic field generated by the reinforcement; the device records changes

прилад реєструє зміну магнітної індукції по поверхні конструкції.

4. Обробка та аналіз результатів: будується графік зміни напруженості магнітного поля по площині конструкції; за піками визначають місцезнаходження арматури, глибину та можливі дефекти; за допомогою калібрувальних таблиць – обчислюють діаметр стрижнів.

Сучасні магнітні дефектоскопи та сканери можуть передавати дані в цифровий вигляд, інтегрувати їх у BIM-модель або GIS-систему для подальшого збереження та аналізу.

Після проведення магнітного контролю (сканування поверхні конструкції) отримані дані зберігаються у вигляді: таблиць координат точок виявлення арматури; графіків розподілу напруженості магнітного поля; цифрових карт виявлених аномалій; значень глибини залягання та діаметра арматури.

Ці дані експортуються у форматі: CSV, XLS – для табличних даних; DXF, DWG, IFC – для креслень та 2D/3D-даних; PDF – для звітів.

Далі ці дані інтегруються у BIM-модель за допомогою: плагінів до Autodesk Revit, Tekla Structures, ArchiCAD або через формати обміну IFC, DXF.

Наприклад: позиції арматури вносяться у 3D-модель конструкції як об'єкти арматури з вказаними

in magnetic induction across the surface of the structure.

4. Data Processing and Analysis: A graph of magnetic field intensity across the structure's surface is generated; peaks indicate the location of reinforcement bars, their depth, and possible defects; using calibration tables, the diameter of the bars is calculated.

Modern magnetic flaw detectors and scanners can convert data into digital form, integrating it into BIM models or GIS systems for further storage and analysis.

After magnetic testing (scanning the surface of the structure), the obtained data is stored in the following formats:

Coordinate tables for detected reinforcement points; magnetic field intensity graphs; digital anomaly maps; depth and diameter values of reinforcement bars.

These data can be exported in formats such as: CSV, XLS – for tabular data; DXF, DWG, IFC – for drawings and 2D/3D data; PDF – for reports.

The data is then integrated into the BIM model using: Plugins for Autodesk Revit, Tekla Structures, ArchiCAD; or through exchange formats such as IFC, DXF.

For example: reinforcement positions are inserted into the 3D model of the structure as reinforcement objects with specified coordinates, diameters, and embedding depths;

координатами, діаметрами, глибинами залягання; дефектні ділянки відмічаються як BIM-об'єкти категорії «Проблемна зона» з параметрами типу дефекту, координатами та розмірами.

При цьому потрібно враховувати прив'язку отриманих даних до елементів моделі (конкретних елементів конструкції). У BIM-моделі вибираються стіни, плити, балки чи колони, які були обстежені та до кожного елементу прикріплюються параметри обстеження: дата обстеження, метод контролю (магнітний), результати (розташування арматури, глибина, діаметр), фото та графіки результатів.

Інформація у моделі може відображатися як 3D-візуалізація арматури всередині конструкцій, як маркерні точки на поверхні з позначенням глибини та типу арматури або як кольорові карти аномалій на поверхні об'єкта.

У Revit (рис. 5.17), наприклад, це можна зробити через Generic Models, Structural Rebars та Annotations.

Уся інтегрована інформація додається до цифрового паспорта об'єкта в BIM-моделі: розділ технічного стану; історія проведення обстежень; рекомендації з ремонту чи моніторингу.

Defective areas are marked as BIM objects in the "Problem Area" category, with parameters indicating the defect type, coordinates, and dimensions.

It is essential to link the obtained data to specific model elements (individual structural components). In the BIM model, inspected elements—such as walls, slabs, beams, or columns—are selected, and the inspection parameters are attached to each element: inspection date; testing method (magnetic); results (reinforcement layout, depth, diameter); photos and result graphs.

This information can be displayed in the model as:

1. 3D visualizations of reinforcement within the structures;
2. Marker points on the surface indicating depth and type of reinforcement;
3. Colored anomaly maps on the object's surface.

In Revit (Fig. 5.17), for instance, this can be implemented using Generic Models, Structural Rebars, and Annotations.

All integrated information becomes part of the object's digital passport within the BIM model, including technical condition section; inspection history; repair or monitoring recommendations.

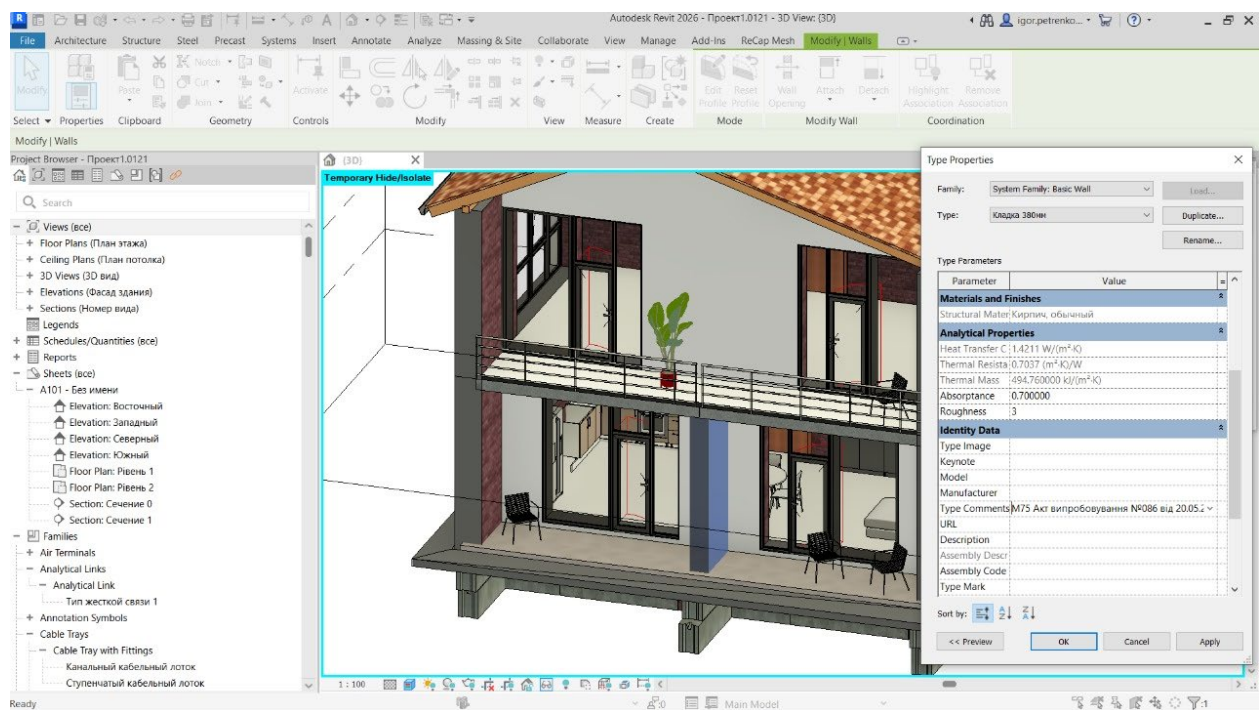


Рис. 5.17. Відображення результатів обстеження в Revit / Displaying of inspection results in Revit

Переваги магнітних методів: не потребують руйнування конструкції, можливість роботи в польових умовах, висока чутливість до ферромагнітних матеріалів, дозволяють швидко отримати результати.

Недоліки: не визначають стан бетону (тільки арматури), можливі похибки за наявності сторонніх магнітних полів, обмеження у складних вузлах або за наявності щільного армування.

Крім магнітного методу, важливе місце в системі неруйнівного контролю посідає георадар (GPR), який базується на інших фізичних принципах. На відміну від магнітного методу, який чутливий переважно до ферромагнітних об'єктів, георадар дозволяє виявляти як металеві, так і неметалеві структури завдяки використанню електромагнітного випромінювання.

Advantages of magnetic methods: no need to destroy the structure, possibility of working on-site, high sensitivity to ferromagnetic materials, allow obtaining results instantly.

Disadvantages or limitations: do not determine the condition of concrete (only reinforcement), possible errors in the presence of extraneous magnetic fields, limitations in complex nodes or in the presence of dense reinforcement.

Additionally, to the magnetic method, Ground Penetrating Radar (GPR) holds an important place in the system of non-destructive testing. Unlike magnetic methods, which are primarily sensitive to ferromagnetic objects, GPR allows detection of both metallic and non-metallic structures due to the use of electromagnetic radiation.

Георадар (GPR) – це потужний інструмент в інженерії та будівництві для сканування бетонних конструкцій (рис. 5.18). Ця неінвазивна технологія передає електромагнітні хвилі в бетон, які відбиваються назад і виявляють внутрішнє розташування. GPR здатний виявляти вбудовану арматуру, троси додаткового натягу, пустоти, розшарування та ознаки руйнування матеріалу, які приховані від очей.

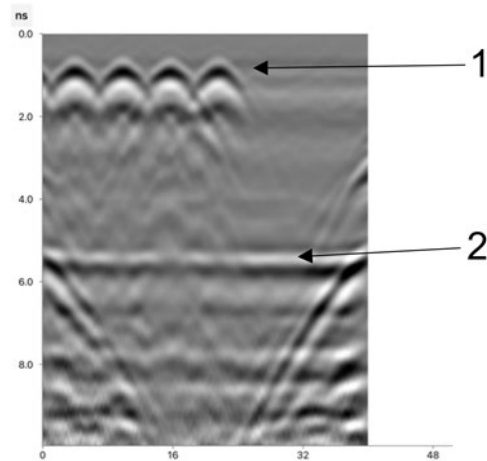
На відміну від традиційних методів інспекції, георадар пропонує безпечний та ефективний спосіб виявлення проблем без пошкодження конструкції. Він особливо корисний для оцінки мостів, тротуарів та паркувальних майданчиків. Аналізуючи зібрані дані, інженери можуть ухвалювати більш обґрунтовані рішення щодо необхідного ремонту та потенційних структурних ризиків.

Ground Penetrating Radar (GPR) is a powerful tool in engineering and construction for scanning concrete structures (Fig. 5.18). This non-invasive technology transmits electromagnetic waves into the concrete, which are reflected back to reveal the internal layout. GPR can detect embedded reinforcement, post-tensioning cables, voids, delamination, and early signs of material degradation that are hidden from view.

Unlike traditional inspection methods, GPR offers a safe and efficient way to identify issues without damaging the structure. It is especially valuable for assessing bridges, sidewalks, and parking decks. Engineers can make more substantiated decisions about necessary repairs and potential structural risks analyzing collected data.



а / а



б / б

Рис. 5.18. Сканування георадаром (а), зображення, отримане за допомогою GPR (б):

1 – армування; 2 – стіна / GPR scanning (a),
image obtained using GPR (b): 1 – reinforcement; 2 – wall

Етапи виконання георадарного обстеження будівельних конструкцій (GPR):

1. Підготовчий етап: збір вхідної інформації та підготовка до обстеження, аналіз проєктної документації (плани, креслення, тип конструкції), визначення цілей обстеження (пошук арматури, пустот, тріщин, включень, визначення товщини конструкції тощо), вибір відповідної GPR-системи (частота антени, формат сканування), підготовка майданчика (звільнення поверхні від перешкод, маркування зони сканування).

2. Калібрування обладнання: забезпечити правильну інтерпретацію даних та встановлення правильної діелектричної проникності матеріалу (можна зробити пробне сканування на відомому об'єкті), налаштування глибини сканування, швидкості збору даних, кроку вимірювання.

3. Проведення сканування: збір георадарних даних з досліджуваної поверхні, переміщення антени по поверхні (вздовж маркованих ліній), збір серій радарограм – поперечних зрізів, які відображають сигнали від об'єктів у товщі конструкції, у разі потреби: двовимірне або тривимірне сканування.

4. Первинна обробка даних (на місці): швидка оцінка якості даних та визначення ключових зон,

Stages of GPR Inspections of Building Structures

1. Preparation:

- Collect input data and prepare for the survey;
- Analyze design documentation (plans, drawings, structural type);
- Define survey objectives (e.g., locating rebar, voids, cracks, inclusions, determining structural thickness);
- Select an appropriate GPR system (antenna frequency, scanning format);
- Prepare the site (clear surface of obstacles, mark-scanning area).

2. Equipment Calibration:

- Ensure correct data interpretation by setting the appropriate dielectric permittivity of the material (e.g., using test scans on a known reference);
- Configure scanning depth, data acquisition speed, and measurement step.

3. Scanning Process:

- Collect GPR data from the target surface;
- Move the antenna along marked lines;
- Acquire a series of radar images – cross-sectional slices showing reflections from internal features;
- Perform 2D or 3D scanning if required.

4. Preliminary On-site Data Processing:

- Quickly evaluate data quality and identify key areas of interest;

перегляд сигналів у режимі реального часу, визначення зон із підозрілими відбитками.

5. Детальна обробка та інтерпретація: побудова повноцінного уявлення про внутрішню структуру конструкції, фільтрація шумів, вирівнювання сигналу, підсилення контрасту, побудова профілів, глибинних зрізів, 3D-моделей (за потреби), ідентифікація об'єктів (арматура, труби, тріщини, порожнини, товщина конструкції) та порівняння з проектною документацією (при наявності).

6. Оформлення результатів: надання офіційного звіту з висновками, куди входять графічні матеріали (радарограми, схеми, 3D-моделі), таблиці глибин та розташування арматури/об'єктів, та відповідно самі висновки, що містять інформацію про наявність дефектів, відхилення від проекту, рекомендації.

Крім цього, є можливість геопозиціонування, інтеграція в BIM або CAD.

Інтеграція GPR-даних у CAD/BIM відбувається таким чином:

1. Збір та обробка георадарних даних – GPR-система фіксує відбиті сигнали у вигляді радарограм (зазвичай у власному форматі приладу). За результатами сканування створюються плани, профілі, глибинні зрізи та (у разі 3D-сканування) точкові хмари або сітки об'

- Review real-time signal output;
- Identify zones with anomalous reflections.

5. *Detailed Data Processing and Interpretation:*

- Develop a full representation of the internal structure of the object;
- Apply noise filtering, signal leveling, and contrast enhancement;
- Generate profiles, depth slices, and 3D models if needed;
- Identify objects (e.g., reinforcement, pipes, cracks, voids, structural thickness);
- Compare findings with available design documentation.

6. *Result Documentation:*

- Provide an official report with conclusions, including:
- Graphic materials (radar images, diagrams, 3D visualizations);
- Tables showing depths and positions of reinforcement/objects;
- Conclusions indicating defects, deviations from design, and recommendations.

Additional features may include geolocation tagging and integration with BIM or CAD platforms.

Integration of GPR Data into CAD/BIM Systems can be provided as follows:

1. *Data Collection and Processing.* The GPR system records reflected signals as radar images (usually in the device's proprietary format). Based on scanning results, plans, profiles, depth slices, and (for 3D scans) point clouds or object

єктів. Під час обробки визначаються координати об'єктів (наприклад, положення арматури, труб, пустот) у площині XY та глибині Z.

2. Експорт у сумісний формат. Для подальшої інтеграції потрібен переклад GPR-даних у формат, сумісний із CAD або BIM. Найпоширеніші формати: DXF / DWG – для AutoCAD, Revit, ArchiCAD; CSV – табличні координати точок/елементів (може використовуватись для імпорту в CAD/BIM через скрипти або плагіни); IFC (Industry Foundation Classes) – відкритий формат BIM; RCP / RCS – формати для імпорту точкових хмар в Revit.

3. Імпорт у CAD. У AutoCAD або подібному редакторі імпортується DXF/DWG-файл з нанесеними об'єктами: арматура, труби, зони з дефектами. Об'єкти можуть бути представлені у вигляді: точок (центр об'єкта), поліліній (труби, шари), полігонів (зони пустот, дефектів). Ці дані можна поєднати з кресленням конструкції та використати для подальшого проєктування чи ремонту.

4. Імпорт у BIM. У Revit / ArchiCAD / Tekla імпортуються дані (наприклад, арматурна сітка або інженерні мережі) як сімейства (families) або анотаційні об'єкти; при використанні хмари точок (Point Cloud) – можна інтегрувати повну 3D-модель умовно «просвіченої» структури. Результати можуть бути прив'язані до

meshes are generated. During processing, the coordinates of detected features (e.g., rebar, pipes, voids) are defined in the XY plane and depth Z.

2. Export to a Compatible Format. To enable integration, GPR data must be converted into formats supported by CAD or BIM software. Common formats include: DXF / DWG – for use in AutoCAD, Revit, ArchiCAD; CSV – tabulated point/element coordinates (can be imported into CAD/BIM via scripts or plugins); IFC (Industry Foundation Classes) – open BIM format for interoperability; RCP / RCS – point cloud formats used for importing into Revit.

3. Import into CAD. In AutoCAD or similar software, DXF/DWG files are imported with overlaid objects such as rebar, pipes, or defect zones. These objects may appear as: points (object centers); polylines (pipes, layers); polygons (zones of voids or anomalies). The data can be aligned with the structural drawings and used for further design or rehabilitation planning.

4. Import into BIM. In Revit/ArchiCAD/Tekla, data such as rebar meshes or utility lines can be imported as families or annotation objects.

5. If using a point cloud, a full 3D "x-rayed" model of the structure can be integrated. The results can be linked to specific model elements e.g., adding parameters to a slab

елементів моделі: наприклад, додати атрибути до плити, що містить дефекти. Існують спеціальні плагіни, які автоматизують інтеграцію з GPR (наприклад, через Autodesk Recap або спеціалізовані GPR-програми).

5. Візуалізація та використання. На моделі видно: арматуру, канали, пустоти, зони пошкодження. Ця інформація використовується для технічної оцінки стану конструкції, ухвалення рішень про ремонт чи реконструкцію, узгодження з іншими розділами проєкту (опалення, вентиляція, електрика тощо). Дані можуть бути параметризовані – наприклад, товщина плити, тип арматури, стан конструкції.

Переваги георадарних досліджень: неруйнівний метод; сканування займає лічені хвилини на м²; можливість оперативної оцінки на місці; може виявляти арматуру з точністю до кількох міліметрів; дає змогу побачити пустоти, тріщини, вклучення, зміни щільності; здатність виявляти як металеві, так і неметалеві об'єкти; можливість 3D-візуалізації та інтеграція з CAD/BIM.

Недоліки георадарних досліджень: обмеження по глибині; чутливість до вологості та солоності; потреба у кваліфікованій інтерпретації; нерівності, арматура на поверхні або складна геометрія можуть ускладнити сканування.

that contains defects. There are specialized plugins that automate GPR data integration (e.g., via Autodesk Recap or proprietary GPR software).

6. Visualization and Use. The model will display rebar, conduits, voids, and damage zones. This information is used for: Technical assessment of structural condition; Making decisions on repairs or reconstruction; Coordination with other disciplines (HVAC, electrical, plumbing). The data can be parameterized – such as slab thickness, rebar type, and structural condition.

Advantages of GPR Investigations can be described as follows:

- Non-destructive method;
- Scanning takes only minutes per m²;
- Allows on-site assessment in real time;
- Can detect rebar with millimeter accuracy;
- Reveals voids, cracks, inclusions, density changes;
- Detects both metallic and non-metallic objects;
- Enables 3D visualization and integration with CAD/BIM.

Limitations of GPR Investigations:

- Limited penetration depth;
- Sensitive to moisture and salinity;
- Requires skilled interpretation;
- Uneven surfaces, surface reinforcement, or complex geometry can affect scanning quality.

5.2.3. Контроль виробів просвічуванням радіаційним випромінюванням

Метод радіаційного просвічування (рентгенографія або гаммаграфія) – це неруйнівний метод контролю, який ґрунтується на здатності рентгенівських або гамма-променів проникати крізь матеріали та ослаблюватись залежно від їхньої густини та товщини.

Коли промені проходять крізь конструкцію або виріб, частина випромінювання поглинається матеріалом, а частина досягає реєструючого екрана (плівки чи цифрового детектора). Завдяки цьому формується зображення внутрішньої будови об'єкта, на якому добре помітні дефекти: пустоти, тріщини, пори, включення сторонніх тіл, непровари у зварних швах тощо.

Метод використовується для контролю зварних швів у металевих конструкціях, залізобетонних виробів для виявлення пустот або дефектів армування, збірних бетонних елементів.

Рентгенівський аналіз бетону – це неруйнівний метод оцінки, який використовується для виявлення прихованих елементів та внутрішніх дефектів у бетонних конструкціях. Він допомагає виявити існуючі або потенційні проблеми, такі як тріщини, пустоти, повітряні бульбашки, розшарування, ніздрювату структуру та корозію арматурних

5.2.3. Radiation Methods of Tests

The method of radiation imaging (radiographic or gamma radiography) is a non-destructive testing (NDT) technique based on the ability of X-rays or gamma rays to penetrate materials and attenuate depending on their density and thickness.

When the rays pass through a structure or product, the material absorbs part of the radiation, and the remaining portion reaches a recording screen (film or digital detector). This forms an image of the internal structure of the object, where defects such as voids, cracks, pores, foreign inclusions, and weld imperfections (e.g., lack of fusion) become clearly visible.

This method is widely used to inspect of welded joints, reinforced concrete products for detection of voids or reinforcement defects, pre-fabricated concrete elements.

X-ray analysis of concrete is a non-invasive evaluation method used to detect hidden elements and internal defects in concrete structures. It helps identify existing or potential issues such as:

- Cracks;
- Voids;
- Air bubbles;
- Delamination;
- Porous zones;
- Corrosion of reinforcement bars.

стрижнів. Цей метод передбачає пропускання низькоінтенсивного випромінювання через бетон, яке потім реєструється детектором для створення зображення. Ці зображення виявляють зміни щільності матеріалу, що полегшує виявлення структурних слабких місць.

Крім виявлення дефектів, рентгенівський аналіз бетону корисний для вимірювального аналізу, визначення розташування та розмірів арматури, а також перевірки наявності або відсутності таких компонентів, як троси попереднього натягу та анкерні болти. Він дозволяє провести ретельне оцінювання конструкції перед початком будь-яких ремонтних робіт. Використання рентгенівського аналізу бетону значно зросло за останні роки завдяки його точності у виявленні прихованих проблем. Він також скорочує час і витрати, пов'язані з традиційними методами, такими як буріння керн або різання, і підвищує безпеку, мінімізуючи необхідність впливу персоналу на потенційно небезпечні середовища.

При застосуванні даного методу послаблення γ -променів, що викликане зміною щільності й однорідності матеріалу, який просвічують, фіксується рентгенівською плівкою (рис. 5.19, а). На більш товстих ділянках і з більш щільним матеріалом послаблення γ -променів буде більшим, а отже, і на рентгенівській плівки ці ділянки виходять світліше.

This method involves passing low-intensity radiation through the concrete, which is then captured by a detector to create an image. These images reveal density variations, allowing for the detection of structural weaknesses. In addition to defect identification, X-ray concrete analysis is also valuable for:

- Dimensional analysis,
- Determining the position and size of reinforcement,
- Verifying the presence of components such as pre-stressing tendons or anchor bolts.

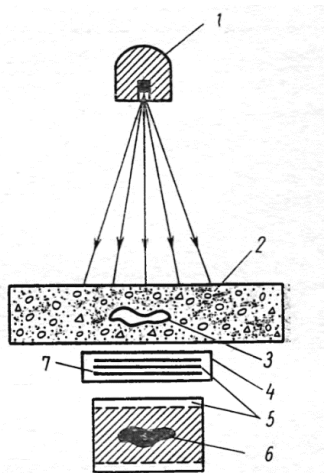
This technique allows for a thorough assessment of a structure before any repair work begins. The use of X-ray analysis for concrete has significantly increased in recent years due to its high accuracy in detecting hidden problems. It also reduces time and cost compared to traditional methods like core drilling or cutting, and improves safety by minimizing the need for personnel to operate in potentially hazardous environments.

When using this method, the attenuation of γ -rays, caused by changes in the density and homogeneity of the material being scanned, is recorded on X-ray film (Fig. 5.19, a). Thicker or denser areas attenuate more radiation, appearing lighter on the film. Thinner zones,

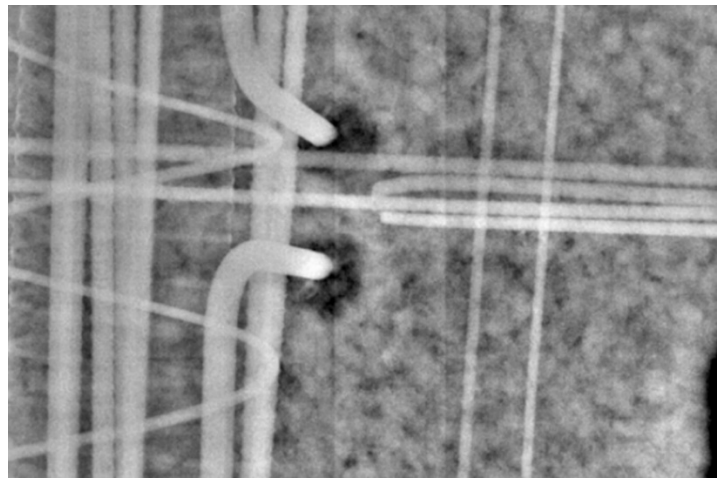
Тонкі ділянки виробу, ділянки з дефектами і менш щільним матеріалом на рентгенівській плівці завжди будуть у вигляді темних або чорних плям. Наявність арматури в залізобетонних виробках значно послаблює γ -промені, оскільки щільність металу приблизно в три рази більше щільності бетону, і на плівках арматура просвічується у вигляді світлих стрічок (рис. 5.19, б).

areas with defects, or less dense materials appear as dark or black spots on the radiograph.

In reinforced concrete elements, the presence of steel reinforcement significantly attenuates γ -rays due to the metal's density being roughly three times that of concrete. As a result, rebar appears as light-colored streaks on the radiograph (Fig. 5.19, b).



а / a



б / b

Рис. 5.19. Схема рентгенівського контролю конструкції (а) та зображення, отримане за допомогою рентгену (б):

- 1 – контейнер з ізотопом; 2 – виріб, який перевіряємо; 3 – дефект у виробі; 4 – касета з плівкою; 5 – фотоплівка; 6 – дефект, що відображено на плівці; 7 – екран /

Scheme of X-ray inspection of the structure (a) and the image obtained using X-ray (b):

- 1 – container with isotope; 2 – product being inspected; 3 – defect in the product; 4 – cassette with film; 5 – film; 6 – defect reflected on the film; 7 – screen

Для визначення розміщення арматури в залізобетонних конструкціях і товщини захисного шару бетону використовують метод γ -графії, при якому з одного боку досліджуваної конструкції розміщують контейнер з радіоактивним

To determine the location of reinforcement in reinforced concrete structures and the thickness of the concrete cover, the gamma radiography method (γ -radiography) is commonly employed. In this method, a radioactive source container is

випромінювачем, а з іншого – касету з рентгенівською плівкою (рис. 5.20, а).

При просвічуванні товстостінних залізобетонних конструкцій товщиною 10...200 см радіоактивний випромінювач краще розміщувати всередині конструкції (рис. 5.20, б).

placed on one side of the structure being examined, and an X-ray film cassette is placed on the opposite side (Fig. 5.20, a).

When inspecting thick-walled reinforced concrete structures with a thickness of 10...200 cm, it is more effective to place the radioactive source inside the structure (Fig. 5.20, b).

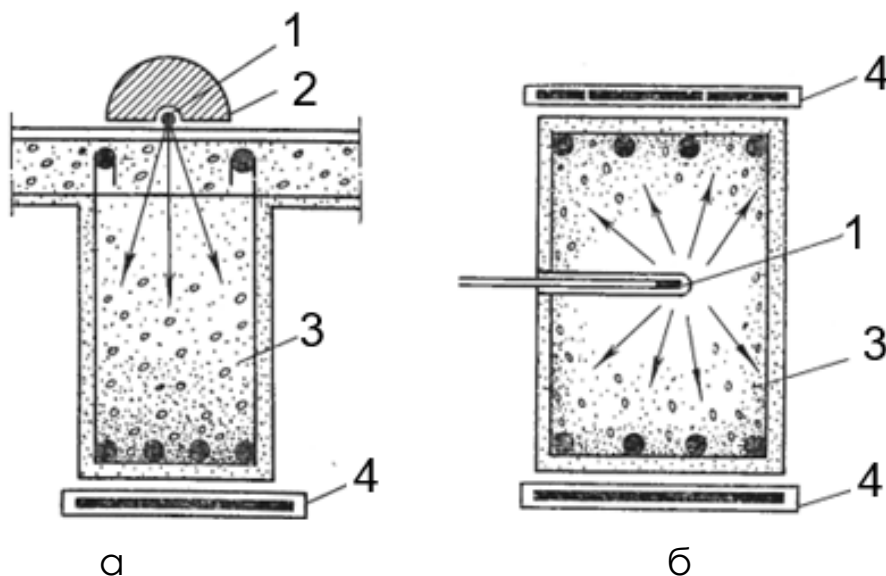


Рис. 5.20. Схема контролю розміщення арматури в залізобетонних виробках при зовнішньому розміщенні ізоотопу (а) та при розміщенні ізоотопу всередині конструкції (б):

1 – радіоактивний ізоотоп; 2 – захисний контейнер;
3 – залізобетонна конструкція; 4 – касета з плівкою /

Scheme of control of the placement of reinforcement in reinforced concrete products with external placement of the isotope (a) and with placement of the isotope inside the structure (b):

1 – radioactive isotope; 2 – protective container;
3 – reinforced concrete structure; 4 – cassette with film

Для розміщення радіоактивного випромінювача в тілі конструкції на рівні нейтральної осі висвердлюють отвір діаметром 10 мм, через який за допомогою спеціального стержня вводять радіоактивний випромінювач (зазвичай використовують радіоактивний кобальт).

To position the radioactive source within the body of the structure along the neutral axis—a hole with a diameter of 10 mm is drilled. A special rod is then used to insert the radioactive emitter (commonly radioactive cobalt) into the opening.

Self-monitoring questions

Питання до самоконтролю

1. Яку інформацію можна отримати за допомогою магнітних методів контролю?

2. Яка перевага магнітних методів контролю?

3. Чи можна інтегрувати дані отримані на основі магнітних методів контролю у BIM-модель?

4. Що собою представляє георадар, та навіщо він застосовується?

5. Як відбувається інтеграція GPR-даних у CAD/BIM?

6. Що допомагає виявити рентгівський аналіз бетону?

7. Класифікація методів контролю якості будівельних конструкцій

8. Що відноситься до не руйнівних методів контролю якості будівельних конструкцій?

9. Що відноситься до напівруйнівних методів контролю якості будівельних конструкцій?

10. Що відноситься до руйнівних методів контролю якості будівельних конструкцій?

11. Сутність і класифікація методів акустичного контролю якості бетонних та залізобетонних конструкцій.

12. Наведіть способи збудження акустичних хвиль.

13. В чому полягає сутність методу акустичного луна?

14. Сутність та класифікація методів ультразвукового контролю.

15. Види перетворювачів для УЗ контролю бетонних та залізобетонних конструкцій.

1. What information can be obtained using magnetic testing methods?

2. What is the advantage of magnetic testing methods?

3. Can the data obtained through magnetic testing methods be integrated into a BIM model?

4. What is a ground-penetrating radar (GPR), and what is it used for?

5. How is the integration of GPR data into CAD/BIM carried out?

6. What does X-ray analysis of concrete help to detect?

7. Classification of methods for quality control of building structures.

8. What are considered non-destructive methods for quality control of building structures?

9. What are considered semi-destructive methods for quality control of building structures?

10. What are considered destructive methods for quality control of building structures?

11. The essence and classification of acoustic methods for quality control of concrete and reinforced concrete structures.

12. Describe the methods of acoustic wave excitation.

13. What is the principle of the acoustic echo method?

14. The essence and classification of ultrasonic testing methods.

15. Types of transducers used for ultrasonic testing of concrete and reinforced concrete structures.

CHAPTER 6 SEMI-DESTRUCTIVE AND DESTRUCTIVE TESTING METHODS

РОЗДІЛ 6 НАПІВРУЙНІВНІ ТА РУЙНІВНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ

6.1. Механічні методи

Міцність бетону визначають в окремих конструкціях, групі однотипних конструкцій або окремих ділянках цих конструкцій.

Ділянки для випробування необхідно призначати не менше трьох та передусім у місцях, де є дефекти.

Перед визначенням міцності бетону під час попереднього огляду конструкцій поверхню бетону необхідно простукати звичайним молотком та виявити ділянки, що мають меншу міцність. Орієнтовно міцність бетону може бути прийнята за табл. 6.1.

6.1. Mechanical Methods

The strength of concrete is determined in individual structures, groups of similar structures, or specific areas of these structures. At least three test locations must be designated, primarily in areas with visible defects.

Before determining concrete strength, during the preliminary inspection of the structures, the concrete surface should be tapped with a regular hammer to identify zones with reduced strength.

The approximate strength of the concrete may be assessed according to Table 6.1.

Таблиця 6.1 – Орієнтовна оцінка міцності бетону

Table 6.1 – Approximately estimated concrete strength

Результат удару молотком вагою 0,4...0,8 кг / Result of hammer blow with a weight of 0.4...0.8 kg		Міцність бетону, МПа / Concrete's strength, MPa
По поверхні бетону / On the surface of concrete	По зубилу, яке поставлене на бетон / By a chisel placed on concrete	
1	2	3
На поверхні бетону залишається ледь помітний слід, навкруги якого можуть відколюватися тонкі лусочки / A barely visible mark remains on the concrete surface, with fine flakes possibly chipping off around it.	Неглибокий слід, лусочок немає / A shallow mark; no flakes.	більше ніж 20 / more than 20
На поверхні бетону залишається помітний слід, навколо якого можуть відколюватися тонкі лусочки / A noticeable mark remains on the concrete surface, with fine flakes possibly chipping off around it.	Від поверхні бетону відколюються гострі лусочки / Sharp flakes chip off from the concrete surface.	20...10

Закінчення таблиці 6 / End of table 6.1

1	2	3
Бетон кришиться і осипається, при ударі по ребру відколюються великі шматки / The concrete crumbles and disintegrates. When struck at the edge, large fragments break off.	Зубило входить в бетон на глибину до 5 мм, бетон кришиться / The chisel penetrates the concrete up to 5 mm; the concrete crumbles.	10...7
Залишається глибокий слід / A deep mark remains.	Зубило входить в бетон на глибину понад 5 мм / The chisel penetrates the concrete deeper than 5 mm.	менше ніж 7 / less than 7

Міцність бетону може бути визначена:

- випробуванням на відрив;
- методом на відрив зі сколюванням;
- методом ударного імпульсу;
- випробуванням пружного відскоку;
- методом відколювання кутів.

Методи відриву, відриву зі сколюванням, відколювання кутів конструкцій і випробовуванням кернів називають методами руйнування малих об'ємів.

Визначення міцності бетону полягає у вимірюванні мінімальних зусиль, що призводять до руйнування спеціально виготовлених зразків бетону при їх навантаженні з постійною швидкістю зростання навантаження і наступному розрахунку напружень при цих зусиллях.

Залежно від застосовуваного методу непрямыми характеристиками міцності є:

- значення відскоку бойка від поверхні бетону (або притиснутого до неї ударника);
- параметр ударного імпульсу (енергія удару);

Concrete strength can be determined with the next methods:

- pull-off testing;
- pull-off testing with chipping;
- impact impulse method;
- rebound hammer testing;
- corner chipping method.

The pull-off, pull-off with chipping, corner chipping methods and core testing are referred to as small-volume destruction methods.

Concrete strength determination consists of measuring the minimum forces that cause the destruction of specially made concrete samples when loaded at a constant loading rate, followed by calculating the stresses at those forces.

Depending on the method used, the indirect strength characteristics are:

- rebound value of the hammer from the concrete surface (or the striker pressed against it);
- impact impulse parameter (impact energy);
- size of the imprint on the concrete (diameter, depth, etc.) or the

- розміри відбитка на бетоні (діаметр, глибина тощо) або співвідношення діаметрів відбитків на бетоні і стандартному зразку при ударі чи вдавлюванні індентора в поверхню бетону;
- значення напруження, необхідного для місцевого руйнування бетону при відриві приклеєного до нього металевого диска, рівного зусиллю відриву, поділеному на площу проєкції поверхні відриву бетону на площину диска;
- значення зусилля, необхідного для сколювання ділянки бетону на ребрі конструкції;
- значення зусилля місцевого руйнування бетону при відриві з нього анкерного пристрою.

При випробуванні методом пружного відскоку, методом ударного імпульсу чи методом пластичної деформації відстань від місць проведення випробування до арматури повинна бути не менше ніж 50 мм. При випробуванні методом відриву, методом відриву зі сколюванням та методом сколювання ребра ділянки повинні розташовуватись у зоні найменших напружень, що викликаються експлуатаційним навантаженням або зусиллям обтискування попередньо напруженої арматури. При випробуванні методом сколювання ребра на ділянці випробування не повинно бути тріщин, відколювань бетону, напливів або раковин висою (глибиною) більше ніж 5 мм.

ratio of imprint diameters on concrete and a standard sample when struck or indented by the indenter on the concrete surface;

- stress value required for local concrete destruction when detaching a metal disc glued to it, equal to the pull-off force divided by the projected surface area of the concrete detachment on the disc plane;
- force required to chip off a section of concrete at the edge of the structure;
- force required for local concrete destruction when detaching an anchor device.

When testing by rebound hammer, impact impulse, or plastic deformation methods, the distance from the test site to the reinforcement should be at least 50 mm. When testing by pull-off, pull-off with chipping, and edge chipping methods, the test areas should be located in zones of minimal stresses caused by operational loads or pre-stressing forces of the reinforcement. When testing by edge chipping, there should be no cracks, concrete chips, protrusions, or voids deeper than 5 mm in the test area.

Using digital devices, strength readings in MPa can be recorded via device interfaces. Digital equipment helps automatically transfer results to the BIM model: concrete

При застосуванні цифрових пристроїв можна фіксувати покази міцності у МПа через інтерфейс пристроїв. Цифрове обладнання допомагає автоматично переносити результати у BIM-модель: значення міцності бетону, дату та час проведення випробувань, позначення типу та класу бетону за проектом, стан поверхні, наявність дефектів.

6.1.1. Випробування на відрив

Метод випробування на відрив бетону – це один із неруйнівних (або частково руйнівних) методів контролю якості бетону, який використовується для визначення його міцності на стиск або зчеплення з іншими матеріалами (рис. 6.1). Основна мета – оцінити фактичну міцність бетону в конструкції без повного її руйнування.

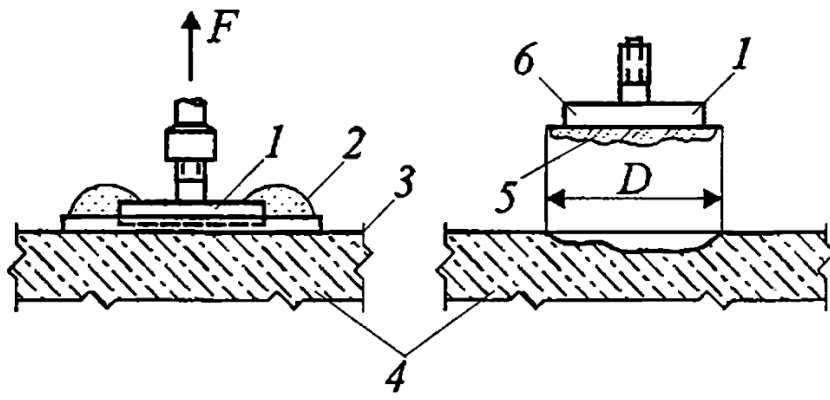
Суть методу: на поверхню бетону приклеюється спеціальний металевий диск. Після того як клей набирає міцність, до цього диска прикладається відривне зусилля за допомогою гідравлічного або механічного пристрою. Фіксується сила, за якої відбувається відрив, і на її основі визначається міцність бетону.

strength values, date and time of testing, designation of concrete type and class according to the project, surface condition, and presence of defects.

6.1.1. Pull-off Tests

The pull-off testing method for concrete is one of the non-destructive (or partially destructive) quality control methods used to determine its compressive strength or adhesion to other materials (Fig. 6.1). The main goal is to assess the actual strength of concrete in the structure without complete destruction.

The essence of the method: a special metal disc is glued to the concrete surface. After the adhesive gains strength, a pull-off force is applied to the disc using a hydraulic or mechanical device. The force at which detachment occurs is recorded, and based on it, the concrete strength is determined.



а / а



б / б



в / с



г / д

Рис. 6.1. Схема випробування на відрив (а), вигляд механічного приладу (б), цифрового в кейсі (в) та підготовленого до роботи (г):

1 – сталевий диск зі стрижнем; 2 – гіпсовий розчин; 3 – кільце;
4 – конструкція; 5 – бетон, який відірвався /

Scheme of the pull-off test (a), view of the mechanical device (b), digital device in the case (c) and prepared for operation (d):

1 – steel disk with a rod; 2 – gypsum mortar; 3 – ring; 4 – structure;
5 – concrete that has come off

Основні етапи випробування:

1. Підготовка поверхні: поверхню бетону очищають від пилу, бруду, фарби або покриттів.

2. Кріплення анкерів або дисків: металеві диски приклеюють до бетону спеціальним клеєм, або використовують анкери, які механічно закріплюють у бетоні.

3. Очікування тверднення клею (якщо використовується): зазвичай триває кілька годин залежно від типу клею.

Main stages of testing:

1. Surface preparation: The concrete surface is cleaned from dust, dirt, paint, or coatings.

2. Attachment of anchors or discs: Metal discs are glued to the concrete using a special adhesive, or anchors are mechanically fixed into the concrete.

3. Waiting for adhesive curing (if used): Usually lasts several hours depending on the type of adhesive.

4. Приєднання випробувального пристрою: встановлюється пристрій для прикладення навантаження.

5. Випробування: плавно прикладається зусилля до моменту відриву диска або анкера від бетону.

6. Фіксація зусилля відриву: зчитується показник сили, при якій відбувся відрив.

7. Обробка результатів: за допомогою калібрувальних кривих або емпіричних формул обчислюється міцність бетону.

Типи відриву:

– відрив у тілі бетону – свідчить про реальну міцність бетону;

– відрив на межі клей/бетон – вказує на погану підготовку або невідповідний клей;

– відрив у клеї – означає, що міцність клею менша за міцність бетону.

За розмірами плями відриву визначають його площу $A_{\text{від}}$ і обраховують опір бетону розтягу:

$$R_b = \frac{F_{\text{max}}}{A_{\text{від}}} \quad (1)$$

де R_b – пряма характеристика міцності бетону на розтяг, вирахувавши яку за відомими співвідношеннями можна отримати міцність бетону на стиск;

F_{max} – зусилля при відриванні диску;

$A_{\text{від}}$ – площа відриву.

4. Connecting the testing device: The device for applying the load is installed.

5. Testing: The force is gradually applied until the disc or anchor detaches from the concrete.

6. Recording the pull-off force: The force at which detachment occurred is recorded.

7. Processing results: Concrete strength is calculated using calibration curves or empirical formulas.

Types of pull-off:

1. Pull-off within the concrete body – indicates the actual concrete strength.

2. Pull-off at the adhesive/concrete interface – indicates poor surface preparation or inappropriate adhesive.

3. Pull-off within the adhesive – means the adhesive strength is less than the concrete strength.

Based on the size of the separation spot, its area A_{pull} is determined and the tensile strength of the concrete is calculated:

$$R_b = \frac{F_{\text{max}}}{A_{\text{pull}}} \quad (1)$$

where R_b – a direct characteristic of the tensile strength of concrete, after calculating which, according to known ratios, one can obtain the compressive strength of concrete;

F_{max} – is the force when the disk is torn off;

A_{pull} – from is the tear-off area.

Advantages of the method:

Переваги методу: дає змогу оцінити фактичну міцність бетону в конструкції; може застосовуватись на готових конструкціях (не тільки на зразках); частково руйнівний, але менш травматичний для конструкції, ніж вирізання кернів.

Недоліки: залишається слід/пошкодження на конструкції; результати залежать від якості приклеювання/монтажу анкера; потрібна спеціальна апаратура та навички персоналу; знайдена міцність відноситься лише до поверхневого шару бетону.

6.1.2. Метод на відрив зі сколюванням

Метод випробування на відрив зі сколюванням (також відомий як «pull out tests» або метод відриву зі сколюванням шару) – це один із частково руйнівних методів контролю, який застосовується для визначення зчеплення покриття з бетоном або оцінки міцності верхнього шару бетону (рис. 6.2).

Суть методу: металевий анкер або диск приклеюється до поверхні бетонної конструкції, після чого навколо нього буриться кільцевий надріз (часткове кернування), щоб локально розвантажити матеріал навколо місця прикладення зусилля. Це дозволяє забезпечити відрив зі сколюванням частини бетону, а не просто відрив клею чи покриття.

- Allows assessment of the actual concrete strength in the structure;
- Can be applied on finished structures (not only on samples);
- Partially destructive but less damaging to the structure than core drilling.

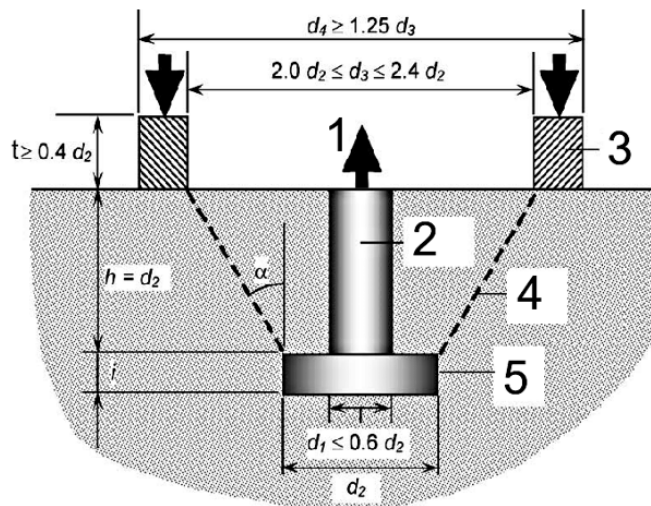
Disadvantages:

- Leaves a mark/damage on the structure;
- Results depend on the quality of adhesive bonding or anchor installation;
- Requires specialized equipment and trained personnel;
- Measured strength relates only to the surface layer of the concrete.

6.1.2. Pull-out Tests

The pullout with chipping method (also known as pullout tests or the layer chipping pull-off method) is a partially destructive testing method used to assess the adhesion of a coating to concrete or to evaluate the strength of the upper concrete layer (Fig. 6.2).

Method essence: A metal anchor or disc is glued to the surface of the concrete structure. Then, a circular groove is drilled around the anchor (partial coring), which locally relieves the material around the force application point. This enables the detachment of a fragment of the concrete itself (chipping), rather than simply detaching the adhesive or coating layer.



a)



б)

Рис. 6.2. Схема для випробування методом відриву зі сколюванням, загальний вид пристрою під час дослідження (б):

1 – сила витягування; 2 – вал вставки; 3 – кільце підшипника; 4 – передбачуваний конічний тріщиноподібний перелом; 5 – головка вставки /

Scheme for testing by the method of separation with chipping, general view of the device during the study (b):

1 – pulling force; 2 – insert shaft; 3 – bearing ring;
4 – expected conical crack-like fracture; 5 – insert head

Послідовність проведення:

1. Підготовка поверхні: поверхня очищується від пилу, фарби, масил, забруднень. Наноситься розмітка для центрування анкера.

2. Приклеювання анкерного диска: металевий диск (діаметр зазвичай 50 мм) приклеюється до бетону високоякісним клеєм (епоксидним або поліуретановим). Дається час на тверднення клею (зазвичай 12–24 год).

3. Буріння кільцевої канавки (часткове кернування): навколо анкерного диска буриться кільце (глибиною зазвичай 5...15 мм), що частково відділяє його від решти матеріалу. Це дозволяє зосередити зусилля на сколювання верхнього шару бетону.

Testing Procedure can be described as follows:

1. Surface preparation: The surface is cleaned from dust, paint, grease, and other contaminants. Marking is applied to center the anchor.

2. Gluing the anchor disc: A metal disc (typically 50 mm in diameter) is glued to the concrete using a high-quality adhesive (epoxy or polyurethane). Curing time is allowed for the adhesive, usually 12–24 hours.

3. Drilling the circular groove (partial coring): A ring is drilled around the anchor disc (typically 5...15 mm in deep), partially separating it from the surrounding material. This focuses the

4. Випробування на відрив: до диска прикріплюється динамометричний пристрій. Зусилля прикладається перпендикулярно до поверхні до моменту сколювання частини бетону.

5. Фіксація зусилля та візуальна оцінка типу руйнування: зчитується максимальне зусилля. Фіксується тип руйнування (в бетоні, по межі шарів, у клеї тощо). Результат виражається в МПа і розраховується як відношення сили відриву до площі поверхні відриву.

Переваги: досить точний метод для оцінки адгезії та поверхневої міцності; підходить для готових конструкцій (на місці експлуатації); дає можливість чітко визначити тип руйнування (табл. 6.2).

applied force on shearing off the upper concrete layer.

4. Pullout testing: A dynamometric device is attached to the disc. Force is applied perpendicularly to the surface until a portion of the concrete shears off.

5. Recording the force and visually assessing the failure mode: The maximum force is recorded. The type of failure is noted (within the concrete, at the layer interface, within the adhesive, etc.). The result is expressed in MPa and calculated as the ratio of the pullout force to the area of the detachment surface.

Advantages: Provides accurate assessment of adhesion and surface strength; suitable for in-situ testing of completed structures; allows clear identification of the failure type (Table 6.2).

Таблиця 6.2 – Типи руйнування

Table 6.2 – Types of destruction

Руйнування / Types of Failure	Опис / Description
Руйнування в бетоні / Failure in concrete	Найбажаніший варіант. Свідчить, що зчеплення покриття/ремонтів є міцнішим за сам бетон / Most desirable. Indicates that the bond between the coating/repair is stronger than the concrete itself
Руйнування на межі покриття і бетону / Insufficient strength of the coating itself	Слабке зчеплення між покриттям і основою / Weak bond between the coating and the substrate
Руйнування в покритті / Insufficient strength of the coating itself	Недостатня міцність самого покриття / Insufficient strength of the coating itself
Руйнування в клеї / Failure in the adhesive	Помилка у підготовці зразка (неякісний або неправильно нанесений клей) / Error in sample preparation (poor or incorrectly applied adhesive)
Руйнування на межі клею і диска/анкера / Failure at the interface between the adhesive and the disk/anchor	Теж технічна помилка – слабе зчеплення клею з диском / Also a technical error – poor adhesion of the adhesive to the disk
Комбіноване руйнування / Combined failure	Часто трапляється, вимагає аналізу домінуючого типу / Often occurs, requires analysis of the dominant type

Недоліки: потребує часткового руйнування конструкції; вимагає спеціального обладнання (бур, клей, динамометричний пристрій); необхідно очікувати тверднення клею; складно провести випробування в конструкціях з великою кількістю арматури.

6.1.3. Випробування пружного відскоку

Метод випробування пружного відскоку (часто його ще називають методом відскоку Шмідта, або склерометричним методом) – це один із найпоширеніших неруйнівних методів оцінки міцності бетону на стиск. Його головна ідея – виміряти висоту або силу відскоку бойка, що вдаряє по поверхні бетону (рис. 6.3).

Суть методу: під час удару по бетонній поверхні спеціальним приладом (склерометром або молотком Шмідта) боек відскакує назад. Чим міцніший бетон, тим більший буде відскок. Відповідно, величина відскоку пов'язана з твердістю поверхні, а отже, й опосередковано з міцністю на стиск.

Закріплений на пружині й вільно пересувається по направляючому стержню боек робить удар після звільнення пружини та відскакує на визначену відстань. Ця відстань, що фіксується на шкалі, прикріпленій до корпусу приладу, і служить показником міцності бетону.

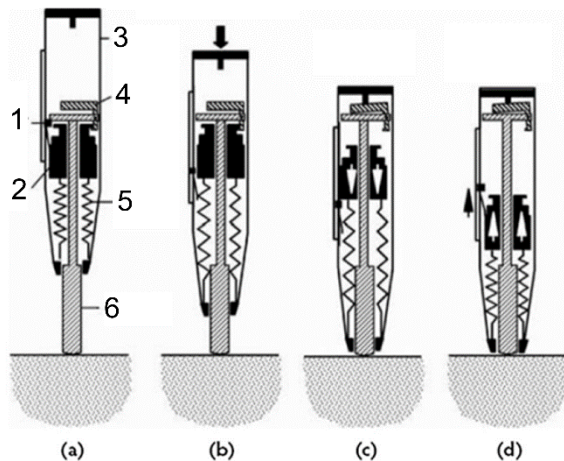
Disadvantages: Involves partial destruction of the structure; requires specialized equipment (drill, adhesive, dynamometric device); curing time for adhesive is necessary; difficult to perform on structures with dense reinforcement.

6.1.3 Rebound Hammer Test

The rebound hammer test (also commonly known as the Schmidt hammer test or sclerometric method) is one of the most widely used non-destructive methods for assessing the compressive strength of concrete. The core idea is to measure the height or force of the rebound of a hammer plunger that strikes the concrete surface (Fig. 6.3).

Essence of the method: When the concrete surface is struck using a special device (a sclerometer or Schmidt hammer), a spring-loaded plunger hits the surface and rebounds. The harder (stronger) the concrete, the greater the rebound. Thus, the rebound value correlates with the surface hardness and, indirectly, with the compressive strength of the concrete.

The plunger, mounted on a spring and moving freely along a guide rod, delivers an impact when the spring is released and then rebounds to a specific distance. This rebound distance is recorded on a scale attached to the device body



and serves as an indicator of the concrete's strength.



Рис. 6.3. Дослідження міцності бетону методом відскоку, прилад готовий до випробування (а), корпус притиснутий до об'єкта випробування (б), молоток відпущено (с), молоток відскакує (д) / Research of concrete strength by rebound method, the device is ready for testing (a), the body is pressed against the test object (b), the hammer is released (c), the hammer rebounds (d)

Послідовність проведення:

1. Підготовка поверхні: видаляється пил, фарба, штукатурка – поверхня має бути чистою, сухою та рівною. Часто бетон трохи шліфують для точності.

2. Виконання удару: прилад притискають перпендикулярно до поверхні. При натисканні спрацьовує пружина, яка запускає бойок. Бойок вдаряє по бетону, і його відскок фіксується шкалою.

3. Оцінка результату: знімається кілька вимірів, розраховується середнє значення. За шкалою, прикладеною до склерометра або з використанням калібрувальної кривої, визначається орієнтовна міцність бетону на стиск.

Testing Procedure:

1. Surface preparation: Dust, paint, plaster, and other materials are removed the surface must be clean, dry, and even. Concrete is often lightly ground for greater accuracy.

2. Performing the test: The device is pressed perpendicularly to the surface. When pressure is applied, a spring is released, launching a plunger (hammer). The hammer strikes the concrete, and its rebound is recorded on the scale.

3. Evaluating the result: Multiple measurements are taken, and the average value is calculated. Using the scale provided with the Schmidt hammer or a calibration curve, the estimated compressive strength of the concrete is determined.

This test can provide information about: estimated concrete compres-

За допомогою цього дослідження можна встановити: орієнтовну міцність бетону (у МПа); однорідність бетону на поверхні; якість виконання робіт на різних ділянках конструкції.

Переваги: простий і швидкий у застосуванні; не потребує спеціального живлення або складного обладнання; портативний – зручно використовувати на будмайданчику; дешевий у порівнянні з іншими методами.

Обмеження: дає тільки поверхову оцінку міцності; чутливий до вологи, карбонізації, шорсткості, положення в просторі (вертикально/горизонтально).

Загалом цей метод не замінює лабораторних досліджень, він потрібен для попереднього оцінювання або порівняння.

6.1.4. Метод відколювання кутів

Метод відколювання кутів (або метод контрольного відколу) – це руйнівний метод випробування, який застосовується для визначення міцності бетону на стиск у конструкціях, коли неможливо вирізати стандартні зразки (куби або керни). Метод полягає у відколюванні частини бетонного кута спеціальним пристроєм і подальшому аналізі зусиль, необхідних для цього. Застосовується для густо армованих виробів і конструкцій (колон, ригелів, балок та ін.), де використання методу відриву зі сколюванням ускладнене або неможливе.

sive strength (in MPa); surface homogeneity of the concrete; work quality in different areas of the structure.

Advantages:

- Simple and quick to use;
- Does not require external power or complex equipment;
- Portable – convenient for use on construction sites;
- Low cost compared to other methods.

Limitations:

- Provides only a surface-level strength estimate;
- Sensitive to moisture, carbonation, surface roughness, and orientation (vertical/horizontal).

Overall, this method does not replace laboratory testing and is primarily used for preliminary assessment or comparative evaluation.

6.1.4. Corner Break-Off Method

The corner break-off method (also known as the controlled corner fracture method) is a destructive testing method used to determine the compressive strength of concrete in structures where standard samples (cubes or cores) cannot be extracted. This method involves breaking off a portion of a concrete corner using a specialized device and analyzing the force required for the break. It is particularly useful for densely reinforced elements and structural components such as columns, beams, and girders, where methods like pull-off with chipping are impractical or impossible.

Суть методу: до відкритого або попередньо сформованого кута бетонної конструкції прикладається зусилля за допомогою пристрою з клиноподібним наконечником (рис. 6.4). Зусилля поступово зростає, поки частина кута не відколюється. За величиною сили відколу та геометричними параметрами визначають міцність бетону на стиск.

Послідовність проведення:

1. Вибір місця: обирається доступний кут елемента (наприклад, колони, балки або плити). Кут має бути монолітним і без тріщин, арматура в зоні випробування має бути відсутня.

2. Підготовка поверхні: поверхня очищується від бруду, фарби, штукатурки. Іноді формується штучний виступ для більш точного випробування.

3. Встановлення приладу: спеціальний пристрій прикладається до кута бетону. Починається поступове прикладення сили через два ролики або клини, які тиснуть на поверхню кута.

4. Відколювання: в момент, коли бетон не витримує навантаження, частина кута відколюється. Прилад фіксує максимальне докладене зусилля.

5. Розрахунок міцності: за формулами або калібрувальними кривими, враховуючи силу та розміри відколу, визначається міцність бетону на стиск у випробуваній ділянці.

Essence of the method: A force is applied to an exposed or pre-formed concrete corner using a device with a wedge-shaped tip (Fig. 6.4). The applied force gradually increases until a portion of the corner breaks off. Based on the magnitude of the breaking force and the geometric parameters, the compressive strength of the concrete is determined.

Test Procedure:

1. Selection of the testing location: An accessible corner of the structural element (e.g., column, beam, or slab) is selected. The corner must be monolithic and free of cracks, and there should be no reinforcement in the testing zone.

2. Surface preparation: The surface is cleaned of dirt, paint, and plaster. Sometimes, an artificial protrusion is created to ensure a more precise test.

3. Device setup: A special device is placed against the concrete corner. Gradual force is applied using two rollers or wedges that press against the surfaces of the corner.

4. Break-off: When the concrete can no longer withstand the load, part of the corner breaks off. The device records the maximum applied force.

5. Strength calculation: Using formulas or calibration curves and accounting for the applied force and geometry of the break the compressive strength of the concrete in the tested area is determined.

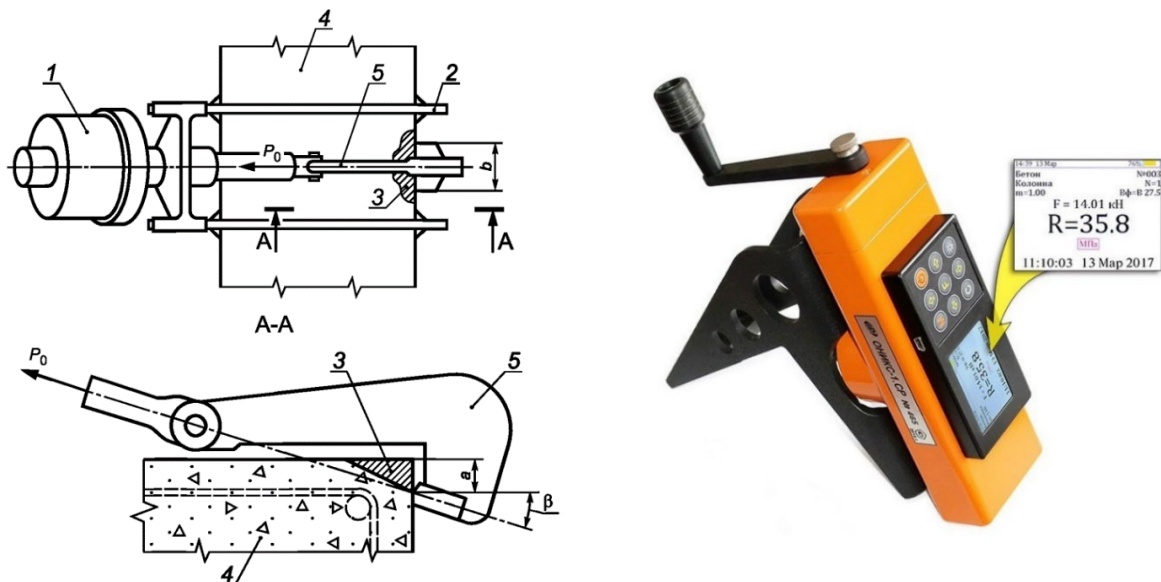


Рис. 6.4. Схема випробування методом сколювання ребра та загальний вигляд приладу: 1 – пристрій навантаження з силовимірювачем; 2 – опорна рама; 3 – бетон, що відкололи; 4 – конструкція, яку досліджують; 5 – захват зі скобою / **Scheme of the test using the rib chipping method and general view of the device:** 1 – loading device with a force gauge; 2 – support frame; 3 – chipped concrete; 4 – structure under investigation; 5 – gripper with a clamp

Цей метод дозволяє визначити: фактичну міцність бетону в елементі конструкції; наявність дефектів у верхніх шарах бетону; порівняння з проєктною міцністю без вилучення зразків.

Переваги: дозволяє оцінити міцність без вирізання кернів; можна застосовувати на готових конструкціях; дає реальну міцність у конкретній ділянці, а не лише у зразках.

Недоліки: руйнівний метод (хоч і локально); може потребувати відновлення конструкції після випробування; не підходить для тих кутів, які мають дефекти; результати чутливі до якості бетонування, особливо в зоні кутів.

This method allows for the determination of: actual compressive strength of concrete in the structural element; presence of defects in the upper concrete layers; comparison with the design strength without extracting samples.

Advantages: Enables strength evaluation without core extraction; can be used on in-situ structures; provides actual strength in a specific location, rather than from sample-only testing.

Disadvantages: Destructive method (though localized); may require restoration of the tested area; do not suitable for corners with defects; results are sensitive to concrete placement quality, especially in corner zones.

6.2. Випробування із плоским домкратом

Метод полягає у прикладенні контрольованого навантаження до поверхні залізобетонного елемента (плити, балки, стіни) за допомогою плоского (тонкого) гідравлічного домкрата, який встановлюється в попередньо підготовлене заглиблення або розшивку конструкції.

Під час випробування фіксуються: величина прикладеного тиску (силового навантаження), відповідні переміщення (деформації) поверхні конструкції. Це, у свою чергу, дозволяє визначити модуль пружності, напружено-деформований стан, реальну несучу здатність конструкції.

Основні етапи виконання:

1. Підготовка місця випробування: вибір ділянки конструкції для дослідження; вирізання шва або заглиблення на глибину 20...40 мм для встановлення домкрата (зазвичай розміром $\approx 30 \times 60$ см); очищення поверхні від бруду, пилу, старого покриття.

2. Встановлення вимірювальної апаратури: монтаж індикаторів переміщення або датчиків деформації (деформометрів); установка плоского гідравлічного домкрата в розшивку та підключення гідравлічної системи з манометром або датчиком тиску.

3. Проведення навантаження. Поступове прикладення тиску (у кілька циклів), кожне значення навантаження фіксується. Одночасно з

6.2. Flat Jack Test

The flat jack method involves applying a controlled load to the surface of a reinforced concrete element (such as a slab, beam, or wall) using a thin hydraulic flat jack installed in a pre-cut groove or recess in the structure.

During the test, the following are recorded: the magnitude of the applied pressure (force) and the corresponding displacements (deformations) of the concrete surface. This data allows for the determination of modulus of elasticity, stress-strain state, as well as the actual load-bearing capacity of the structure.

Main stages of the test:

1. Test area preparation: Selecting the test location on the structure; cutting a groove or recess about 20...40 mm deep (typically $\sim 30 \times 60$ cm) to fit the flat jack; cleaning the surface from dirt, dust, and old coatings.

2. Installation of measuring equipment: Maintaining of displacement indicators or strain gauges; installing the flat hydraulic jack into the groove; connecting the jack to a hydraulic system with a pressure gauge or pressure sensor.

3. Loading procedure: Gradually applying pressure in several cycles; each load value is recorded along with the surface displacement of the structure; after reaching the tar-

тиском реєструються переміщення поверхні конструкції. Після досягнення заданого навантаження – розвантаження та фіксація залишкових деформацій.

4. Обробка результатів. Побудова графіка «навантаження–переміщення». Розрахунок модуля пружності бетону, жорсткості елемента, оцінка фактичної міцності. Порівняння з проєктними або нормативними значеннями.

Цей метод (рис. 6.5) застосовується для оцінки залишкової несучої здатності в процесі обстеження будівель і споруд, визначення фактичного модуля пружності бетону, обґрунтування можливості підсилення або реконструкції конструкцій та контроль якості монолітних та збірних конструкцій.

get pressure, the structure is unloaded, and residual deformations are noted.

4. Data processing: A load–displacement graph is constructed; the modulus of elasticity, stiffness of the element, and actual concrete strength are calculated; results are compared to design or normative values.

This method (Fig. 6.5) is widely applied for a assessment of residual load-bearing capacity during building inspections; determination of the actual modulus of elasticity of concrete; justification for strengthening or retrofitting structures; quality control of cast-in-place and precast concrete elements.

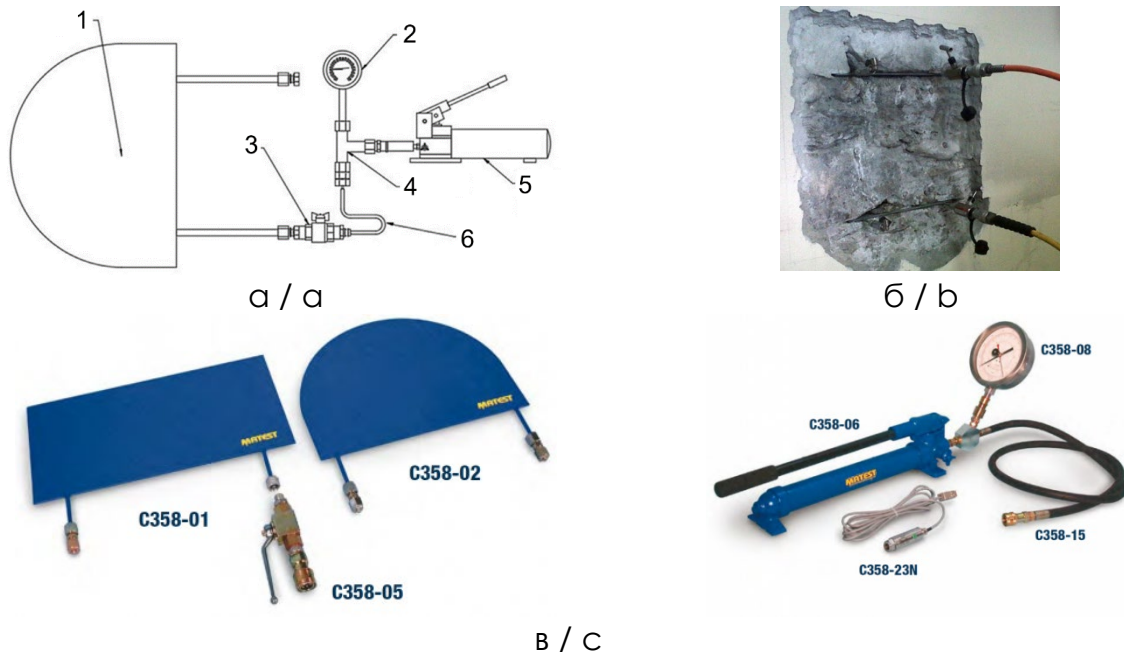


Рис. 6.5. Дослідження за допомогою плоских домкратів:

1 – плоский домкрат; 2 – манометр; 3 – кульовий клапан;
4 – Т-подібний фітинг; 5 – ручний насос; 6 – шланг /

Research using flat jacks:

1 – flat jack; 2 – pressure gauge; 3 – ball valve; 4 – T-fitting;
5 – hand pump; 6 – hose

Переваги: дає реальні фізичні характеристики конструкції, а не лише непрямі оцінки, дозволяє перевірити роботу конструкції під навантаженням, близьким до реального.

Недоліки: локальне руйнування поверхні конструкції (для вставки домкрата), не підходить для масового обстеження – метод точковий і трудомісткий. Окрім цього даний метод потребує спеціалізованого обладнання та кваліфікованого персоналу.

6.3. Огляд за допомогою гнучких бороскопів

Метод полягає у візуальному обстеженні внутрішніх порожнин, тріщин, порожнеч, стиків або недоступних ділянок конструкцій за допомогою гнучкого бороскопа (рис. 6.6) – приладу з довгим зондом, оснащеним камерою, підсвіткою та іноді знімальним пристроєм (фото/відео).

Іноколи цей метод називають «візуально-оптичним контролем у важкодоступних місцях».

Конструкція бороскопа: гнучкий зонд (часто довжиною від 0,5 до 10 м) – дозволяє проникати в криволінійні порожнини; камера з LED-підсвіткою – передає зображення на екран у реальному часі; монітор / екран або пристрій запису – для фіксації візуальних дефектів.

Додаткові опції: зміна напрямку камери (керовані головки),

Advantages: gives real physical characteristics of the structure, allows us to check the operation of the structure under a load close to real.

Disadvantages: local destruction of the surface of the structure (for inserting a jack), not suitable for mass inspection - the method is spotty and laborious. In addition, this method requires specialized equipment and qualified personnel.

6.3. Inspection Using Flexible Borescopes

This method involves visual examination of internal cavities, cracks, voids, joints, or otherwise inaccessible parts of a structure using a flexible borescope (Fig. 6.6) – a device equipped with a long probe, a camera, built-in lighting, and often a recording system (photo/video).

It is sometimes referred to as "visual-optical inspection in hard-to-reach areas."

Borescope Design: A flexible probe (typically 0.5 to 10 meters long) – enables access to curved or confined internal spaces; camera with LED lighting – transmits real-time images to a screen; monitor/screen or recording device – used to document visual defects.

Optional Features: Articulating camera heads for directional control; magnification optics; photo and video recording functions.

збільшення (оптика), функції запису відео або фото.

Етапи проведення:

1. Підготовка доступу до зони контролю. Вибір об'єкта: стики плит, пустоти в бетоні, закладні елементи, інженерні шахти, вентиляційні канали. За потреби – свердлиться оглядовий отвір (зазвичай 10...25 мм). Визначається напрямок введення зонда.

Inspection Procedure:

1. Preparing Access to the Inspection Area: Select the target area: slab joints, voids in concrete, embedded components, utility shafts, or ventilation ducts. If necessary, drill an access hole (typically 10...25 mm in diameter). Determine the direction for probe insertion.



Рис. 6.6. Огляд за допомогою гнучкого бороскопу / Examination using a flexible borescope

2. Проведення огляду. Введення бороскопа в отвір або тріщину. Поступове просування зі спостереженням у реальному часі на моніторі. Фіксація дефектів: тріщини, порожнини, корозія арма-

2. Performing the Inspection: Insert the borescope into the hole or crack. Advance the probe gradually while observing the live video feed on the monitor. Identify and record defects: cracks, voids, reinforcement corrosion, concrete delamination, foreign objects, or sealing failures.

тури, відшарування бетону, сторонні предмети, порушення герметизації.

3. Документування. Зйомка фото/відео фрагментів конструкції. Позначення місць дефектів у схемі або кресленні. Можлива оцінка розмірів і характеру дефектів (якщо є масштаб або шкала в полі зору).

4. Аналіз результатів. Визначення ступеня пошкодження. Формування висновків про необхідність ремонту, підсилення або додаткових досліджень.

Застосування в будівництві: контроль стиків збірних конструкцій, огляд армування в порожнинах перед заливкою бетону, оцінка корозії арматури у вузьких тріщинах або каналах, огляд міжповерхових або заповнених порожнин, перевірка герметичності закладних частин, ущільнень, трубопроводів у бетоні.

Переваги: неруйнівний (напівруйнівний) метод (мінімальне втручання); можливість огляду візуально недоступних ділянок; швидке виявлення локальних дефектів; фото- і відеофіксація для звітності; простота застосування на об'єктах будь-якої складності.

Недоліки: потрібна наявність або створення доступу (отвір); метод суб'єктивний – залежить від досвіду оператора; обмежена

3. Documentation: Capture photos/videos of structural fragments. Mark defect locations on drawings or schematics. If a scale or reference is visible, evaluate defect dimensions and characteristics.

4. Results Analysis: Assess the severity of detected damage. Formulate conclusions regarding the need for repair, strengthening, or further investigation.

Applications in Construction: Inspection of joints in precast concrete elements; observation of reinforcement in cavities before concreting; assessment of corrosion in narrow cracks or ducts; examination of inter-floor or filled cavities; checking the tightness of embedded parts, seals, or embedded pipelines

Advantages:

- Non-destructive or minimally invasive;
- Enables inspection of visually inaccessible areas;
- Quick detection of localized defects;
- Photo/video documentation for reporting;
- Easy to apply on sites of varying complexity.

Limitations:

- Requires pre-existing or drilled access;
- Subjective method – highly dependent on operator experience;
- Limited viewing range – only localized zones;

зона огляду – тільки локальні ділянки; без прямого освітлення або вологих умов – можливе погіршення видимості.

6.4. Руйнівні методи контролю

Руйнівні методи контролю – це вид досліджень, при яких матеріал або конструкцію піддають до повного або часткового руйнування з метою визначення їхніх фізико-механічних властивостей, залишкової міцності, деформативності та несучої здатності.

Руйнівні методи контролю міцності будівельних конструкцій є незамінним інструментом для об'єктивної оцінки технічного стану споруд. Їх застосування дає змогу контролювати якість нових об'єктів, своєчасно виявляти проблеми в експлуатованих будівлях, визначати міцність матеріалів історичних споруд, а також обґрунтовувати проєктні рішення щодо підсилення, ремонту чи реконструкції. Сучасне обладнання та методики дозволяють забезпечити точність і надійність обстежень навіть у складних умовах.

Проте у роботі з історичними та пам'яткоохоронними об'єктами такі методи контролю застосовують з особливою обережністю, оскільки будь-яке втручання може пошкодити автентичні конструкції, обирають мінімально інвазивні методики, такі як локальні склерометричні вимірювання чи відбір ке-

– Poor visibility under low light or wet conditions without direct illumination.

6.4. Destructive Tests

Destructive testing methods involve subjecting materials or structural elements to full or partial destruction in order to determine their physical and mechanical properties, residual strength, deformability, and load-bearing capacity.

Destructive strength testing of construction structures is an essential tool for objectively assessing the technical condition of buildings. These methods allow for:

- Quality control of newly constructed structures;
- Timely detection of defects in existing buildings;
- Assessment of material strength in historical buildings;
- Justification for strengthening, repair, or reconstruction.

Modern equipment and techniques ensure precise and reliable investigations, even under challenging conditions.

However, when working with historical or protected heritage structures, such methods are used with great caution. Since any intervention may damage authentic elements, minimally invasive techniques are preferred such as localized rebound hammer testing or core extraction in

рнів в непомітних ділянках. Дані контролю дозволяють оцінити технічний стан старовинних матеріалів, виявити потенційно небезпечні ділянки й обґрунтувати необхідність реставраційних робіт.

6.4.1. Статичні випробування

Статичні випробування виконуються шляхом поступового прикладання навантаження до конструкції або її елементів до моменту появи граничних деформацій або повного руйнування. Метою є визначення фактичної несучої здатності, жорсткості, деформаційних характеристик та граничного стану.

Для прикладу, це може бути випробування бетонних балок на згин, випробування колон на стиск або навантаження плит перекриття контрольними вантажами (наприклад, мішками з піском, водою, бетонними блоками). Під час таких досліджень фіксують прогини, тріщиноутворення, момент руйнування, залишкову деформацію.

Крім цього, може бути винятий зразок з існуючої конструкції (керна) і досліджений у лабораторних умовах (рис. 6.7).

Метод випробування кернів, які виймають з конструкції, є руйнівним методом контролю, що дозволяє безпосередньо визначити фактичну міцність бетону на стиск у тілі вже зведеної конструкції. Він вважається одним із надійних методів, адже аналізується реальний

concealed areas. The obtained data help evaluate the condition of aged materials, identify potentially dangerous zones, and justify the need for restoration.

6.4.1 Static Testing

Static testing involves gradually applying loads to a structure or its components until the point of limit deformation or complete failure. The aim is to determine actual load-bearing capacity, stiffness, deformation characteristics, and the ultimate limit state. Examples include: bending tests of concrete beams, compression tests of columns, loading of floor slabs with controlled weights (e.g., sandbags, water containers, concrete blocks).

During testing, the following are recorded:

- Deflections;
- Crack formation;
- Moment of failure;
- Residual deformation.

Additionally, samples (cores) may be extracted from existing structures and tested in laboratory conditions (Fig. 6.7).

Core Testing is a destructive control method that directly determines the actual compressive strength of in-place concrete. It is considered highly reliable because it tests the concrete that is part of the structure, rather than a lab-prepared sample.

бетон, який працює в конструкції, а не лабораторний зразок.

Керн – це циліндричний зразок бетону, який висвердлюють із конструкції за допомогою алмазного буріння. Зазвичай використовують керни діаметром від 50 до 150 мм, висотою в 1–2 рази більшою за діаметр.

Суть методу: з конструкції висвердлюють керни (циліндричні зразки). Зразки випробовують на стиск у лабораторії. На основі результатів обчислюють міцність бетону, порівнюють її з проєктними значеннями.

A core is a cylindrical sample drilled from a structure using diamond coring. Typically, cores range from 50 to 150 mm in diameter and have a height of 1–2 times the diameter.

Method Summary: Cores are drilled from the structure; these samples are tested for compressive strength in a laboratory; results are used to calculate concrete strength and compared against design values.



**Рис. 6.7. Вирізання керну з бетону для випробування /
Cutting a core from concrete for testing**

Етапи випробування:

1. Підготовка та відбір місця буріння. Місця буріння вибираються так, щоб: не пошкодити арматуру (перед бурінням проводять сканування арматури – наприклад, за допомогою ферросканера); не ослабити конструкцію; охопити всю конструкцію – обирають різні ділянки (верх, низ, центр).

Stages of Core Testing:

1. Site Selection and Preparation for Drilling. Drilling locations are chosen to ensure that: reinforcement is not damaged (rebar scanning is performed in advance using tools such as a *ferroscan*); structural integrity is not compromised; the entire element is represented – samples are taken from different zones (top, bottom and center).

2. Буріння кернів. Буріння виконується алмазним буром із водяним охолодженням. Після вилучення керна: зразок маркується; оглядається на наявність тріщин, пошкоджень; вимірюється його діаметр і висота.

3. Підготовка кернів до випробування. Торці зразків вирівнюються (шліфуються або заливаються спеціальною сумішшю) – вони мають бути гладкі й перпендикулярні осі. Перевіряється співвідношення висота/діаметр (бажано 1,5...2,0 для точних результатів). Зберігаються у вологих умовах до випробування.

4. Випробування на стиск. Керни випробовують у гідравлічному пресі (рис. 6.8). Сила навантаження прикладається вздовж осі циліндра до моменту руйнування. Фіксується максимальне навантаження.

5. Розрахунок міцності. Міцність на стиск обчислюється за формулою:

$$R = P / A, \quad (2)$$

де R – міцність на стиск (МПа);

P – максимальне навантаження при руйнуванні (Н);

A – площа поперечного перерізу зразка (мм²).

За потреби вносяться коефіцієнти поправки: за вологість зразка; за співвідношення висота/діаметр; за вікову міцність (для бетону віком <28 діб); за умови буріння (якщо торці не ідеальні).

2. Core Drilling. Performed using a diamond core drill with water-cooling. After extraction, the core is labeled, visually inspected for cracks or damage, and its diameter and height are measured.

3. Core Preparation for Testing. The ends of the cores are leveled (by grinding or using a special capping compound) to ensure they are smooth and perpendicular to the axis. The height-to-diameter ratio is checked (ideally between 1.5 and 2.0) for accurate results. Cores are stored in moist conditions until testing.

4. Compressive Strength Testing (Fig. 6.8). Cores are tested in a hydraulic press. The load is applied axially (along the core's cylinder axis) until failure occurs. The maximum applied force is recorded.

5. Strength Calculation. The compressive strength of concrete is calculated using the standard formula:

where R – compressive strength (MPa);

P – maximum load at failure (N);

A – cross-sectional area of the specimen (mm²).

The correction factors are introduced if necessary: for sample moisture; for height/diameter ratio; for age strength (for concrete aged < 28 days); for drilling conditions (if the ends are not ideal).



Рис. 6.8. Випробування кернів бетону / Testing concrete cores

Для випробування на пресі необхідно встановити kern строго по центру нижньої плити преса торцевою поверхнею, причому верхній торець і плита преса повинні бути паралельними. Після цього виконується стискання керна, яке завершується його повним руйнуванням. Це дозволяє визначити руйнівне зусилля.

До підготовки до випробування входить вимірювання діаметра та висоти керна (точність має становити 1 мм). Висота визначається як відстань від однієї торцевої поверхні до іншої (орієнтуючись по насадці) у чотирьох місцях двох площин, розташованих під кутом 90°. Під час розрахунку необхідно знайти середнє арифметичне всіх чотирьох вимірювань.

Діаметр необхідно виміряти у трьох місцях по висоті зразка: по середині та на торцях (орієнтуючись за насадками), враховуючи взаємно перпендикулярні напрямки. Вимірювання діаметра бажано виконувати штангенциркулем. Для розрахунку діаметра

Before testing, the core must be placed exactly at the center of the lower plate of the compression testing machine, with one flat end face in full contact. The top end of the core and the upper plate of the press must be perfectly parallel. The core is then compressed until complete failure occurs, and the maximum failure load is recorded.

Preparation for the test includes measuring the diameter and height of the core (the accuracy should be 1 mm). The height is defined as the distance from one end surface to the other (oriented by the nozzle) at four points on two planes located at an angle of 90°. When calculating, it is necessary to find the arithmetic mean of all four measurements.

The diameter must be measured in three places along the height of the sample: in the middle and at the ends (oriented by the nozzles), taking into account mutually perpendicular directions. It is advisable to measure the diameter with a caliper. To calculate the core diameter (as opposed to the height), six

керна (на відміну від висоти) потрібно врахувати шість вимірювань. Після цього визначається середнє арифметичне значення.

Щодо розмірів кернів, допустимих до випробування – вони можуть бути різних пропорцій, однак діаметр повинен бути щонайменше в три рази більшим за розмір фракцій заповнювача бетону.

Цей метод дозволяє визначити: фактичну міцність бетону в тілі конструкції; однорідність бетонної суміші; вплив умов тверднення; якість виконаних робіт; стан старого або пошкодженого бетону.

Крім цього, для визначення міцності можуть застосовуватися зразки і фрагменти нестандартної конфігурації, але які мають хоча б одну гладку поверхню (рис. 6.9). Таку пробу занурюють у розчин, який укладають у стандартну форму. Міцність розчину на день випробовування повинна бути не менше половини міцності проби.

measurements must be taken into account. After that, the arithmetic mean value is determined.

Regarding the sizes of cores acceptable for testing, they can be of different proportions, but the diameter must be at least three times larger than the size of the concrete aggregate fractions.

This method allows you to determine the actual strength of concrete in the body of the structure; the uniformity of the concrete mix; the influence of hardening conditions; the quality of the work performed; the condition of old or damaged concrete. Additionally, the samples and fragments of non-standard configuration, but which have at least one smooth surface, can be used to determine the strength (Fig. 6.9). Such a sample is included in the solution, which is placed in a standard form. The strength of the solution on the day of testing must be at least half the strength of the sample.

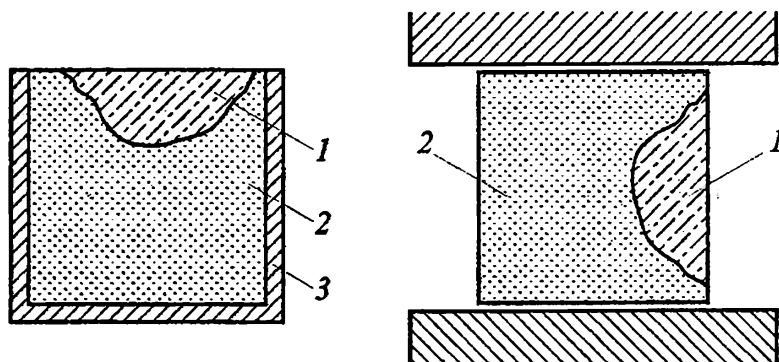


Рис. 6.9. Випробування проб у вигляді сколів, виготовлення зразку (а), положення зразку з пробою під час дослідження (б):

1 – проба; 2 – розчин; 3 – форма /

Testing samples in the form of chips, sample preparation (а), position of the sample with the sample during the study (b):

1 - sample; 2 - solution; 3 - mold

Для випробовування розчинний куб разом з пробом защемляють в пресі таким чином, щоб поверхня проби була вертикальною. Оцінку міцності виконують неруйнівним методом пружного відскоку або методами пластичних деформацій. Застосовувати інші методи недопустимо.

Переваги: найточніший метод визначення міцності бетону в конструкціях; дає реальні значення, а не опосередковані (як неруйнівні методи); підходить для оцінки історичних споруд, реконструкції, судової експертизи.

Недоліки: руйнівний – порушує цілісність конструкції; потребує відновлення місця буріння; складніший та дорожчий, ніж неруйнівні методи; вимагає точного дотримання стандартів.

6.4.2. Динамічні випробування

Динамічні випробування проводяться шляхом прикладання короткочасного, імпульсного або багаторазового змінного навантаження для визначення динамічних характеристик конструкції. Метою є оцінка власних частот коливань, амплітуд, загасання, стійкості до втомних руйнувань.

Види:

- ударні випробування (кидання вантажу з певної висоти);
- вібраційні випробування (штучне збудження коливань конструкції вібраторами);

For testing, the mortar cube together with the sample is clamped in a press so that the surface of the sample is vertical. Strength assessment is performed by the non-destructive method of elastic rebound or by plastic deformation methods. It is unacceptable to use other methods.

Advantages: the most accurate method for determining the strength of concrete in structures; gives real values, suitable for assessing historical structures, reconstruction, forensic examination.

Disadvantages: destructive - violates the integrity of the structure; requires restoration of the drilling site; more complex and expensive than non-destructive methods; requires strict adherence to standards.

6.4.2 Dynamic tests

Dynamic tests are carried out by applying a short-term, pulsed or repeatedly alternating load to determine the dynamic characteristics of the structure. The goal is to assess the natural frequencies of oscillations, amplitudes, damping, and resistance to fatigue damage.

Types:

- impact tests (dropping a load from a certain height);
- vibration tests (artificial excitation of structural vibrations with vibrators);

– сейсмічні моделювання (імітація землетрусів на спеціальних стендах).

Під час таких досліджень фіксують: власні частоти та форми коливань, амплітуди вібрацій, параметри загасання коливань, виникнення та розвиток тріщин.

При випробуванні на ударний вигин (рис. 6.10) сталевих конструкцій у лабораторії визначають, яку силу потрібно докласти, щоб зруйнувати дослідний зразок. Одним із найбільш критичних показників є крихке руйнування. Навіть невелика тріщина збільшується практично миттєво, а основною небезпекою крихкого руйнування є те, що воно не має ніяких передвісників. Відповідно, при проведенні випробувань на ударний вигин, важливо визначити поведінку металу при появі тріщини. Тому, надзвичайно важливо провести всебічні тести сталевих конструкцій і зварювальних з'єднань.

Випробування проводяться на маятниковому копрі. Він встановлюється над зразком, а потім, в результаті падіння копра, відбувається удар по деталі.

Для імітації тріщини, в металі роблять надріз. Він може мати дві форми:

– U – зразок «Менаж» має напівкруглу форму. Його радіус біля основи дорівнює 1 мм;

– V – зразок «Шарпи» з гострим надрізом. Радіус біля основи становить 0,25 мм.

– seismic modeling (simulation of earthquakes on special stands).

During such studies, the following are recorded: natural frequencies and forms of oscillations, vibration amplitudes, vibration damping parameters, the occurrence and development of cracks.

When testing steel structures for impact bending (Fig. 6.10) in the laboratory, the force required to destroy the test specimen is determined. One of the most critical indicators is brittle fracture. Even a small crack grows almost instantly, and the main danger of brittle fracture is that it has no precursors. Accordingly, when conducting impact-bending tests, it is important to determine the behavior of the metal when a crack appears. Therefore, it is extremely important to conduct comprehensive tests of steel structures and welded joints.

The tests are carried out on a pendulum impactor. It is installed above the sample, and then, as a result of the impactor falling, an impact occurs on the part.

To simulate a crack, a notch is made in the metal. It can have two shapes:

U – the “Menage” sample has a semicircular shape. Its radius at the base = 1 mm;

V – the “Sharpa” sample with a sharp notch. The radius at the base is 0.25 mm.

Тип надрізу і характеристики зразка для проведення випробування передбачені нормативними документами. У результаті випробувань визначається сумарна енергія руйнувань. На їхні результати, крім форми надрізу, впливають його розмір і температура при якій проводяться випробування.

The type of notch and the characteristics of the sample for testing are provided by regulatory documents. Because of the tests, the total fracture energy is determined. Its size and the temperature at which the tests are carried out influence their results.



Рис. 6.10. Випробування на ударний вигин (виконує динамічні випробування) які широко застосовуються також для виявлення схильності металів до крихкого руйнування / Impact bending test (performs dynamic tests) which are also widely used to detect the susceptibility of metals to brittle fracture

Результати руйнівних випробувань інтегрують у цифрову інформаційну модель (BIM) об'єкта. Це дозволяє створювати картограми пошкоджень, фіксувати місця та характер руйнувань, актуалізувати характеристики конструкцій за фактичними даними та проводити моделювання поведінки будівлі з урахуванням нових параметрів міцності.

The results of destructive tests are integrated into the digital information model (BIM) of the object. This allows you to create damage cartograms, record the location and nature of damage, update the characteristics of structures based on actual data, and simulate the behavior of the building taking into account new strength parameters.

Self-monitoring questions

Питання до самоконтролю

1. Які руйнівні та напівруйнівні методи визначенні міцності бетону існують?
2. В яких місцях та скільки потрібно призначати ділянок при визначенні міцності бетону руйнівними та напівруйнівними методами?
3. Які результати визначення міцності бетону руйнівними та напівруйнівними методами можна переносити у BIM-модель?
4. Які переваги методу випробування на відрив бетону?
5. В чому відмінність методу випробування на відрив зі сколюванням від випробування на відрив бетону?
6. У чому суть методу випробування пружного відскоку?
7. Які є обмеження методу випробування пружного відскоку?
8. Яка особливість методу відколювання кутів?
9. Що можна визначити за допомогою випробування із пласким домкратом?
10. Коли застосовують випробування із пласким домкратом?
11. Які переваги застосування гнучких бороскопів?
12. Чи у всіх випадках можна застосовувати руйнівні методи контролю?
13. Що являє собою керн? Навіщо його виймають?
14. Які параметри можна зафіксувати шляхом динамічних випробувань?
15. Чи можна результати руйнівних випробувань інтегрувати у цифрову інформаційну модель (BIM) об'єкта?
1. What destructive and semi-destructive methods of determining concrete strength exist?
2. In which locations and how many areas should be designated when determining the strength of concrete using destructive and semi-destructive methods?
3. Which results of determining concrete strength by destructive and semi-destructive methods can be transferred into a BIM model?
4. What are the advantages of the pull-off test method for concrete?
5. What is the difference between the pull-off test with chipping and the standard pull-off test for concrete?
6. What is the essence of the rebound hammer test method?
7. What are the limitations of the rebound hammer test method?
8. What is the specific feature of the corner chipping method?
9. What can be determined using the flat jack test?
10. When is the flat jack test applied?
11. What are the advantages of using flexible borescopes?
12. Can destructive testing methods be applied in all cases?
13. What is a core sample, and why is it extracted?
14. Which parameters can be recorded through dynamic testing?
15. Can the results of destructive tests be integrated into the digital information model (BIM) of the object?

CHAPTER 7 DIGITAL TOOLS FOR BUILDING LIFECYCLE MANAGEMENT: BIM IMPLEMENTATION

РОЗДІЛ 7 ЦИФРОВІ ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ЖИТТЄВИМ ЦИКЛОМ БУДІВЕЛЬ: ВПРОВАДЖЕННЯ BIM

У контексті сучасних викликів, пов'язаних зі збереженням, експлуатацією та відновленням будівельного фонду, в Україні зростає інтерес до використання інформаційного моделювання будівель (BIM). Сьогодні BIM розглядається не як універсальна заміна традиційним підходам, а як важливий інструмент, який може ефективно доповнювати існуючі методи діагностики, проектування та управління.

В українській практиці традиційні методи обстеження будівель все ще широко використовуються: візуальні огляди, інструментальні обстеження, паперові звіти, креслення та локальні цифрові рішення. Однак зростання складності будівель, необхідність міждисциплінарної координації та необхідність реагування на надзвичайні ситуації (включаючи пошкодження, спричинені військовими діями) вимагають більш системних та прозорих підходів.

7.1. Обмеження традиційних методів

Традиційні методи управління життєвим циклом будівель мають

In the context of modern challenges related to the preservation, operation, and renovation of the building stock, there is a growing interest in the use of Building Information Modeling (BIM) in Ukraine. Today, BIM is not regarded as a universal replacement for traditional approaches, but rather as an important tool that can effectively complement existing methods of diagnostics, design, and management.

In Ukrainian practice, traditional methods of building inspection are still widely used: visual surveys, instrumental examinations, paper reports, drawings, and local digital solutions. However, the increasing complexity of buildings, the need for interdisciplinary coordination, and the necessity to respond to emergency situations (including damage caused by military actions) require more systematic and transparent approaches.

7.1. Limitations of Traditional Methods

Traditional methods of managing the building life cycle have a

низку обмежень, які суттєво перешкоджають ефективному та своєчасному управлінню об'єктами. Застарілі підходи до збору, зберігання та обробки даних, а також ручне ведення обліку створюють труднощі в роботі з великими обсягами інформації. Це призводить до фрагментації даних, значної залежності від людського фактору, проблем зі збереженням історії змін та ризику втрати важливої інформації. Усі ці обмеження знижують ефективність управління, що, у свою чергу, може призвести до додаткових витрат, помилок та затримок у процесах проєктування, будівництва, обслуговування та реконструкції будівель (рис. 7.1).

Перше обмеження, яке ми обговоримо, це фрагментація.

number of limitations that significantly hinder the effective and timely management of facilities. Outdated approaches to data collection, storage, and processing, as well as manual record-keeping, create difficulties when working with large volumes of information. This leads to data fragmentation, significant dependence on the human factor, problems with preserving the history of changes, and the risk of losing important information. All these limitations reduce management efficiency, which in turn can result in additional costs, errors, and delays in the processes of design, construction, maintenance, and renovation of buildings (see Fig. 7.1).

The first limitation we will discuss is fragmentation.

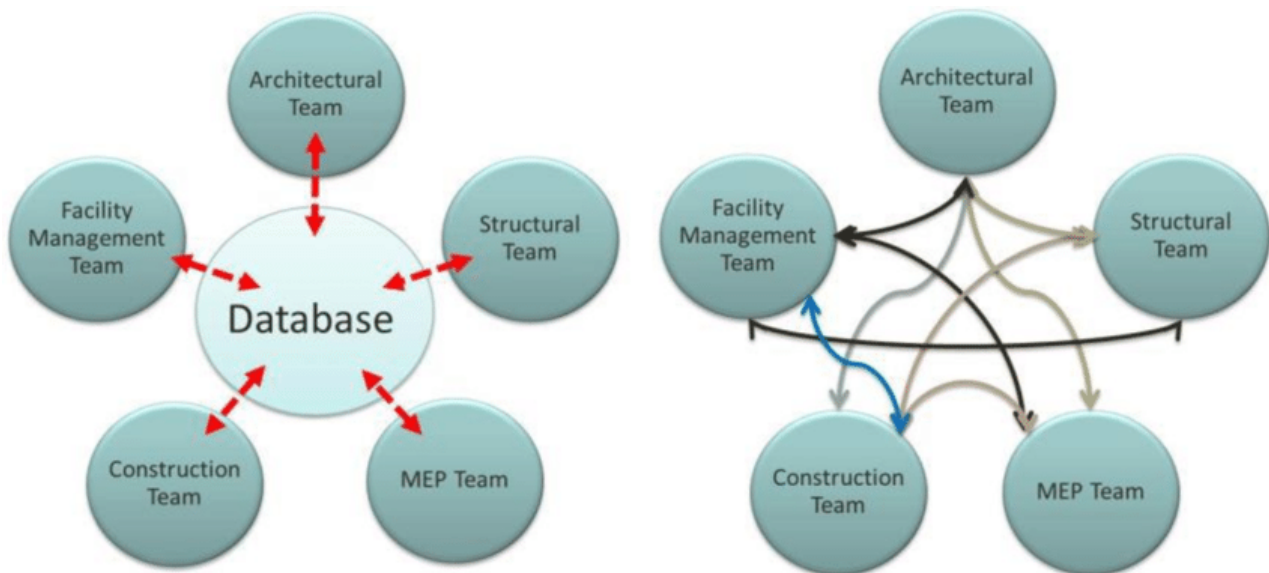


Рис. 7.1. Різниця між BIM та традиційними методами обміну даними / The difference between BIM and traditional data exchange methods

Традиційні методи збору та обробки даних характеризуються тим, що дані з різних джерел збираються окремо та зберігаються в

Traditional methods of data collection and processing are characterized by the fact that data from

різномірних системах. Наприклад, результати технічних оглядів можуть зберігатися на паперових носіях або в локальних базах даних, тоді як інформація про виконані ремонти чи структурні зміни може зберігатися в інших архівах. Це створює прогалини між різними етапами життєвого циклу будівлі, ускладнюючи аналіз та ухвалення рішень, оскільки дані не інтегровані в єдину систему. Такий підхід збільшує ризик втрати важливої інформації, знижує її доступність та актуальність, що, у свою чергу, може призвести до затримок у виявленні дефектів та плануванні ремонту.

Наступним обмеженням є ведення обліку на паперовому носії.

Традиційні методи збору та обробки даних, що передбачають використання паперових носіїв, характеризуються тим, що всі документи фізично зберігаються в окремих архівах або офісах. Наприклад, технічні паспорти, акти перевірок, звіти про ремонт або плани змін зберігаються на папері. Це створює значні труднощі в пошуку та обробці інформації, особливо коли для ухвалення рішень потрібен швидкий доступ до необхідних даних. Такий підхід обмежує доступ до інформації, збільшує час пошуку, що, зрештою, може призвести до затримок у процесах технічного обслуговування та ремонту будівель. Ведення обліку

different sources are gathered separately and stored in heterogeneous systems. For example, the results of technical inspections may be kept on paper or in local databases, while information about completed repairs or structural changes may be stored in other archives. This creates "gaps" between different stages of a building's life cycle, making analysis and decision-making more difficult because the data are not integrated into a single system. Such an approach increases the risk of losing important information, reduces its availability and relevance, and can lead to delays in defect detection and repair planning.

The next limitation is maintaining records on paper.

Traditional methods of data collection and processing, which involve the use of paper-based records, are characterized by the fact that all documents are physically stored in separate archives or offices. For example, technical passports, inspection reports, maintenance records, or plans for modifications are kept on paper. This creates significant difficulties in searching for and processing information, especially when quick access to necessary data is required for decision-making. Such an approach limits access to information, increases the time needed to find it, and ultimately can lead to delays in the maintenance and repair processes of buildings. Keeping records on paper

на паперовому носії також збільшує ризик втрати даних через фізичні пошкодження (волога, пожежа, механічні пошкодження) або людський фактор (недбалість, помилки в архівуванні).

Останнім суттєвим недоліком є можливість втрати історії змін.

Традиційні методи управління даними часто не дозволяють ефективно відстежувати зміни, що відбуваються під час проєктування, експлуатації або ремонту будівель. Коли дані зберігаються на паперових носіях або в окремих базах даних, немає зручного механізму автоматичного збереження історії змін. Кожен етап роботи може документуватися окремо, без чіткого зв'язку з попередніми змінами, що ускладнює відновлення повної інформації про стан об'єкта або проєкту на певний момент часу. Це також ускладнює перевірку того, хто і коли вносив зміни, створюючи додаткові труднощі в управлінні об'єктом.

7.2. Необхідність інтеграції даних та управління життєвим циклом будівлі

Сучасні BIM-системи вже використовуються в окремих українських проєктах, насамперед у сфері нового будівництва, а також у пілотних ініціативах з реставрації пам'яток чи управління муніципальними об'єктами. Ці системи до-

also increases the risk of data loss due to physical damage (moisture, fire, mechanical damage) or human factors (negligence, errors in archiving).

The last significant drawback is the possibility of losing the change history.

Traditional data management methods often do not allow for effective tracking of changes that occur during the design, operation, or repair of buildings. When data is stored on paper media or in separate databases, there is no convenient mechanism for automatically preserving the history of changes. Each stage of work may be documented separately, without a clear connection to previous changes, which complicates the reconstruction of complete information about the state of the object or project at a certain point in time. This also makes it difficult to verify who made changes and when, creating additional challenges in managing the facility.

7.2. The necessity of data integration and building lifecycle management

Modern BIM systems are already being used in certain Ukrainian projects – primarily in the field of new construction, as well as in pilot initiatives for monument restoration or municipal facility management. These systems enable the creation of information models that integrate

звояють створювати інформаційні моделі, що інтегрують геометричні, матеріальні та експлуатаційні дані в єдину цифрову платформу. Така модель є не просто візуальним представленням об'єкта, а повноцінною базою даних для ухвалення рішень.

Паралельно з BIM дедалі частіше впроваджуються додаткові технології: 3D-сканування, системи моніторингу (вологість, навантаження, коливання температури тощо) та технології AR/VR для візуалізації та аналізу. Ці інструменти не повністю замінюють інженерні методи, але вони значно підвищують точність, своєчасність та прозорість процесів.

Інформаційне моделювання будівель не функціонує ізольовано від інших технологій. Ефективність BIM-рішень значною мірою залежить від залучення додаткових цифрових інструментів, які надають актуальні дані про об'єкт, покращують аналітику та дозволяють приймати більш обґрунтовані рішення. Розглянемо основні групи таких технологій:

- 3D-сканування;
- системи моніторингу технічного стану (вологість, навантаження, коливання температури тощо);
- технології доповненої/віртуальної реальності (AR/VR).

geometric, material, and operational data into a single digital platform. Such a model is not merely a visual representation of the object but a full-fledged database for decision-making.

Alongside BIM, additional technologies are increasingly being implemented: 3D scanning, monitoring systems (humidity, load, temperature fluctuations, etc.), and AR/VR technologies for visualization and analysis. These tools do not fully replace engineering methods, but they significantly improve the accuracy, timeliness, and transparency of processes.

Building information modeling does not operate in isolation from other technologies. The effectiveness of BIM solutions largely depends on the integration of additional digital tools that provide up-to-date data about the asset, enhance analytics, and enable more informed decision-making. Let us consider the main groups of such technologies:

- 3D scanning;
- structural health monitoring systems (humidity, load, temperature fluctuations, etc);
- augmented reality/virtual reality technologies (AR/VR).

7.2.1. 3D-сканування

3D-сканування – це технологія фіксації геометрії об'єкта. Вона призначена для швидкого створення точного тривимірного цифрового зображення об'єкта (так званої «хмари точок»). Вона дозволяє створювати точну цифрову геометричну модель фізичного об'єкта. Використовується для фіксації фактичного стану будівель, оцінки деформацій, пошкоджень, а також для підготовки до реконструкції або сертифікації.

Основні технології:

- лазерне сканування – активна технологія, яка базується на лазерному випромінюванні та виявленні відбитого сигналу, забезпечує високу точність та продуктивність, підходить як для внутрішніх, так і для зовнішніх поверхонь;
- фотограмметрія – метод побудови 3D-моделі із серії зображень, зроблених під різними ракурсами, він менш точний, ніж лазерне сканування, але доступний та ефективний для багатьох завдань;
- LiDAR та AirLiDAR (аерофотограмметрія з використанням дронів) – використовуються для великих об'єктів або важкодоступних місць (дахи, фасади, ландшафти).

Інтеграція 3D-сканування з середовищем BIM.

1. Збір даних

Після проведення 3D-сканування генерується хмара точок,

7.2.1. 3D scanning

3D scanning is a technology for capturing the geometry of an object. It is designed for the rapid creation of an accurate three-dimensional digital representation of the object (known as a "point cloud"). It allows for the creation of a precise digital geometric model of a physical object. It is used to document the actual condition of buildings, assess deformations and damages, as well as for preparation for reconstruction or certification.

Main technologies:

- laser scanning is an active technology based on laser emission and detection of the reflected signal. It provides high accuracy and efficiency and is suitable for both interior and exterior surfaces.
- photogrammetry is a method of constructing a 3D model from a series of images taken from different angles. It is less accurate than laser scanning but is accessible and effective for many tasks.
- LiDAR and AirLiDAR (aerial photogrammetry using drones) are used for large objects or hard-to-reach areas (roofs, facades, landscapes).

Integration of 3D scanning with the BIM environment.

1. Data collection

After conducting 3D scanning, a point cloud is generated containing millions of spatially oriented points

що містить мільйони просторово орієнтованих точок, які точно описують геометрію об'єкта. Ці дані забезпечують високоточне представлення форми, розмірів та контурів об'єкта та можуть зберігатися в різних форматах, таких як .e57, .las, .rcp/.rcs (для Autodesk), .pts, .xyz та інших, що забезпечує сумісність із програмним забезпеченням для подальшої обробки.

2. Попередня обробка сканів

На цьому етапі виконується реєстрація, що означає об'єднання кількох окремих сканів в одну єдину 3D-модель. Для покращення якості хмари точок використовуються різні фільтри, такі як видалення шуму, зменшення надмірної щільності даних, відсікання рівня землі та усунення тимчасових об'єктів, таких як люди чи транспортні засоби. Орієнтація даних також здійснюється в загальній системі координат шляхом прив'язки до топографічних та геодезичних даних або сітки проєкту, що забезпечує точне розміщення моделі в просторі.

3. Імпорт у середовище BIM

Після попередньої обробки хмара точок експортується в середовище BIM, таке як Autodesk Revit, Archicad або BricsCAD BIM, де вона використовується як опорна геометрія для створення цифрової моделі об'єкта. Інтеграція часто здійснюється за допомогою спеціалізованих плагінів або стороннього програмного забезпечення, такого як

that accurately describe the geometry of the object. This data provides a highly precise representation of the shape, dimensions, and contours of the object and can be stored in various formats such as .e57, .las, .rcp/.rcs (for Autodesk), .pts, .xyz, and others, ensuring compatibility with software for further processing.

2. Preprocessing of scans

At this stage, registration is performed, which means merging several separate scans into a single unified 3D model. To improve the quality of the point cloud, various filters are used, such as noise removal, reduction of excessive data density, ground level clipping, and elimination of temporary objects like people or vehicles. The data is also oriented within a common coordinate system by referencing topographic and geodetic data or the project grid, ensuring accurate spatial placement of the model.

3. Import into the BIM environment

After preprocessing, the point cloud is exported into a BIM environment such as Autodesk Revit, Archicad, or BricsCAD BIM, where it is used as reference geometry for creating a digital model of the object. Integration is often performed using specialized plugins or third-party software, such as Autodesk ReCap, RealityCapture, or Agisoft Metashape,

Autodesk ReCap, RealityCapture або Agisoft Metashape, що забезпечує безперешкодний перехід від даних сканування до повноцінної BIM-моделі.

4. Побудова моделі на основі сканувань

Інформація, отримана з хмари точок, використовується для створення BIM-моделі, де архітектурні, конструктивні та інженерні елементи моделюються вручну або з частковою автоматизацією. Пріоритетом є точне відтворення фактичної геометрії, що особливо важливо для історичних об'єктів, де рівень деталізації (LOD) може сягати 300 і вище (до LOD 400–500 для реставраційних робіт).

5. Перевірка (порівняння фактичного стану з проєктним)

На цьому етапі BIM-модель накладається на хмару точок для перевірки геометричних відхилень, виявлення дефектів, що не відповідають проєктним даним, та документування незафіксованих змін у конструкції. Цей процес дозволяє порівняти стан «як є» та «як запроєктовано», а також забезпечує точну діагностику стану об'єкта.

6. Подальше використання BIM-моделі

Побудована BIM-модель стає основою для розрахунку обсягів, площ та оцінки витрат (5D), а також для планування робіт з технічного обслуговування та ремонту (4D/6D). Вона інтегрує технічні дані

which ensures a seamless transition from scan data to a fully developed BIM model.

4. Model creation based on scans

Information obtained from the point cloud is used to create a BIM model, where architectural, structural, and engineering elements are modeled manually or with partial automation. The priority is the accurate reproduction of the actual geometry, which is especially important for historic objects, where the level of detail (LOD) can reach 300 and above (up to LOD 400–500 for restoration work).

5. Verification (comparison of the as-built condition with the design)

At this stage, the BIM model is overlaid onto the point cloud to check for geometric deviations, identify defects that do not comply with the design data, and document unrecorded changes in the structure. This process allows for comparison of the "as-built" and "as-designed" conditions and provides an accurate diagnosis of the object's state.

6. Further use of the BIM model

The constructed BIM model becomes the basis for calculating volumes, areas, and cost estimation (5D), as well as for planning maintenance and repair works (4D/6D). It integrates technical data for each component (specifications, inspec-

для кожного компонента (специфікації, дати перевірок, матеріали, стан), що дозволяє ефективно управляти життєвим циклом активу.

7. Оновлення інформації

Під час повторних сканувань BIM-модель можна оновлювати, що дозволяє відстежувати зміни з часом, реєструвати нові пошкодження та вести журнал стану. Це забезпечує постійну актуальність даних та підтримує прийняття обґрунтованих рішень й управління активами.

7.2.2. Системи моніторингу стану конструкцій

Системи моніторингу стану будівельних конструкцій – це апаратно-програмні комплекси, що забезпечують безперервний або періодичний збір даних про фізичний стан будівельних конструкцій та мікроклімат у приміщеннях. Ці системи використовуються як під час експлуатації об'єкта, так і під час його реконструкції або технічного обстеження.

Типові параметри моніторингу.

Вологість – відносна вологість повітря в приміщенні та на вулиці або вміст води в матеріалі (наприклад, у деревині або кладці). Це критично важливо для довговічності матеріалів та ризику утворення цвілі або корозії.

Температура – моніторинг коливань температури дозволяє оцінити вплив зовнішніх умов на конструкції

tion dates, materials, condition), enabling effective asset lifecycle management.

7. Information updating

During repeated scans, the BIM model can be updated, allowing changes over time to be tracked, new damages to be recorded, and a condition log to be maintained. This ensures continuous data relevance and supports informed decision-making and asset management.

7.2.2. Structural condition monitoring systems

Structural condition monitoring systems are hardware-software complexes that provide continuous or periodic data collection on the physical condition of building structures and the indoor microclimate. These systems are used both during the operation of the facility and during its reconstruction or technical inspection.

Typical monitoring parameters.

Humidity refers to the relative humidity of the air indoors and outdoors, or the moisture content within materials (such as wood or masonry). This is critically important for the durability of materials and the risk of mold growth or corrosion.

Temperature – monitoring temperature fluctuations allows for assessing the impact of external conditions on structures and helps

та допомагає підтримувати комфортні умови всередині приміщень.

Напруження – тензодатчики, встановлені на конструкціях, вимірюють рівень статичних або динамічних навантажень. Це дозволяє виявляти перевантаження або нерівномірний розподіл маси.

Інсоляція (природне освітлення) – моніторинг рівня природного освітлення в приміщеннях важливий для енергоефективності, гігієнічних стандартів та комфорту користувачів. Він впливає на рішення щодо розміщення перегородок, вибору фасадних матеріалів тощо.

Датчики деформації – вони вимірюють зміни форми або зміщення елементів конструкції внаслідок навантажень, впливу температури, осідання ґрунту або інших факторів. Вони необхідні для моніторингу аварійних умов або проведення довгострокового аналізу поведінки конструкцій.

Інтеграція систем моніторингу стану конструкцій з BIM.

1. Зв'язок датчиків з елементами BIM-моделі.

Під час інтеграції систем моніторингу в BIM кожен датчик, встановлений на конструкції, безпосередньо пов'язується з певним елементом цифрової моделі (наприклад, певною стіною, плитою перекриття або конструкцією даху). Це досягається шляхом зв'язування координат або параметричного зв'язку, що дозволяє точно

maintain comfortable indoor environments.

Stress – strain gauges installed on structures measure the level of static or dynamic loads. This allows for detecting overloads or uneven weight distribution.

Insolation (natural lighting) – monitoring the level of natural lighting indoors is important for energy efficiency, hygiene standards, and user comfort. It influences decisions regarding the placement of partitions, selection of façade materials, and so on.

Deformation sensors – these measure changes in shape or displacement of structural elements due to loads, temperature effects, soil settlement, or other factors. They are essential for monitoring emergency conditions or conducting long-term analysis of structural behavior.

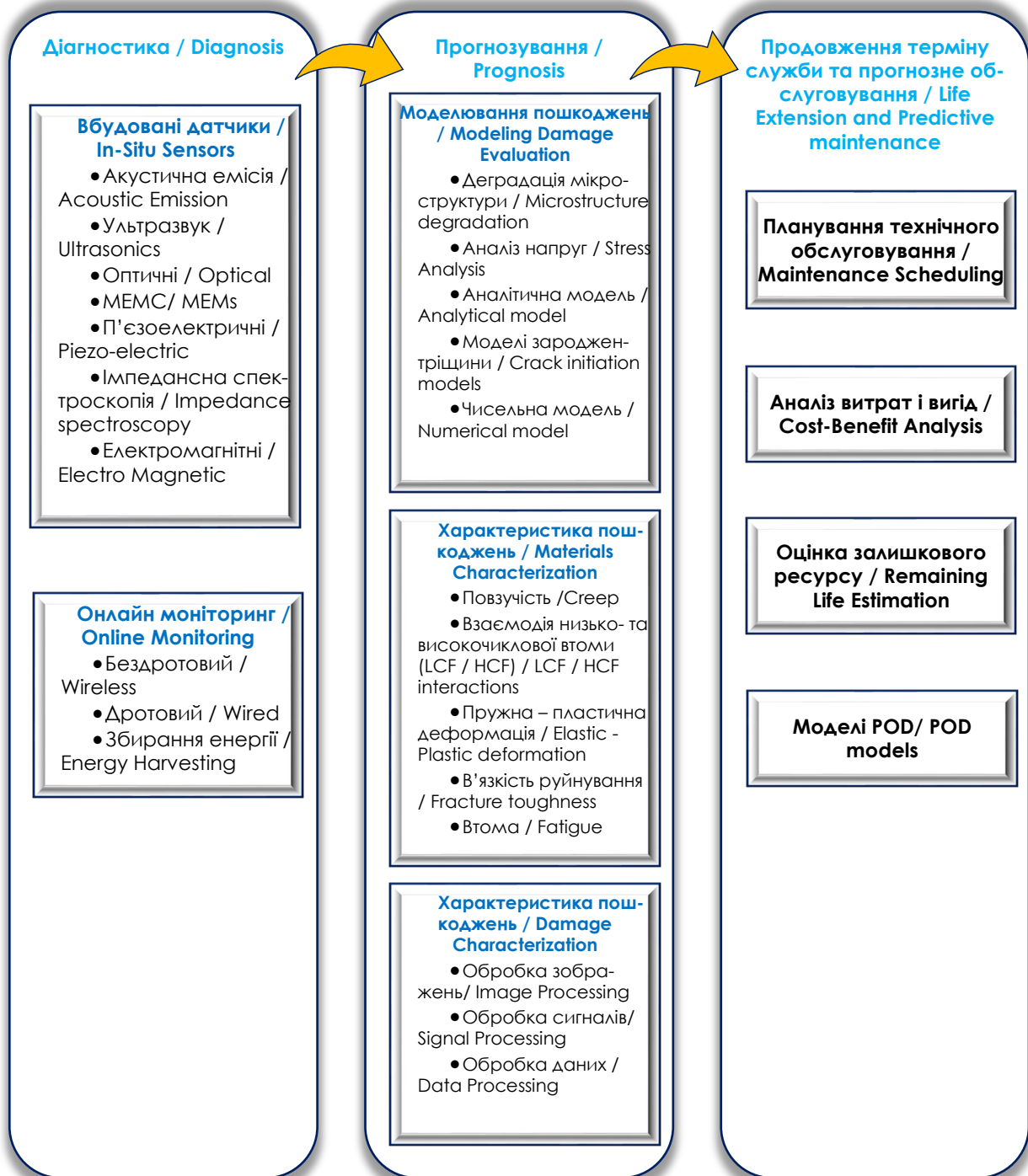
Integration of structural condition monitoring systems with BIM.

1. Linking sensors to BIM model elements.

During the integration of monitoring systems into BIM, each sensor installed on the structure is directly linked to a specific element of the digital model (for example, a particular wall, floor slab, or roof structure). This is achieved by associating coordinates or using parametric linking, which allows precise determination of the sensor's location in

визначити розташування датчика в 3D-просторі (рис. 7.2). Такий підхід гарантує, що дані, отримані від датчиків, можуть автоматично відображатися у відповідних областях BIM-моделі, що дозволяє точно контролювати технічний стан об'єкта.

3D space (see Fig. 7.2). This approach ensures that data received from the sensors can be automatically displayed in the corresponding areas of the BIM model, enabling accurate monitoring of the facility's technical condition.



**Рис. 7.2. Розвиток та вдосконалення SHM у будівлях /
Development and improvement of SHM in buildings**

2. Інтеграція даних датчиків у середовище BIM.

Після того, як датчики пов'язані з елементами моделі, зібрані ними дані (наприклад, температура, вологість, деформація) передаються до системи BIM через API або стандартизовані формати обміну даними (такі як IFC або COBie). Цей процес дозволяє автоматично оновлювати параметри в цифровій моделі, надаючи фахівцям доступ до інформації про стан кожного конструктивного елемента в режимі реального часу без необхідності ручного введення даних (рис. 7.3).

2. Integration of sensor data into the BIM environment.

After the sensors are linked to model elements, the data they collect (such as temperature, humidity, deformation) is transmitted to the BIM system via APIs or standardized data exchange formats (such as IFC or COBie). This process allows automatic updating of parameters in the digital model, providing specialists with real-time access to information about the condition of each structural element without the need for manual data entry (see Fig. 7.3).

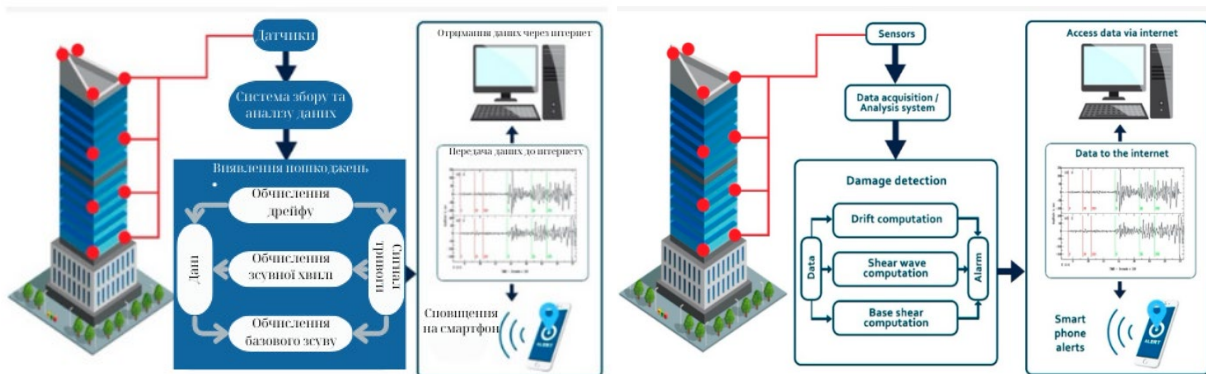


Рис. 7.3. Принцип роботи сенсорної системи в багатоповерховому будинку / Operating principle of the sensor system in a multi-story building

3. Візуалізація стану конструкції в режимі реального часу.

Завдяки інтеграції даних датчиків, BIM-модель оновлюється в режимі реального часу, що дозволяє негайно візуалізувати критичні показники, такі як зміни температури, вологості або рівня напруження. Інтерфейс системи може відображати ці дані за допомогою кольорових індикаторів або графічних панелей інструментів, що допомагає оперативно виявляти відхилення від

3. Real-time visualization of structural condition.

Thanks to the integration of sensor data, the BIM model is updated in real time, allowing immediate visualization of critical indicators such as changes in temperature, humidity, or stress levels. The system interface can display this data using color-coded indicators or graphical dashboards, helping to promptly detect deviations from the norm

норми та своєчасно реагувати на потенційні проблеми.

4. Аналіз даних та прогнозування.

Зібрані дані датчиків зберігаються в базах даних середовища BIM, що дозволяє проводити ретроспективний аналіз. Використовуючи історичні дані, алгоритми машинного навчання можна застосовувати для прогнозування майбутньої деградації або потенційних сценаріїв збоїв (рис. 7.4). Це сприяє плануванню превентивних заходів та оптимізації графіків технічного обслуговування, що зрештою підвищує безпеку та довговічність будівель.

5. Підтримка технічного обслуговування та ремонту (6D/7D BIM).

Інтегровані дані систем моніторингу використовуються для розробки детальних графіків робіт із технічного обслуговування та ремонту. Середовище BIM, особливо на рівнях 6D та 7D, не лише зберігає інформацію про стан конструкцій, але й дозволяє керувати процесами ремонту, реєструвати дефекти та автоматизовано генерувати запити на технічне обслуговування. Це сприяє ефективнішому управлінню життєвим циклом активу.

and respond in a timely manner to potential issues.

4. Data analysis and forecasting.

The collected sensor data is stored in BIM environment databases, enabling retrospective analysis. Using historical data, machine learning algorithms can be applied to predict future degradation or potential failure scenarios (see Fig. 7.4). This supports planning preventive measures and optimizing maintenance schedules, ultimately enhancing the safety and durability of buildings.

5. Support for maintenance and repair (6D/7D BIM)

Integrated monitoring system data is used to develop detailed maintenance and repair schedules. The BIM environment, especially at the 6D and 7D levels, not only stores information about the condition of structures but also enables management of repair processes, recording of defects, and automated generation of maintenance requests. This contributes to more efficient asset lifecycle management.



Рис. 7.4. Аналіз даних та прогнозування / Data analysis and forecasting

6. *Сумісність з іншими платформами.*

Системи моніторингу зазвичай працюють незалежно, але завдяки використанню протоколів відкритих даних їх можна легко інтегрувати із середовищем BIM. Такі інтеграції часто реалізуються через хмарні платформи (наприклад, Azure Digital Twins, Siemens Twin, Hexagon), що дозволяє обмінюватися даними між різними системами та забезпечує єдине уявлення про стан активу з усіх джерел. Це значно підвищує ефективність аналізу та прийняття рішень на всіх етапах експлуатації та технічного обслуговування.

6. *Compatibility with other platforms.*

Monitoring systems usually operate independently, but thanks to the use of open data protocols, they can be easily integrated with the BIM environment. Such integrations are often implemented through cloud platforms (for example, Azure Digital Twins, Siemens Twin, Hexagon), which enable data exchange between different systems and provide a unified view of the asset's condition from all sources. This significantly improves the efficiency of analysis and decision-making at all stages of operation and maintenance.

Отримані дані передаються до інформаційної моделі будівлі (BIM) у режимі реального часу, формуючи цифровий «паспорт стану» об'єкта, який оновлюється автоматично. Це дозволяє обґрунтовано приймати рішення щодо експлуатації об'єкта, планувати технічне обслуговування, довгостроково прогнозувати поведінку стану конструкції та за рахунок аналізу підвищувати безпеку для користувачів будівлі.

7.2.3. Технології доповненої/віртуальної реальності (AR/VR)

AR (доповнена реальність) – це технологія, яка дозволяє накладати цифрову інформацію на фізичне середовище в режимі реального часу (рис. 7.5). Дані з BIM-моделі (3D-геометрія, анотації, технічні параметри) відображаються безпосередньо на реальних елементах через мобільні пристрої (смартфони, планшети), окуляри AR (такі як HoloLens, Magic Leap) або спеціалізовані додатки.

The collected data is transmitted to the building information model (BIM) in real time, forming a digital “condition passport” of the asset, which is updated automatically. This enables informed decision-making regarding the facility's operation, maintenance planning, long-term forecasting of structural behavior, and, through analysis, enhances the safety of building users.

7.2.3. Augmented/virtual reality (AR/VR) technologies

AR (augmented reality) is a technology that allows digital information to be overlaid onto the physical environment in real time (see Fig. 7.5). Data from the BIM model (3D geometry, annotations, technical parameters) is displayed directly on real elements through mobile devices (smartphones, tablets), AR glasses (such as HoloLens, Magic Leap), or specialized applications.



Рис. 7.5. Візуалізація конструкції мосту за допомогою окулярів доповненої реальності / Visualization of a bridge structure using augmented reality glasses

Типові випадки використання

Огляд об'єктів за допомогою візуалізації BIM-моделі – доповнена реальність використовується для накладання цифрової моделі будівлі на фізичне середовище на місці — чи то на будівельному майданчику, чи на операційному об'єкті. За допомогою мобільного пристрою або окулярів доповненої реальності користувач може переглядати як геометрію, так і приховані конструктивні елементи, такі як трубопроводи, електричні мережі або вентиляційні канали, що критично важливо під час монтажу або контролю якості на відповідність проектним даним.

Управління дефектами – це передбачає можливість документувати виявлені пошкодження або відхилення безпосередньо в середовищі доповненої реальності (AR). Інженер або технік може позначити дефект на моделі в режимі реального часу, додати фотографію, текстову примітку або аудіокоментар, який автоматично додається до відповідного елемента моделі. Це рішення забезпечує чітку візуалізацію проблемних областей та пришвидшує зворотний зв'язок команди та вирішення проблем.

Керівництво зі складання або технічного обслуговування – функціональність, де AR надає покрокові інструкції, пов'язані з певними елементами конструкції. За допомогою пристроїв AR працівники отримують візуальні інструкції

Typical use cases

Site inspections using BIM model visualization – augmented reality is used to overlay the digital model of a building onto the physical environment on-site — whether at a construction site or an operational facility. With a mobile device or AR glasses, the user can view both the geometry and hidden structural elements, such as pipelines, electrical networks, or ventilation ducts, which is critical during installation or quality control to ensure compliance with design data.

Defect management – this involves the ability to document detected damages or deviations directly within the augmented reality (AR) environment. An engineer or technician can mark a defect on the model in real time, add a photo, text note, or audio comment, which is automatically linked to the corresponding model element. This solution provides clear visualization of problem areas and speeds up team feedback and issue resolution.

Assembly or maintenance guidance – a functionality where AR provides step-by-step instructions related to specific structural elements. Using AR devices, workers receive visual instructions for assembly or maintenance procedures, reducing the likelihood of errors and increasing work efficiency.

щодо процедур складання або технічного обслуговування, що зменшує ймовірність помилок та підвищує ефективність роботи.

Відображення даних моніторингу в режимі реального часу – інтеграція даних датчиків стану конструкцій безпосередньо у віртуальне середовище. Наприклад, температура, вологість або рівні напружень у конструкціях можуть відображатися в доповненій реальності (AR) у вигляді числових значень або індикаторів безпосередньо над відповідними елементами будівлі, що дозволяє оперативно оцінювати стан та ухвалювати рішення без звернення до зовнішніх систем.

Інтеграція AR/VR з BIM

Для інтеграції технології AR (доповненої реальності) з BIM-моделлю необхідно виконати кілька підготовчих кроків. По-перше, **BIM-модель потрібно оптимізувати**, тобто спростити, щоб забезпечити правильне та швидке відображення на мобільних пристроях або в AR-окулярах. Наприклад, можна видалити непотрібні дрібні елементи та зменшити рівень деталізації, щоб уникнути перевантаження системи.

Після оптимізації модель завантажувється на спеціалізовану AR-платформу, яка підтримує взаємодію з BIM-даними. Це можуть бути такі сервіси, як Trimble SiteVision, Fologram, VisualLive, ARki або інші програми, здатні інтерпретувати BIM-структуру та накладати її на реальний світ.

Real-time monitoring data display – integration of structural condition sensor data directly into the virtual environment. For example, temperature, humidity, or stress levels in structures can be displayed in augmented reality (AR) as numerical values or indicators directly above the corresponding building elements, allowing prompt assessment of condition and decision-making without referring to external systems.

Integration of AR/VR with BIM

To integrate AR (augmented reality) technology with a BIM model, several preparatory steps must be taken. First, **the BIM model needs to be optimized**, meaning simplified to ensure proper and fast rendering on mobile devices or AR glasses. For example, unnecessary small elements can be removed and the level of detail reduced to avoid system overload.

After optimization, the model is uploaded to a specialized AR platform that supports interaction with BIM data. These can include services such as Trimble SiteVision, Fologram, VisualLive, ARki, or other applications capable of interpreting the BIM structure and overlaying it onto the real world.

The next important step is aligning the model with the physical space. This is achieved using GPS coordinates, QR markers, or spatial

Наступним важливим кроком є вирівнювання моделі з фізичним простором. Це досягається за допомогою GPS-координат, QR-маркерів або систем просторового розпізнавання (SLAM). Це гарантує, що цифрова модель точно відповідає реальній будівлі за масштабом та положенням, дозволяючи користувачеві через камеру бачити, наприклад, вентиляційний канал або кабельний лоток «всередині» стіни – саме там, де він має бути.

Після успішного вирівнювання інформація з BIM-моделі динамічно відображається у фізичному середовищі. Це означає, що користувач може бачити в режимі реального часу:

- розміри та параметри конструктивних елементів;
- їхній матеріал, стан, дата встановлення;
- показники датчиків у реальному часі (температура, вологість, напруга тощо);
- а також коментарі та примітки, зроблені під час перевірок.

Оскільки AR-платформи синхронізовані з BIM-системою, будь-які зміни в моделі (після сканування, моніторингу або ручного редагування) можна оновлювати в AR-інтерфейсі. Це дозволяє фахівцям працювати з найактуальнішими даними безпосередньо на об'єкті, без паперових креслень чи постійних запитів до конструкторського відділу.

recognition systems (SLAM). This ensures that the digital model precisely corresponds to the real building in scale and position, allowing the user, through the camera, to see, for example, a ventilation duct or cable tray "inside" a wall—exactly where it should be.

After successful alignment, information from the BIM model is dynamically displayed in the physical environment. This means the user can see it in real time:

- dimensions and parameters of structural elements;
- their material, condition, and installation date;
- real-time sensor readings (temperature, humidity, stress, etc.);
- as well as comments and notes made during inspections.

Since AR platforms are synchronized with the BIM system, any changes in the model (after scanning, monitoring, or manual editing) can be updated in the AR interface. This allows specialists to work with the most up-to-date data directly on-site, without paper drawings or constant requests to the design department.

Таблиця 7.1 – Основні дослідження та застосування AR/VR у цивільному будівництві

Table 7.1 – Key research and applications of AR/VR in civil engineering

Рік / Year	ScienceDirect	ASCE (Американське товариство інженерів-цивільників) / ASCE (American Society of Civil Engineers)	Основні досягнення / Key achievements	Основні напрямки досліджень / Main research areas
До 2000 / Before 2000	9	1	Тренувальні симуляції / Training simulations	Аерокосмічна сфера, реклама / Aerospace sector, advertising
2000-2005	18	11	Візуалізація архітектурних моделей / Architectural model visualization	Мобільна доповнена реальність (AR) / Mobile augmented reality (AR)
2005-2010	47	44	Engineering education, staff training	Використання AR для геолокації фотограмметрії / Use of AR for photogrammetry geolocation
2010-2015	138	66	Віртуальне проектування (VDC), огляд та інспекція об'єктів / Virtual design and construction (VDC), site review and inspection	Взаємодія з об'єктами, безмаркерна AR, GNSS, BIM з AR / Interaction with objects, markerless AR, GNSS, BIM with AR
2015 – Зараз / 2015-Now	101	51	Управління активами / Asset management	Робота з хмарами точок у AR / Working with point clouds in AR

Інтеграція забезпечує ефективну взаємодію між фізичним активом та його цифровою моделлю, покращує розуміння процесів на місці та пришвидшує ухвалення рішень у будівництві, технічному обслуговуванні та реконструкції.

VR (віртуальна реальність) – це технологія, яка забезпечує повне

Integration ensures effective interaction between the physical asset and its digital model, improves understanding of on-site processes, and accelerates decision-making in construction, maintenance, and renovation.

VR (virtual reality) is a technology that provides full immersion in a digital environment created based

занурення в цифрове середовище, створене на основі BIM-моделі, за допомогою спеціалізованих гарнітур (таких як Oculus Rift/Quest, HTC Vive, Valve Index та інших). Користувач розміщується всередину моделі в масштабі 1:1, з можливістю переміщення, взаємодії з об'єктами та, в деяких випадках, модифікації середовища.

Типові випадки використання.

Презентація перед проєктуванням — використовуючи технології AR/VR, клієнт може віртуально пройтися об'єктом до початку будівництва. Це дозволяє завчасно ознайомитися із запропонованими просторовими рішеннями та допомогти виявити потенційні проблеми до фактичного початку будівництва.

Узгодження архітектурних та планувальних рішень – VR-технології створюють реальне «відчуття простору», сприяючи точнішій координації між архітекторами, інженерами та клієнтами. Усі учасники проєкту можуть спільно оцінити дизайн, пропорції та функціональність будівлі в інтерактивному середовищі.

Тестування сценаріїв для реконструкцій – VR-платформи дозволяють моделювати різні варіанти реконструкції, включаючи зміни обсягів, планування, а також додавання або видалення конструктивних елементів. Це дає змогу перевірити доцільність проєктних рішень та оптимізувати проєкт до початку фактичних робіт.

on a BIM model, using specialized headsets (such as Oculus Rift/Quest, HTC Vive, Valve Index, and others). The user is placed inside the model at a 1:1 scale, with the ability to move around, interact with objects, and, in some cases, modify the environment.

Typical use cases.

Pre-design presentation – using AR/VR technologies, the client can virtually walk through the facility before construction begins. This allows early familiarization with the proposed spatial solutions and helps identify potential problems before actual construction starts.

Coordination of architectural and planning decisions – VR technologies create a real “sense of space,” facilitating more precise coordination among architects, engineers, and clients. All project participants can jointly evaluate the design, proportions, and functionality of the building in an interactive environment.

Testing scenarios for renovations – VR platforms allow modeling different renovation options, including changes in volumes, layouts, as well as the addition or removal of structural elements. This enables checking the feasibility of design decisions and optimizing the project before actual work begins.

Навчання персоналу – віртуальна реальність (VR) дозволяє створювати симульовані сценарії, наприклад, для технічного обслуговування, евакуації або надзвичайних ситуацій, що дозволяє персоналу відпрацьовувати свої дії в безпечному віртуальному середовищі, тим самим підвищуючи свою кваліфікацію та готовність до надзвичайних ситуацій.

Віртуальні інспекції – технології віртуальної реальності дозволяють здійснювати дистанційний контроль за об'єктом. Експерти можуть оглядати будівлю, залишати коментарі та документувати спостереження без фізичної присутності. Це значно підвищує швидкість та точність оцінки стану, особливо в зонах з обмеженим доступом.

Інтеграція з BIM.

Щоб мати змогу використовувати віртуальну реальність разом із BIM-моделлю, необхідно забезпечити сумісність форматів даних. По-перше, модель, створена в BIM-середовищі (наприклад, Autodesk Revit, Archicad, Allplan), експортується у формат, який розпізнає VR-система. Це можуть бути такі формати, як FBX, OBJ, glTF, або специфічні інтеграції з ігровими движками, такими як Unreal Engine або Unity. Ці движки використовуються для створення захопливих віртуальних середовищ, де користувачі можуть «орієнтуватися» всередині моделі (рис. 7.6).

Staff training – virtual reality (VR) allows the creation of simulated scenarios, for example, for maintenance, evacuation, or emergencies, enabling personnel to practice their actions in a safe virtual environment, thereby increasing their qualifications and readiness for emergencies.

Virtual inspections – virtual reality technologies allow remote monitoring of the facility. Experts can inspect the building, leave comments, and document observations without physical presence. This significantly increases the speed and accuracy of condition assessments, especially in restricted-access areas.

Integration with BIM.

To be able to use virtual reality together with a BIM model, it is necessary to ensure data format compatibility. First, the model created in the BIM environment (e.g., Autodesk Revit, Archicad, Allplan) is exported to a format recognized by the VR system. These can be formats such as FBX, OBJ, glTF, or specific integrations with game engines such as Unreal Engine or Unity. These engines are used to create immersive virtual environments where users can “navigate” inside the model (Fig. 7.6).

VR platforms are integrated with the BIM environment in such a way

VR-платформи інтегровані з середовищем BIM таким чином, що будь-які зміни, внесені до віртуальної моделі (наприклад, виявлені конфлікти або відгуки клієнтів), можуть бути записані та передані назад у BIM-систему для подальшої обробки. Таким чином, VR стає повноцінною частиною робочого процесу проєкту, а не просто інструментом візуалізації.

that any changes made to the virtual model (for example, detected clashes or client feedback) can be recorded and sent back to the BIM system for further processing. Thus, VR becomes a full-fledged part of the project workflow rather than just a visualization tool.

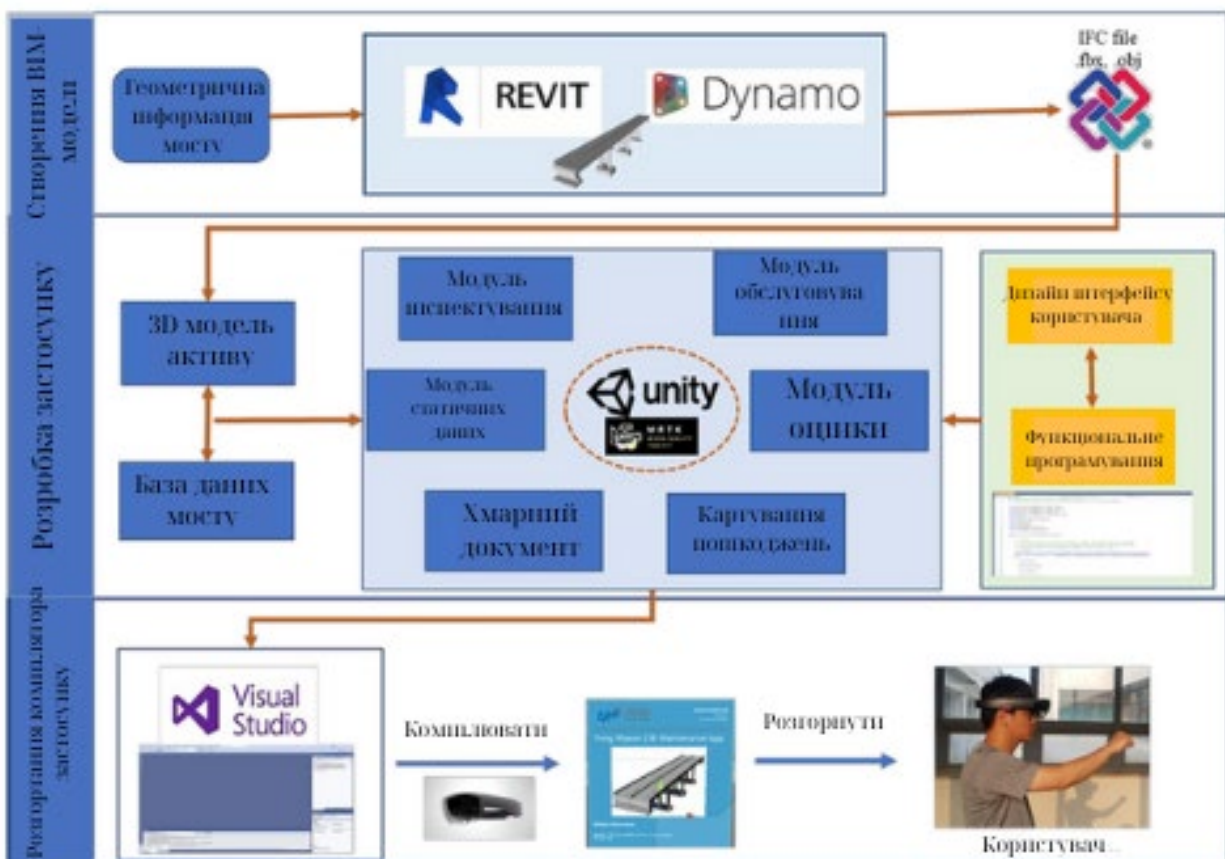


Рис. 7.6. Інтеграція BIM із системами моніторингу для покращеного управління будівлями / Integration of BIM with monitoring systems for improved building management

Інтеграція AR/VR з BIM значно спрощує процес прийняття рішень, покращує просторове розуміння для неспеціалістів та покращує якість комунікації між усіма учасниками проєкту – від архітектора до клієнта.

The integration of AR/VR with BIM significantly simplifies the decision-making process, enhances spatial understanding for non-specialists, and improves communication quality among all project participants – from the architect to the client.

7.3. Роль інформаційного моделювання в сучасному будівництві та його впровадження в Україні

Інформаційне моделювання в Україні розвивається як доповнення до існуючих методів. Його впровадження відбувається поетапно, з поступовим розширенням сфер застосування – від нового будівництва до реконструкції та управління об'єктами, включаючи будівлі, що мають історичну цінність або пошкоджені внаслідок військових дій.

Інформаційне моделювання допомагає скоротити час проектування та покращити якість різних типів конструкцій. Воно також дозволяє ефективніше підтримувати структурну цілісність протягом усього життєвого циклу об'єкта. Завдяки розвитку систем інформаційного моделювання будівель (BIM), процеси проектування можна виконувати з мінімальними витратами часу та людських ресурсів.

Хоча в Україні інформаційне моделювання часто сприймається насамперед як інструмент для скорочення часу проектування, ідея зменшення участі людини в процесі проектування все ще сприймається зі скептицизмом. Однак реальність така, що технології інформаційного моделювання дозволяють своєчасно виявляти експлуатаційні проблеми та оперативно усувати дефекти або негативні наслідки, які

7.3. The role of information modeling in modern construction and its implementation in Ukraine

Information modeling in Ukraine is developing as a complement to existing methods. Its implementation is carried out gradually, with a progressive expansion of application areas—from new construction to renovation and asset management, including buildings of historical value or those damaged as a result of military actions.

Information modeling helps reduce design time and improve the quality of various types of structures. It also enables more effective support of structural integrity throughout the entire lifecycle of an asset. Thanks to the development of Building Information Modeling (BIM) systems, design processes can be performed with minimal time and human resource expenditure.

Although in Ukraine information modeling is often perceived primarily as a tool to shorten design time, the idea of reducing human involvement in the design process is still met with skepticism. However, the reality is that information modeling technologies allow timely identification of operational issues and prompt elimination of defects or negative consequences, which

відображаються в режимі реального часу. Безсумнівно, кваліфіковані фахівці все ще потрібні для контролю цього процесу, але в поєднанні з використанням сучасних технологій їхня участь стає значно економічно вигіднішою порівняно з традиційними методами обслуговування будівель.

7.4. Ключові учасники процесу та їхня зацікавленість у моделі BIM

Основними ініціаторами та активними промоутерами впровадження BIM в архітектурну та будівельну практику є прогресивні проєктувальники, переважно архітектори. Вони першими оцінили переваги цієї нової технології та поступово почали впроваджувати її у свою роботу, що, у свою чергу, спонукало інших учасників процесів проєктування та будівництва до взаємодії з інформаційним моделюванням будівель.

Чим тісніше інші спеціалісти пов'язані з проєктувальниками, тим швидше вони залучаються до нового процесу. Це можна підтвердити, розглянувши історію розробки BIM у малому масштабі – програмного забезпечення, пов'язаного з BIM. Практично всі програми спочатку зосереджувалися на архітектурних розділах або спеціалізованих архітектурних версіях, і лише пізніше додавали інші модулі та

are reflected in real time. Undoubtedly, qualified specialists are still necessary to oversee this process, but combined with modern technologies, their involvement becomes significantly more cost-effective compared to traditional building maintenance methods.

7.4. Key stakeholders in the process and their interests in the BIM model

The main initiators and active promoters of BIM implementation in architectural and construction practice are progressive designers, primarily architects. They were the first to recognize the advantages of this new technology and gradually began to integrate it into their work, which, in turn, encouraged other participants in the design and construction processes to engage with building information modeling.

The closer other specialists are connected to the designers, the faster they get involved in the new process. This can be confirmed by examining the development history of BIM on a small scale — software related to BIM. Almost all programs initially focused on architectural sections or specialized architectural versions and only later added other modules and programs (structural design,

програми (проектування конструкторських, електричні системи, вентиляція тощо). Це не дивно, враховуючи особливу (навіть домінуючу) роль, яку проєктувальники відіграють у процесі проєктування будівель.

Проектувальники є «епіцентром» впровадження нової технології інформаційного моделювання будівель (BIM) у звичайну професійну практику, оскільки, як правило, саме вони ініціюють проєкт. Більше того, згідно зі встановленою практикою в західних країнах, вони також координують його виконання. Таким чином, проєктувальники встановлюють стандарти та підходи до проєктування, яких згодом дотримуються всі інші фахівці.

Однак можливості лише проєктувальників обмежені – основна перевага BIM полягає у всебічній співпраці над проєктом, що вимагає тісного розуміння та взаємодії між фахівцями з різних галузей: проєктування, оцінка та розрахунки вартості, виробництво будівельних елементів, будівництво, управління об'єктами та багато інших.

Основні групи фахівців, безпосередньо задіяних у BIM, ті хто беруть участь як у створенні, так і у використанні моделі, представлені на діаграмі (рис. 7.7). Однак у центрі цієї діаграми, і, можливо, як не дивно, знаходяться не проєктувальники, а власники будівель.

electrical systems, ventilation, etc.). This is unsurprising, given the special (even dominant) role that designers play in the building design process.

Designers are the “epicenter” of introducing the new building information modeling (BIM) technology into regular professional practice since they typically initiate the project. Moreover, according to established practice in Western countries, they also coordinate its execution. Thus, designers set the standards and approaches to design that all other specialists subsequently follow.

However, the capabilities of designers alone are limited — the main advantage of BIM lies in comprehensive collaboration on the project, which requires close understanding and interaction among specialists from various fields: design, cost estimation and calculation, manufacturing of building elements, construction, facility management, and many others.

The main groups of specialists directly involved in BIM, those who participate both in creating and using the model, are shown in the diagram (Fig. 7.7). However, at the center of this diagram, and perhaps surprisingly, are not the designers but the building owners. It is

Саме власники найбільше зацікавлені у комплексному та ефективному підході до управління та вирішення питань, пов'язаних з нерухомістю, якою вони володіють.

the owners who are most interested in a comprehensive and efficient approach to managing and resolving issues related to the real estate they possess.

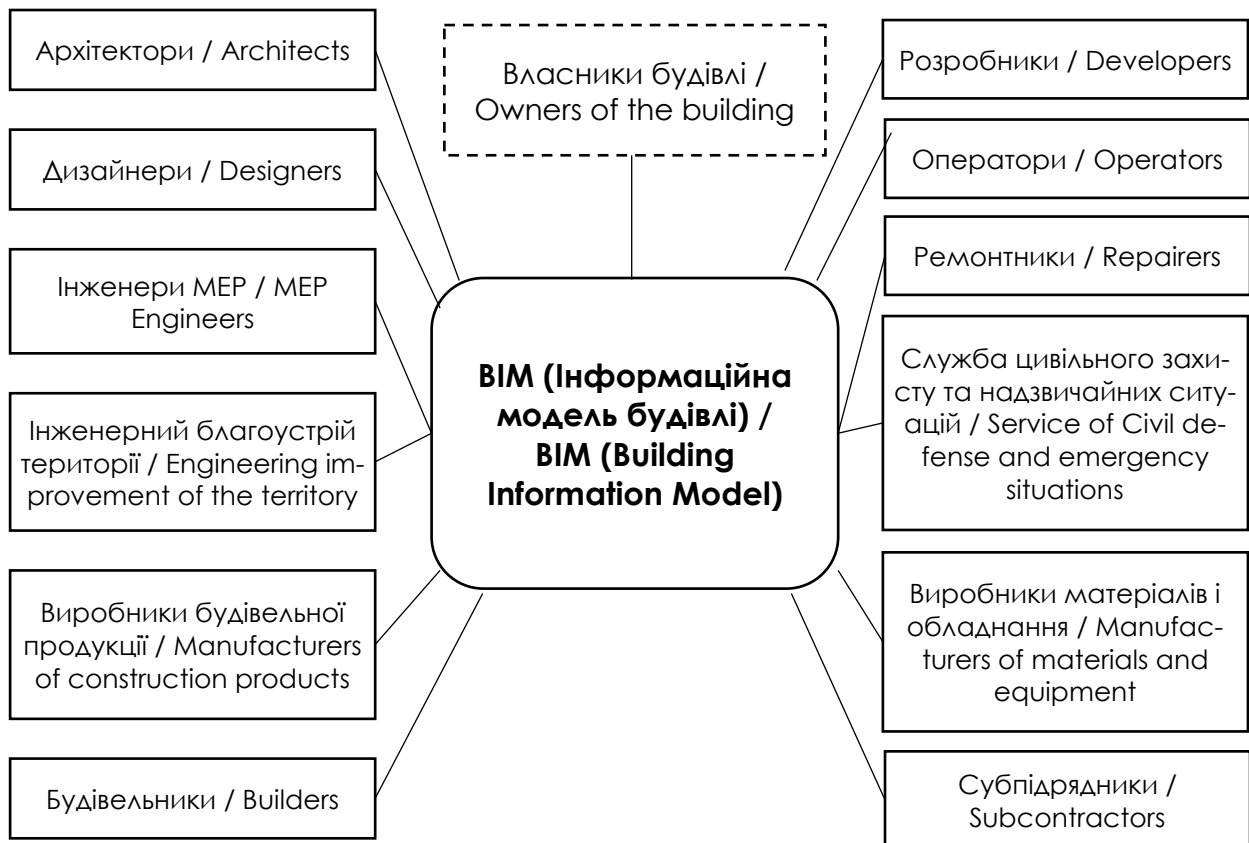


Рис. 7.7. Основні користувачі інформаційної моделі будівлі / Main users of the building information model

Слід зазначити, що досвід впровадження BIM у розвинених країнах чітко показує, що в більшості випадків лише після того, як власники (чи то приватні особи, чи то державні установи) визнають переваги BIM та приймуть концепцію інформаційного моделювання будівель, інші учасники, залучені до роботи з активом, починають активно використовувати нову технологію.

Взаємодія учасників процесу BIM в управлінні даними.

It should be noted that the experience of BIM implementation in developed countries clearly shows that, in most cases, only after owners (whether private individuals or public institutions) recognize the benefits of BIM and accept the concept of building information modeling do other participants involved in working with the asset begin to actively use the new technology.

Interaction of BIM Process Participants in Data Management

BIM, як модель інформації про будівлю, містить повну та достатню інформацію для підтримки всіх процесів протягом життєвого циклу будівлі, і ця інформація може бути безпосередньо інтерпретована програмними застосунками. Вона включає інформацію про саму будівлю, її компоненти, а також про її функції, форму, матеріали та процеси життєвого циклу.

Однак це визначення підкреслює суперечність у сучасному розумінні BIM та його можливостей: BIM – це модель, яка за своєю природою є статичною – вона описує заморожений знімок конкретної реальності в певний момент часу, водночас прагнучи підтримувати процеси життєвого циклу будівлі, які можна охарактеризувати як управління знаннями.

Основна відмінність між використанням BIM (моделі) та попередніми технологіями полягає в тому, що інформація зберігається в чіткій, формальній та зрозумілій формі. На відміну від цього, традиційні креслення призначені для інтерпретації людиною. Інформація, що міститься в кресленнях, може бути неоднозначною, оскільки вона часто містить надлишкові дані. Це означає, що один і той самий факт може бути виражений більше одного разу (наприклад, у плані, розрізі чи звіті). Це створює ризик того, що інформація може стати суперечливою, особливо під час внесення змін.

BIM, as a building information model, contains complete and sufficient information to support all processes throughout the building's lifecycle, and this information can be directly interpreted by software applications. It includes information about the building itself, its components, as well as its functions, form, materials, and lifecycle processes.

However, this definition highlights a contradiction in the modern understanding of BIM and its capabilities: BIM is a model that by its nature is static — it describes a frozen snapshot of a specific reality at a certain point in time, while at the same time aiming to support building lifecycle processes, which can be characterized as knowledge management.

The main difference between using BIM (the model) and previous technologies is that information is stored in a clear, formal, and understandable form. In contrast, traditional drawings are intended for human interpretation. The information contained in drawings may be ambiguous because it often contains redundant data. This means that the same fact can be expressed more than once (for example, in a plan, section, or report). This creates the risk that information may become contradictory, especially when changes are made. Moreover,

Крім того, креслення часто не мають додаткової інформації, такої як процедурні дані або обґрунтування ухвалення рішень.

З іншого боку, ідеальна BIM-модель зберігає дані в ненадлишковій формі, тобто кожен факт або фрагмент інформації записується лише один раз. Така модель служить «головною» моделлю для створення інших моделей (таких як креслення), які неминуче міститимуть надлишкові дані. Це пояснюється тим, що на практиці надмірності неможливо повністю уникнути, і іноді вона необхідна, наприклад, для різних видів, необхідних різними дисциплінами, такими як проектування, структурний аналіз або будівництво.

Управління інформацією та знаннями в моделі BIM.

Передумовою для визначення відповідного носія знань є розуміння «компетентностей» окремих працівників та команд. Компетентність найчастіше стосується передумов або здатності виконувати певну діяльність чи професію. Компетентність означає здатність виконувати певну роботу, бути здатним її виконувати та володіти необхідними навичками. Цей підхід підкреслює внутрішню якість людини, яка є результатом розвитку, більш-менш незалежного від зовнішнього світу, що дозволяє досягти бажаного рівня продуктивності.

drawings often lack additional information such as procedural data or rationale for decision-making.

On the other hand, an ideal BIM model stores data in a non-redundant form, meaning each fact or piece of information is recorded only once. Such a model serves as the “master” model for creating other models (such as drawings), which inevitably contain redundant data. This is explained by the fact that in practice redundancy cannot be completely avoided, and sometimes it is necessary, for example, for different views required by various disciplines such as design, structural analysis, or construction.

Information and Knowledge Management in the BIM Model

A prerequisite for defining the appropriate knowledge carrier is understanding the “competencies” of individual workers and teams. Competency most often relates to the prerequisites or ability to perform a certain activity or profession. Competency means the ability to perform a certain task, being able to perform it, and possessing the necessary skills. This approach emphasizes the internal quality of a person, which is the result of development, more or less independent of the external world, allowing the achievement of a desired level of performance.

Використання концепції компетентності у створенні моделей знань.

Для організацій та команд визначення вимог до компетентності працівників є однією з фундаментальних потреб – кожна посада (кожен працівник знань) має специфічні вимоги до компетентності та кваліфікації. Тому важливо зосередитися на повному спектрі характеристик, таких як кваліфікація, досвід, знання, навички, мотивація, ставлення та особистісні риси, що стосуються ролі чи посади.

Розуміння компетенцій окремих працівників і команд є необхідною умовою для визначення відповідних носіїв знань. Компетентність стосується здатності виконувати певну роботу, практикувати її, бути кваліфікованим у відповідній галузі та володіти необхідними навичками. Ця концепція підкреслює внутрішні якості людини, які є результатом розвитку – відносно незалежного від зовнішніх впливів – і забезпечують певний бажаний рівень продуктивності.

Таким чином, компетентність – це сукупність необхідних характеристик, включаючи досвід, знання, здібності, навички, мотивацію, ставлення та риси особистості для певної ролі чи завдання. Це ширше поняття, ніж кваліфікація, яка в цьому контексті є підмножиною компетентності, зосередженої головним чином на формальній сертифікації

Use of the Competency Concept in Knowledge Model Creation

For organizations and teams, defining competency requirements for employees is one of the fundamental needs — each position (each knowledge worker) has specific competency and qualification requirements. Therefore, it is important to focus on the full spectrum of characteristics such as qualifications, experience, knowledge, skills, motivation, attitude, and personal traits related to the role or position.

Understanding the competencies of individual workers and teams is a necessary condition for identifying the appropriate knowledge carriers. Competency relates to the ability to perform certain work, practice it, be qualified in the relevant field, and possess the necessary skills. This concept emphasizes the internal qualities of a person that are the result of development — relatively independent of external influences — and provide a certain desired level of performance.

Thus, competency is a set of necessary characteristics, including experience, knowledge, abilities, skills, motivation, attitude, and personality traits for a certain role or task. It is a broader concept than qualification, which in this context is a subset of competency, mainly focused on formal certification of achieved learning outcomes (e.g., in the form of

досягнутих результатів навчання (наприклад, у формі сертифікатів). Компетентність також охоплює інші особисті якості, а це означає, що це визначення дозволяє зосередитися на тому, як набуті знання – як у результаті навчання, так і в результаті практичного впровадження процесів і робочих практик – управляються, зберігаються, передаються та розвиваються.

Використання концепції компетентності під час створення моделей знань гарантує, що організації та команди відповідають вимогам до компетентності, зосереджуючись на повному наборі атрибутів, таких як кваліфікація, рівень досвіду, знання, здібності, навички, ставлення та особистісні характеристики.

7.5. Реконструкція, ремонт та експлуатація будівель

Загальновизнано, що BIM – це насамперед технологія проєктування, призначена для проєктування нових будівель та споруд «з нуля». Однак важливо зазначити, що слово «проєктування» не зустрічається в назві «Інформаційне моделювання будівель», і це не випадково.

Інформаційна модель будівлі має набагато ширше застосування. Вона надзвичайно корисна також і для існуючих споруд, оскільки містить всю (на сучасному рівні розуміння) інформацію про

certificates). Competency also encompasses other personal qualities, which means this definition allows focusing on how acquired knowledge — both as a result of learning and practical implementation of processes and work practices — is managed, stored, transferred, and developed.

Using the competency concept when creating knowledge models ensures that organizations and teams meet competency requirements by focusing on the full set of attributes such as qualification, experience level, knowledge, abilities, skills, attitude, and personal characteristics.

7.5. Reconstruction, repair, and operation of buildings

It is widely recognized that BIM is, first and foremost, a design technology intended for designing new buildings and structures “from scratch.” However, it is important to note that the word “design” does not appear in the term “Building Information Modeling,” and this is not accidental.

The information model of a building has a much broader application. It is extremely useful for existing structures as well, since it contains all (at the current level of understanding) the information about them,

них, і наше завдання — грамотно керувати цією інформацією.

У найрозвиненіших країнах вже побудовано так багато будівель, що основна увага сьогодні зосереджена не на створенні нових споруд, а на реконструкції та реставрації існуючих будівель та споруд. Цей аспект застосування BIM, на жаль, не дуже добре відомий, але спроби застосувати BIM до існуючих споруд почалися майже одночасно з широким впровадженням інформаційного моделювання будівель.

Саме в таких випадках переваги BIM над традиційними методами проєктування стають ще більш очевидними:

- здатність моделювати зміни в конструкції будівлі;
- проєктування модернізації будівлі новим інженерним обладнанням для приведення її експлуатаційних характеристик до сучасних стандартів;
- відстеження поточного стану будівлі (особливо важливо для пам'яток архітектури) та своєчасне вжиття заходів щодо реставрації;
- ефективна експлуатація та обслуговування існуючих об'єктів.

Технічне обслуговування та ремонт будівель – це дуже важливі та дорогі сфери щоденної діяльності, де інформаційне моделювання будівель відіграє значну роль.

Наприклад, власник або керуюча компанія завжди знатиме, скільки лампочок потрібно замінити в

and our task is to manage this information competently.

In the most developed countries, so many buildings have already been constructed that the main focus today is not on creating new structures, but on the reconstruction and restoration of existing buildings and facilities. Unfortunately, this aspect of BIM application is not very well known, but attempts to apply BIM to existing structures began almost simultaneously with the widespread adoption of building information modeling.

It is precisely in such cases that the advantages of BIM over traditional design methods become even more evident:

- ability to model changes in the building's structure;
- designing building upgrades with new engineering systems to bring its operational characteristics up to modern standards;
- monitoring the current condition of the building (especially important for architectural monuments) and timely implementation of restoration measures;
- efficient operation and maintenance of existing facilities.

Maintenance and repair of buildings – are very important and costly areas of daily activity where Building Information Modeling plays a significant role

For example, the owner or managing company will always know

місцях загального користування, скільки штукатурки або труб потрібно для капітального ремонту будівлі, скільки коштуватиме облицювання будівлі новими матеріалами, де знайти матеріали за вигіднішими цінами та скільки часу знадобиться для виконання всіх необхідних робіт.

В Україні, де масове житлове будівництво широко практикувалося в минулі десятиліття, впровадження BIM у житлово-комунальному секторі виглядає дуже природним та економічно ефективним, оскільки робота з існуючим типовим житловим фондом не вимагає великої кількості різних інформаційних моделей будівель.

Звичайно, будь-яка нова технологія також матиме своїх опонентів. Наприклад, якщо модель повідомляє, що для ремонту системи опалення будівлі потрібно 1000 метрів нових труб, ніхто в організації, яка представляє інтереси мешканців, не повірить рахунку-фактурі, у якому зазначено 2000 метрів. Тому організація власників житла також повинна мати доступ до моделі будівлі, що використовується в управлінні житлово-комунальними послугами, для взаємодії та контролю.

За нинішніх умов лише спеціаліст з доступом до відповідної документації та достатнім рівнем кваліфікації зможе перевірити такі цифри. Як наслідок, потенційна економія для власників нерухомості чи мешканців – чи то на рівні країни,

how many light bulbs need to be replaced in common areas, how much plaster or piping is needed for major repairs of the building, how much it will cost to clad the building with new materials, where to find materials at better prices, and how much time will be required to carry out all necessary work.

In Ukraine, where mass residential construction was widely practiced in past decades, the implementation of BIM in the housing and utilities sector appears very natural and economically efficient, as working with the existing typical housing stock does not require a large number of different building information models.

Of course, any new technology will also have its opponents. For example, if the model reports that 1,000 meters of new pipes are needed to repair the building's heating system, no one in the organization representing the residents' interests will believe an invoice stating 2,000 meters. Therefore, the homeowners' association must also have access to the building model used in housing and utilities management for interaction and oversight.

Under current conditions, only a specialist with access to the relevant documentation and a sufficient level of qualification will be able to verify such figures. As a result, the potential savings for property owners or residents — whether at the

регіону, району чи навіть окремої будівлі — може бути величезною.

Ще одним дуже важливим і дедалі більш затребуваним напрямком діяльності є реконструкція існуючих будівель. Цікаві приклади продемонструвала компанія Autodesk. Компанія взяла стару будівлю та за короткий термін відремонтувала її під сучасний офіс, який відповідає всім екологічним та енергоефективним стандартам, зрештою отримавши «платиновий» сертифікат LEED.

Оскільки проєкт виконувався з використанням власного програмного забезпечення Autodesk, компанія організувала для своїх клієнтів своєрідний майстер-клас.

Для створення інформаційної моделі відремонтованої будівлі було необхідне точне розуміння її поточного стану. Тому було проведено комплексне лазерне сканування об'єкта. Результати цього 3D-сканування лягли в основу BIM-моделі.

Пізніше модель була використана для проєктування внутрішнього планування будівлі, встановлення інженерних систем та інших компонентів. Також було проведено численні розрахунки продуктивності майбутнього офісу, що дозволило досягти високих показників екологічної ефективності.

Коли йдеться про реставраційні роботи, особливо щодо реконструкції історично значущих

level of a country, region, district, or even an individual building — can be enormous.

Another very important and increasingly in-demand area of activity is the renovation of existing buildings. An interesting example was demonstrated by Autodesk. The company took an old building and, within a short time, renovated it into a modern office that meets all environmental and energy-efficiency standards, ultimately achieving a “platinum” LEED certificate.

Since the project was carried out using Autodesk's own software, the company organized a kind of “master class” for its clients.

To create the information model of the renovated building, it was necessary to have an accurate understanding of its current condition. Therefore, comprehensive laser scanning of the facility was carried out. The results of this 3D scanning formed the basis of the BIM model.

Later, the model was used to design the building's interior layout, install engineering systems, and other components. Numerous performance calculations for the future office were also carried out, allowing for high levels of environmental efficiency.

When it comes to restoration work, especially involving the reconstruction of historically significant sites protected by law as monuments of history and architecture, creating an

об'єктів, що охороняються законом як пам'ятки історії та архітектури, створення інформаційної моделі має ще більш специфічний характер.

У таких випадках необхідно повністю відтворити існуючу будівлю, враховуючи всі її сильні та слабкі сторони, переваги та недоліки, тобто змоделювати будівлю не такою, якою вона має бути, а такою, якою вона є насправді, з максимально можливою точністю на основі результатів обстежень та стану її компонентів.

Прикладом такої ситуації є Сіднейський оперний театр. Проєкування розпочалося в 1957 році, а майже через 50 років для цієї відомої пам'ятки, що охороняється ЮНЕСКО, було створено інформаційну модель будівлі (BIM), призначену для її реконструкції та ефективнішого управління.

Часто архітектурні та конструктивні елементи історичних пам'яток (такі як декоративне оздоблення фасадів, кладка, віконні рами, двері, сходи тощо) є унікальними, що унеможливає використання стандартних бібліотек елементів. Для кожної архітектурної пам'ятки базові елементи необхідно створювати «з нуля». Моделювання таких історичних об'єктів по праву можна вважати «найвищим рівнем» застосування BIM.

Результатом цієї роботи є не просто модель конкретного об'єкта, а створення нової бібліотеки

information model takes on an even more specific character.

In such cases, it is necessary to fully recreate the existing building, taking into account all its strengths and weaknesses, advantages and disadvantages – that is, to model the building not as it should be, but as it actually is, with the highest possible accuracy based on survey results and the condition of its components.

An example of such a situation is the Sydney Opera House. The design began in 1957, and almost 50 years later, an information model of the building (BIM) was created for this UNESCO-protected landmark to facilitate its renovation and more efficient management.

Often, the architectural and structural elements of historical monuments (such as decorative facades, masonry, window frames, doors, staircases, etc.) are unique, which makes it impossible to use standard element libraries. For each architectural monument, the basic elements need to be created “from scratch.” Modeling such historical sites can rightly be considered the “highest level” of BIM application.

The result of this work is not just a model of a specific site but the creation of a new library of elements that characterize a particular style or historical period. This library can then be used for the restoration of

елементів, що характеризують певний стиль чи історичний період. Цю бібліотеку потім можна використовувати для реставрації інших архітектурних пам'яток тієї ж епохи.

Крім того, створені елементи також можуть бути застосовані в проєктуванні нових будівель або реконструкції існуючих споруд поблизу історичних пам'яток, сприяючи стилістичній гармонізації нових сучасних будівель з існуючою архітектурною спадщиною.

Таким чином, BIM стає потужним інструментом для вирішення важливих архітектурних завдань – збереження єдності зовнішнього вигляду будівель різних епох, водночас дозволяючи новим спорудам досягати оптимальних експлуатаційних характеристик та сучасних інженерних систем.

Раніше, щоб досягти такого завдання, архітектору довелося б ретельно вивчити матеріали, пов'язані зі стилями історичного періоду, до якого належав пам'ятник, що був трудомістким та тривалим процесом. Зараз достатньо вибрати готові елементи з бібліотеки (наприклад, вікна) потрібного архітектурного стилю та вставити їх у проєкт, при цьому технологія BIM автоматично враховує використані матеріали, їхні фізичні властивості, вартість, дані виробника та інші параметри.

Завдяки технології BIM, проєкти архітектурної реставрації стають такими ж технологічно просунутими

other architectural monuments from the same era.

Moreover, the created elements can also be applied in the design of new buildings or the renovation of existing structures near historical monuments, promoting stylistic harmony between new modern buildings and the existing architectural heritage.

Thus, BIM becomes a powerful tool for addressing important architectural tasks – preserving the unity of the appearance of buildings from different eras while allowing new structures to achieve optimal operational performance and modern engineering systems.

Previously, to accomplish such a task, an architect would have had to thoroughly study materials related to the styles of the historical period to which the monument belonged, which was a labor-intensive and lengthy process. Now it is enough to select ready-made elements from a library (for example, windows) of the required architectural style and insert them into the project, with the BIM technology automatically accounting for the materials used, their physical properties, cost, manufacturer data, and other parameters.

Thanks to BIM technology, architectural restoration projects are becoming just as technologically advanced (and therefore just as

(а отже, такими ж точними, продуктивними та енергоефективними), як і проєктування нових будівель.

Внесення змін до існуючих будівель – це дуже делікатне питання, особливо коли йдеться про адаптацію історичних споруд до сучасних вимог, таких як теплоізоляція, комфорт, нові системи опалення, водопостачання, вентиляції тощо. Для таких архітектурних пам'яток використання BIM стає необхідним, оскільки дозволяє оптимізувати проєктні рішення та належним чином адаптувати об'єкт до сучасних стандартів.

7.6. Безпека будівель та поведінка в надзвичайних ситуаціях

У сучасних умовах, через різні фактори, одним із головних аспектів проєктування нових будівель та експлуатації існуючих є зростаюча вимога до структурної та системної безпеки. Зміни сейсмічної активності по всій планеті, нові кліматичні умови, що призводять до стихійних лих, воєн, техногенних катастроф та загрози тероризму, є основними факторами, що підвищують вимоги до міцності та стійкості сучасних будівель.

Незважаючи на посилення вимог до міцності будівель, необхідно враховувати три основні фактори:

1. Неможливо врахувати всі можливі фактори ризику. Неможливо передбачити кожну можливу ситуацію, оскільки вони можуть бути надзвичайно різноманітними.

precise, productive, and energy-efficient) as the design of new buildings.

Making changes to existing buildings is a very delicate issue, especially when it comes to adapting historic buildings to modern requirements, such as thermal insulation, comfort, new heating, water supply, or ventilation systems. For such architectural monuments, using BIM becomes essential, as it allows for the optimization of design solutions and proper adaptation of the facility to modern standards.

7.6. Building Safety and Emergency Behavior

In modern conditions, due to various factors, one of the main aspects of designing new buildings and operating existing ones is the growing requirement for structural and systemic safety. Changes in seismic activity around the world, new climate conditions leading to natural disasters, wars, man-made disasters, and the threat of terrorism are the main factors increasing the demands for the strength and stability of modern buildings.

Despite the tightening requirements for building strength, it is necessary to consider three main factors:

1. It is impossible to account for all possible risk factors. It is not possible to anticipate every possible situation, as they can be extremely diverse.

2. Будь-яка міцність має свої межі. Жодна конструкція не є нескінченно міцною, тобто кожна будівля має свої обмеження щодо міцності.

3. Старіші споруди проєктувалися за іншими стандартами. Будівлі, побудовані в минулому, не завжди легко посилити або адаптувати до сучасних вимог через застарілі матеріали та виснажені ресурси.

Головне питання, яке сьогодні хвилює фахівців з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, полягає в тому, як поводитиметься конкретна будівля за певних екстремальних умов. Іншими словами, як довго вона простоїть у разі гіпотетичної катастрофи (з чітко визначеними параметрами), а також яким може бути характер і масштаб потенційних пошкоджень або руйнувань. Для цього необхідно мати повне розуміння конструкції будівлі, і ця інформація має бути доступною в режимі реального часу.

Найпоширенішою надзвичайною ситуацією є пожежа. BIM дозволяє:

- визначити ймовірні шляхи поширення вогню;
- оцінити те, як довго витримують конструкції;
- оцінити додаткові небезпеки, що виникають від матеріалів та обладнання.

Інформаційна модель будівлі забезпечує можливість швидкого реагування в таких ситуаціях, забезпечуючи ефективну допомогу

2. Any strength has its limits. No structure is infinitely strong, meaning that every building has its own limitations in terms of strength.

3. Older structures were designed according to different standards. Buildings constructed in the past are not always easy to reinforce or adapt to modern requirements due to outdated materials and depleted resources.

The main question that concerns emergency response specialists today is how a particular building will behave under certain extreme conditions. In other words, how long it will stand in the event of a hypothetical disaster (with clearly defined parameters), as well as what the nature and extent of potential damage or destruction might be. To answer this, it is necessary to have a complete understanding of the building's structure, and this information must be available in real time.

The most common emergency situation is fire. BIM allows for:

- identification of probable fire spread paths,
- assessment of how long the structures will withstand,
- evaluation of additional hazards arising from materials and equipment.

The building information model enables quick response in such situ-

рятувальникам та іншим екстреним службам.

Проектування та реконструкція. Усі нові об'єкти будуть створені на основі BIM, але старі будівлі часто не мають інформаційних моделей, що створює проблеми для служб реагування на надзвичайні ситуації. Одним із ключових завдань є створення BIM-моделей для критично важливих об'єктів, таких як:

- громадські будівлі (ринки, стадіони, басейни);
- промислові підприємства з небезпечним виробництвом;
- енергетичні об'єкти;
- гідроенергетична інфраструктура.

Створення інформаційних моделей для таких об'єктів дозволяє швидко моделювати проблеми та сценарії дій у разі надзвичайних ситуацій, забезпечуючи ефективніше управління безпекою.

Реконструкція та реставрація. Під час реконструкції важливих історичних споруд (наприклад, Сіднейського оперного театру) BIM дозволяє:

- відтворення існуючих будівель з урахуванням їхнього поточного стану;
- включення всіх компонентів конструкції та рівень їх зносу.

Це дозволяє не лише реконструювати будівлю, але і створити бібліотеку елементів для майбутньої реставрації подібних споруд, допомагаючи зберегти історичну

ations, providing effective assistance to rescuers and other emergency services.

Design and Reconstruction. All new facilities will be created based on BIM, but old buildings often do not have information models, which creates problems for emergency response services. One of the key tasks is to create BIM models for critically important facilities such as:

- public buildings (markets, stadiums, swimming pools);
- industrial facilities with hazardous production;
- energy facilities;
- hydropower infrastructure.

Creating information models for such objects enables rapid simulation of problems and response scenarios in emergency situations, ensuring more effective safety management.

Reconstruction and restoration. During the reconstruction of important historical buildings (for example, the Sydney Opera House), BIM enables:

- reproduction of existing buildings taking into account their current condition;
- inclusion of all structural components and their level of deterioration.

This allows not only the reconstruction of the building but also the creation of a library of elements for future restoration of similar structures, helping to preserve historical

цінність та забезпечуючи ефективність реставраційних робіт.

Знесення будівель. Сучасні підходи до знесення споруд, особливо в густонаселених районах, вимагають точних планів та використання інформаційних моделей для:

- розрахунок матеріалів;
- визначення необхідного часу для знесення.

Моделювання процесу знесення та очищення ділянки за допомогою BIM дозволяє значно скоротити витрати та оптимізувати роботи.

Інженерне обладнання. Інженерні системи є однією з найважливіших частин проєкту, що впливає на функціональність та економічну ефективність будівлі. Уся інформація про інженерні системи будівлі міститься в інформаційній моделі, що дозволяє забезпечити належну експлуатацію, своєчасне технічне обслуговування та ремонт об'єкта.

Складні об'єкти. Під час проєктування великомасштабних об'єктів, таких як будівельні комплекси, інформаційна модель складається з:

- макетів окремих будівель;
- моделей інженерних систем для всього комплексу;
- моделей місцевості (рельєф, інженерні мережі, озеленення).

Такий підхід дозволяє комплексно планувати та управляти складними об'єктами, що включають кілька будівель та інженерних мереж.

value and ensuring the efficiency of restoration works.

Demolition of buildings. Modern approaches to the demolition of structures, especially in densely populated areas, require accurate plans and the use of information models for:

- calculation of materials;
- determination of the required time for demolition.

Modeling the demolition process and site clearance using BIM significantly reduces costs and optimizes the work.

Engineering equipment. Engineering systems are one of the most important parts of the project, affecting the functionality and economic efficiency of the building. All information about the building's engineering systems is contained in the information model, which allows ensuring proper operation, timely maintenance, and repair of the facility.

Complex objects. When designing large-scale objects, such as building complexes, the information model consists of:

- layouts of individual buildings;
- models of engineering systems for the entire complex;
- terrain models (relief, engineering networks, landscaping).

This approach enables comprehensive planning and management of complex objects that include multiple buildings and engineering networks.

Self-monitoring questions

Питання до самоконтролю

1. Чому паперові носії інформації ускладнюють ефективне управління будівельним фондом?

2. Які ризики виникають у зв'язку з відсутністю механізму збереження історії змін при традиційних методах управління даними?

3. У чому полягає сутність 3D-сканування та які основні технології його реалізації?

4. Як інтегруються дані 3D-сканування у BIM-середовище та які програмні рішення для цього застосовуються?

5. Які можливості відкриває використання AR/VR технологій у візуалізації BIM-моделей на об'єктах будівництва чи експлуатації?

6. Ому взаємодія між різними спеціалістами (проектанти, кошторисники, виробники будівельних елементів, експлуатаційники) є необхідною умовою для повноцінної реалізації переваг BIM?

7. Яким чином BIM-модель підтримує управління життєвим циклом будівлі як система управління знаннями?

8. Чому застосування BIM є особливо важливим не лише для нового будівництва, але й для реконструкції та експлуатації існуючих будівель?

9. Які основні переваги надає BIM у процесах реконструкції та ремонту порівняно з традиційними методами?

10. Чому створення BIM-моделей історичних пам'яток вважається «найвищим рівнем» застосування технології?

11. Як інформаційна модель сприяє експлуатації та обслуговуванню інженерних систем?

12. Що входить до складу інформаційної моделі у випадку проектування комплексних об'єктів?

1. Why do paper media make it difficult to effectively manage the building stock?

2. What risks arise due to the lack of a mechanism for preserving the history of changes in traditional data management methods?

3. What is the essence of 3D scanning and what are the main technologies for its implementation?

4. How are 3D scanning data integrated into the BIM environment and what software solutions are used for this?

5. What opportunities does the use of AR/VR technologies open up in the visualization of BIM models at construction or operation sites?

6. Why is interaction between various specialists (designers, estimators, manufacturers of building elements, operators) a necessary condition for the full realization of the benefits of BIM?

7. How does the BIM model support building lifecycle management as a knowledge management system?

8. Why is the use of BIM particularly important not only for new construction, but also for the reconstruction and operation of existing buildings?

9. What are the main advantages of BIM in the reconstruction and repair processes compared to traditional methods?

10. Why is the creation of BIM models of historical monuments considered the "highest level" of technology application?

11. How does an information model contribute to the operation and maintenance of engineering systems?

12. What is included in an information model in the case of designing complex facilities?

CHAPTER 8 MAINTENANCE AND FACILITY MANAGEMENT USING BIM

РОЗДІЛ 8 ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ BIM

Управління об'єктами (FM) – це важливий етап життєвого циклу будівлі. Технічне обслуговування є ключовим компонентом FM, але традиційно воно не враховувалося на етапах проєктування. Частково це пояснюється тим, що фахівці з управління об'єктами рідко залучаються до ранніх етапів проєктування. Спроби перенесення інформації на етап FM за допомогою технології інформаційного моделювання будівель (BIM) все ще перебувають на ранніх стадіях розробки.

Інтеграція BIM та FM реалізується за допомогою **6D BIM**, що означає використання шостого виміру в технології BIM. Технології доповненої реальності (AR) та віртуальної реальності (VR) також дедалі частіше використовуються в управлінні об'єктами. Ця тема охоплює різні підходи та приклади застосування AR та VR у FM, а також аналіз ключових питань, пов'язаних з їх впровадженням.

Основні сфери застосування 6D BIM включають:

- визначення компонентів будівлі для технічного обслуговування;
- оцінка стану будівлі та проведення обстежень;

Facility Management (FM) is an important stage of the building's life cycle. Maintenance is a key component of FM, but traditionally it has not been considered at the design stages. This is partly because facility management professionals are rarely involved in the early design stages. Attempts to transfer information to the FM stage using Building Information Modeling (BIM) technology are still at an early stage of development.

The integration of BIM and FM is implemented through 6D BIM, which means the use of the sixth dimension in BIM technology. Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) technologies are also increasingly used in facility management. This topic covers various approaches and examples of AR and VR applications in FM, as well as an analysis of key issues related to their implementation.

The main areas of application of 6D BIM include:

- identification of building components for maintenance;
- assessment of the building's condition and conducting inspections;

- оцінка часу та ресурсів, необхідних для обслуговування будівлі.

Крім того, визначено чотири основні типи проблем, що впливають на впровадження 6D BIM:

- концептуальні проблеми;
- технічні проблеми;
- фінансові обмеження;
- питання, пов'язані з персоналом та кваліфікацією.

Ця тема зосереджена на технологіях управління об'єктами (FM), BIM та AR/VR.

Щодо управління об'єктами, основна увага буде зосереджена на технічному обслуговуванні будівель.

Щодо BIM, увага буде приділена 6-му виміру BIM, який поєднує BIM з управлінням ресурсами (FM). Однією з ключових особливостей BIM є те, що він дозволяє міждисциплінарну співпрацю між усіма учасниками проєкту. Однак інформація, необхідна для допомоги керівникам об'єктів на етапі технічного обслуговування, часто відсутня в моделі BIM.

Що стосується технологій AR/VR, ігрові двигуни на основі BIM можуть створювати реалістичні віртуальні середовища за відносно низьких витрат, використовуючи 3D-моделі. Для повноцінної візуалізації обслуговування через VR потрібен ігровий двигун та 3D-модель із просторовою інформацією та даними про об'єкти.

Однак, порівняно з етапами проєктування та будівництва, дос-

- estimation of time and resources required for building maintenance.

In addition, four main types of problems affecting the implementation of 6D BIM have been identified:

- conceptual issues;
- technical issues;
- financial constraints;
- issues related to personnel and qualifications.

This topic focuses on facility management (FM) technologies, BIM, and AR/VR.

Regarding facility management, the main focus will be on building maintenance.

Regarding BIM, attention will be paid to the 6th dimension of BIM, which combines BIM with facility management (FM). One of the key features of BIM is that it enables interdisciplinary collaboration among all project participants. However, the information needed to assist facility managers at the maintenance stage is often missing from the BIM model.

Regarding AR/VR technologies, game engines based on BIM can create realistic virtual environments at relatively low cost using 3D models. For full visualization of maintenance through VR, a game engine and a 3D model with spatial information and object data are required.

However, compared to the design and construction stages, there

ліджень щодо використання передових технологій, таких як доповнена реальність (AR) та віртуальна реальність (VR), у робочому процесі обслуговування будівель було проведено мало.

8.1. Застосування BIM на етапі експлуатації та технічного обслуговування будівель

Протягом історії поширеною проблемою було те, що люди схильні будувати більше, ніж вони готові утримувати. Така практика суттєво впливає на термін служби активів. Оскільки рішення щодо управління об'єктами впливають на фінансові аспекти, коли потрібно скоротити бюджети, першою сферою, на яку зазвичай орієнтуються, є експлуатаційні витрати та витрати на технічне обслуговування, часто без урахування довгострокових наслідків.

Витрати на експлуатацію та обслуговування будівлі значно вищі, ніж витрати на її будівництво. Ці витрати можна значно зменшити, надаючи керівникам об'єктів точну інформацію про проєкт. Національна академія наук вперше визнала необхідність у сталих даних для підтримки експлуатації та обслуговування об'єктів у 1983 році.

Діяльність з управління об'єктами часто фрагментована, що вимагає обміну та обробки великих обсягів даних про приміщення, елементи будівель, а також істори-

has been little research on the use of advanced technologies such as Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) in the building maintenance workflow.

8.1. Application of BIM at the Building Operation and Maintenance Stage

Throughout history, a common problem has been that people tend to build more than they are prepared to maintain. Such a practice significantly impacts the lifespan of assets. Since facility management decisions affect financial aspects, when budgets need to be reduced, the first area usually targeted is operational and maintenance costs, often without considering the long-term consequences.

The costs of operating and maintaining a building are significantly higher than the costs of constructing it. These costs can be greatly reduced by providing facility managers with accurate project information. The National Academy of Sciences first recognized the need for sustainable data to support facility operation and maintenance in 1983.

Facility management activities are often fragmented, requiring the exchange and processing of large volumes of data about spaces,

чних записів оглядів та експлуатації. Існують складні системи управління обслуговуванням, такі як комп'ютеризовані системи управління технічним обслуговуванням (CMMS), але їхня основна функція полягає в простому управлінні даними, такими як робочі наряди та управління ресурсами. Крім того, цим системам зазвичай бракує функцій для обміну даними, збереження даних, візуалізації та забезпечення сталості даних.

Останнім часом багато дослідників намагалися застосувати технологію інформаційного моделювання будівель (BIM) до управління об'єктами. BIM візуально представляє просторову інформацію за допомогою 3D-моделей, що може допомогти керівникам об'єктів краще розуміти цю інформацію та взаємодіяти з нею.

Як посібник користувача для мешканців та керівників будівель, BIM для FM може стати єдиним джерелом інформації. Візуальне розпізнавання розташування моделей, таких як активи, меблі та аксесуари, може бути головною перевагою цього підходу. Крім того, BIM для FM також підтримує управління безпекою, планування безпеки та планування готовності до надзвичайних ситуацій.

Очікується, що BIM додасть значної цінності при інтеграції з FM, надаючи власникам та операторам об'єктів потужні інструменти для

building elements, and historical inspection and operation records. There are advanced maintenance management systems, such as Computerized Maintenance Management Systems (CMMS), but their main function is simply to manage data such as work orders and resource management. In addition, these systems often lack features for data exchange, data storage, visualization, and ensuring data sustainability.

Recently, many researchers have attempted to apply Building Information Modeling (BIM) technology to facility management. BIM visually represents spatial information through 3D models, which can help facility managers better understand and interact with this information.

As a user manual for occupants and building managers, BIM for FM can become a single source of information. Visual recognition of the location of models such as assets, furniture, and accessories can be a major advantage of this approach. Additionally, BIM for FM also supports safety management, safety planning, and emergency preparedness planning.

BIM is expected to add significant value when integrated with FM, providing owners and facility operators with powerful tools to extract valuable information from the building's virtual model. However,

вилучення цінної інформації з віртуальної моделі будівлі. Однак, попри зростання усвідомлення потенціалу BIM для експлуатації та обслуговування будівель протягом останнього десятиліття, оператори ще не повністю використовують переваги BIM на цьому етапі.

Для практичного застосування BIM необхідні вдосконалення процесів. Активно проводяться відповідні дослідження, зосереджені на тому, як ефективно розробляти та використовувати дані BIM у поєднанні з іншими новими технологіями. Прикладами таких технологій є Інтернет речей (IoT), 3D-друк, 3D-сканування, доповнена реальність (AR) та віртуальна реальність (VR).

Залучення та участь непрофесійних користувачів стають можливими завдяки використанню доповненої реальності (AR), віртуальної реальності (VR) та ігрових двигунів як потенційних платформ. AR та VR активно досліджуються в галузях архітектури, інженерії та будівництва. Однак їх інтеграції з BIM у контексті покращення управління об'єктами ще не приділяється достатньої уваги.

8.2. Управління об'єктами (FM)

Протягом останніх кількох десятиліть розуміння управління об'єктами нерухомості (FM) значно змінилося в більшості суспільств світу. Ця еволюція зумовлена історичними та культурними факторами та впливає на всі типи організацій

despite growing awareness of BIM's potential for building operation and maintenance over the past decade, operators have not yet fully utilized the benefits of BIM at this stage.

For the practical application of BIM, process improvements are necessary. Relevant research is actively being conducted, focusing on how to effectively develop and use BIM data in combination with other emerging technologies. Examples of such technologies include the Internet of Things (IoT), 3D printing, 3D scanning, Augmented Reality (AR), and Virtual Reality (VR).

The involvement and participation of non-professional users are becoming possible through the use of Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR), and game engines as potential platforms. AR and VR are being actively explored in the architecture, engineering, and construction fields. However, their integration with BIM in the context of improving facility management has not yet received sufficient attention.

8.2. Facility Management (FM)

Over the past few decades, the understanding of Facility Management (FM) has changed significantly in most societies around the world. This evolution has been driven by historical and cultural factors and affects all types of organizations, both

(як державні, так і приватні). Оптимізація витрат та ефективність послуг і активів є основними цілями FM.

Управління об'єктами нерухомості визначається як «інтеграція процесів в організації для підтримки та розвитку узгоджених послуг, що підтримують та підвищують ефективність основної діяльності організації».

Згідно з Міжнародною організацією зі стандартизації (ISO), управління громадським сектором (FM) описується як організаційна функція, яка інтегрує процеси, людей та місце в межах збудованого середовища. Ця функція відповідає за підвищення ефективності основного бізнесу та покращення якості життя.

Згідно з Міжнародною корпорацією бізнес-машин (IBM), FM можна визначити як «інструменти та послуги, що підтримують функціональність, безпеку та сталий розвиток будівель, територій, інфраструктури та нерухомості». IBM також зазначає, що FM може стосуватися систем та програмного забезпечення, що використовуються для управління об'єктами. З огляду на величезну кількість даних, що генеруються побудованими активами, цю інформацію часто називають даними Інтернету речей (IoT).

З іншого боку, FM також має справу з людьми та організаціями, додаючи до своїх основних функцій відповідальність за охорону здоров'я, безпеку, захист, IT та логістику.

public and private. Cost optimization and the efficiency of services and assets are the main goals of FM.

Facility Management is defined as "the integration of processes within an organization to maintain and develop the agreed services which support and improve the effectiveness of its primary activities".

According to the International Organization for Standardization (ISO), public sector management (FM) is described as an organizational function that integrates processes, people, and place within the built environment. This function is responsible for enhancing the effectiveness of the core business and improving the quality of life.

According to the International Business Machines Corporation (IBM), FM can be defined as "the tools and services that support the functionality, safety, and sustainability of buildings, grounds, infrastructure, and real estate." IBM also notes that FM may refer to the systems and software used for facility management. Given the vast amount of data generated by built assets, this information is often referred to as Internet of Things (IoT) data.

On the other hand, FM also deals with people and organizations, adding responsibility for health, safety, security, IT, and logistics to its core functions.

Різні функції FM проілюстровано на наступній діаграмі (рис. 8.1) разом з основними пов'язаними з ними видами діяльності.

The various functions of FM are illustrated in the following diagram (Fig. 8.1) along with the main related activities.

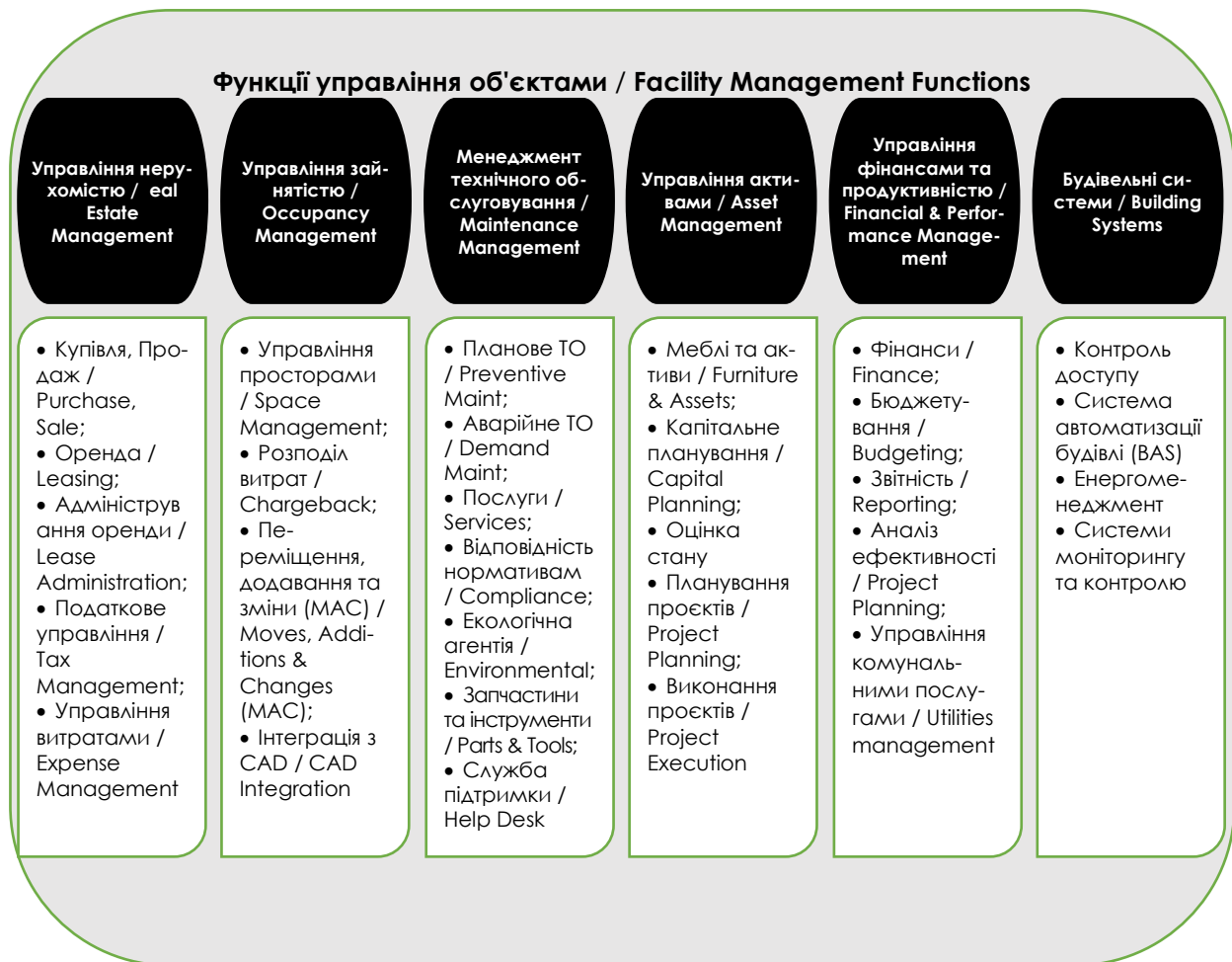


Рис. 8.1. Функції управління об'єктами / Facility Management Functions

Управління технічним обслуговуванням об'єктів є одним із основним напрямків системи управління будівлями. Ефективність експлуатації та технічного обслуговування є вирішальним фактором сталого розвитку будівель, оскільки вона являє собою найдовший етап життєвого циклу будівлі. Весь життєвий цикл будь-якого проєкту переважно зосереджений на обміні інформацією. Тому погана комунікація може суттєво вплинути на ефективність управління об'єктами (FM).

Facility maintenance management is one of the main areas of a building management system. The efficiency of operation and maintenance is a crucial factor for the sustainable development of buildings, as it represents the longest stage of a building's life cycle. The entire life cycle of any project is predominantly focused on information exchange. Therefore, poor communication can significantly impact the effectiveness of Facility Management (FM).

Далі ми визначимо деякі загальновживані терміни, пов'язані із системами технічного обслуговування. Спочатку слід зазначити, що технічне обслуговування – це сукупність управлінських та технічних процедур, призначених для відновлення активу до заданого стану. За термінами системи технічного обслуговування класифікуються на основні категорії, виявляючи класичні та сучасні системи. Стандартні системи технічного обслуговування включають такі системи.

Профілактичне обслуговування – вид технічного обслуговування, при якому всі процедури виконуються за запланованим та періодичним графіком. Метою є підтримка обладнання/активу в узгодженому робочому стані шляхом регулярних перевірок.

Коригувальне технічне обслуговування – технічне обслуговування, яке проводиться поза графіком через те, що користувачі зіткнулися з певними поломками або дефектами обладнання чи активу.

Планове функціональне технічне обслуговування – технічне обслуговування обладнання/машин протягом терміну їхньої корисної експлуатації, включаючи змащування, очищення та моніторинг.

Паліативне обслуговування – технічне обслуговування обладнання/машин без урахування графіків технічного обслуговування ближче до кінця терміну їхньої служби.

Next, we will define some commonly used terms related to maintenance systems. First, it should be noted that maintenance is a set of management and technical procedures designed to restore an asset to a specified condition. According to terminology, maintenance systems are classified into main categories, identifying classical and modern systems. Standard maintenance systems include the following systems.

Preventive maintenance is a type of maintenance in which all procedures are carried out according to a planned and periodic schedule. The goal is to keep the equipment/asset in an agreed working condition through regular inspections.

Corrective maintenance is maintenance that is carried out unscheduled because users have encountered certain breakdowns or defects in the equipment or asset.

Scheduled functional maintenance is the maintenance of equipment/machines throughout their useful life, including lubrication, cleaning, and monitoring.

Palliative maintenance is the maintenance of equipment/machines without considering maintenance schedules closer to the end of their service life.

Modern maintenance systems involve the use of additional capabilities:

Сучасні системи технічного обслуговування передбачають використання додаткових можливостей:

1. Прогнозне технічне обслуговування – технічне обслуговування, яке передбачає точну діагностику стану обладнання під час експлуатації з використанням передових методів обробки сигналів та вимірювання.

2. Проєктивне обслуговування – система обслуговування, що базується на прогнозуванні майбутніх умов та потреб на основі поточної тенденції обслуговування.

Для забезпечення ефективного управління об'єктами та їх належного технічного обслуговування, необхідно враховувати всі етапи життєвого циклу будівлі. Кожен тип обслуговування має своє значення та забезпечує специфічні функції для збереження та поліпшення стану будівель і споруд. Профілактичне обслуговування допомагає зменшити ризики поломок та продовжити термін служби обладнання, тоді як коригувальне обслуговування вирішує негайні проблеми, що виникають. Планове функціональне обслуговування гарантує постійну працездатність обладнання протягом усього терміну його експлуатації, а паліативне обслуговування застосовується в останні етапи життєвого циклу обладнання, коли необхідно забезпечити безперебійну роботу навіть при зниженій ефективності.

1. predictive maintenance — maintenance that provides accurate diagnostics of equipment condition during operation using advanced signal processing and measurement methods.

2. projective maintenance — a maintenance system based on predicting future conditions and needs based on the current maintenance trend.

To ensure effective facility management and proper maintenance, it is necessary to consider all stages of the building life cycle. Each type of maintenance has its significance and provides specific functions for preserving and improving the condition of buildings and structures. Preventive maintenance helps to reduce the risks of breakdowns and extend the service life of equipment, while corrective maintenance addresses immediate problems that arise. Scheduled functional maintenance ensures the continuous operability of equipment throughout its entire service life, and palliative maintenance is applied in the final stages of the equipment life cycle when it is necessary to ensure uninterrupted operation even at reduced efficiency.

An important change in the field of maintenance is predictive maintenance, which makes it possible to accurately predict the need

Важливою зміною у сфері технічного обслуговування є прогностичне обслуговування, яке дозволяє з високою точністю передбачати необхідність в обслуговуванні та вчасно здійснювати необхідні дії. Прогнозування на основі аналізу даних підвищує ефективність використання ресурсів і забезпечує оптимальну роботу об'єктів.

8.3. Проектування систем управління

Останнім часом набули популярності дискусії щодо раннього залучення керівників об'єктів до процесу проектування. Ефективність такої участі часто ставиться під сумнів. Однак рання участь має багато переваг, починаючи зі зниження витрат на закупівлі в межах проекту завдяки меншій кількості змін у проекті та переробок. Крім того, така участь призводить до кращих результатів для кінцевого користувача, оскільки будівля краще відповідає його потребам. Отже, об'єкту додається додаткова цінність в очах користувачів та клієнтів, забезпечуючи зручність у обслуговуванні, керованість та контрольованість будівлі.

Керівники об'єктів можуть робити конструктивний внесок у будівельні проекти, якщо вони беруть участь у процесі проектування, наприклад, визначаючи компоненти, які зазвичай потребують обслуговування, висвітлюючи проблеми, пов'язані з обслуговуванням компонентів, та пропонуючи альтернативні

for maintenance and carry out the necessary actions in a timely manner. Forecasting based on data analysis increases the efficiency of resource use and ensures optimal facility operation.

8.3. Design of Management Systems

Recently, discussions about the early involvement of facility managers in the design process have become increasingly popular. The effectiveness of such involvement is often questioned. However, early involvement has many advantages, starting with reducing procurement costs within the project due to fewer design changes and rework. In addition, such involvement leads to better outcomes for the end user, as the building better meets their needs. Therefore, the facility gains additional value in the eyes of users and clients, ensuring ease of maintenance, manageability, and controllability of the building.

Facility managers can make a constructive contribution to construction projects if they participate in the design process, for example, by identifying components that typically require maintenance, highlighting issues related to the maintenance of

проектні рішення. Усні пропозиції від керівників об'єктів рідко інтегруються в сучасні підходи до планування. Як наслідок, будівлі з недоступними або непридатними для експлуатації компонентами є поширеним явищем.

Високі витрати, пов'язані з впровадженням пізніх операційних рішень на пізніших етапах життєвого циклу проекту, чітко проілюстровані на рисунку (рис. 8.2). Вартість змін зазвичай низька на ранніх етапах проекту; однак ці витрати значно зростають, якщо зміни впроваджуються пізніше, що призводить до багатьох неефективностей.

components, and suggesting alternative design solutions. Verbal suggestions from facility managers are rarely integrated into modern planning approaches. As a result, buildings with inaccessible or unserviceable components are common.

The high costs associated with implementing late operational decisions at later stages of the project life cycle are clearly illustrated in the figure (Fig. 8.2). The cost of changes is usually low at the early stages of the project; however, these costs increase significantly if changes are implemented later, leading to many inefficiencies.

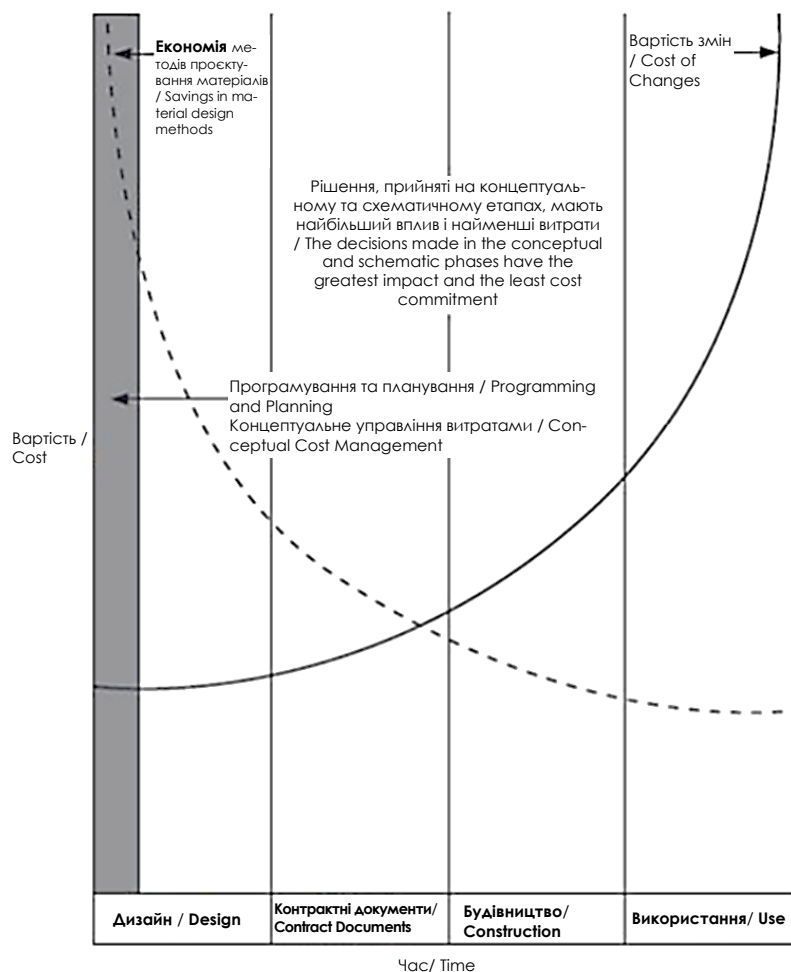


Рис. 8.2. Вплив рішень щодо змін на життєвий цикл проекту / Impact of Change Decisions on the Project Life Cycle

З іншого боку, ця участь часто ставиться під сумнів через перешкоди, з якими вона стикається. Вартість є основним фактором, що відображає ці перешкоди. Це очевидно під час процесу закупівель, де особи, які ухвалюють рішення, постійно надають пріоритет найбільш економічно ефективному варіанту. У результаті, керівники об'єктів іноді опиняються безсилими проти цих рішень, навіть якщо вони розуміють, що наслідки можуть суттєво вплинути на об'єкт.

Управління об'єктами нерухомості – це широка галузь, яка охоплює багато аспектів. Співпраця та комунікація є ключовими факторами, що впливають на ефективність процесу управління об'єктами нерухомості. Участь керівників об'єктів нерухомості на етапі проєктування завжди була предметом дискусій. Однак нещодавні дослідження показали, що проєктувальники та планувальники визнали, що залучення керівників об'єктів нерухомості є корисним.

8.4. Інформаційне моделювання будівель (BIM) в управлінні об'єктами (FM)

Протягом останніх кількох десятиліть більшість промислових секторів зазнали значних трансформацій завдяки цифровізації. Цифровізація призвела до помітного підвищення продуктивності та

On the other hand, this involvement is often questioned due to the obstacles it faces. Cost is a primary factor reflecting these obstacles. This is evident during the procurement process, where decision-makers consistently prioritize the most cost-effective option. As a result, facility managers sometimes find themselves powerless against these decisions, even when they understand that the consequences can significantly impact the facility.

Facility management is a broad field that encompasses many aspects. Collaboration and communication are key factors influencing the effectiveness of the facility management process. The involvement of facility managers at the design stage has always been a subject of debate. However, recent studies have shown that designers and planners recognize that involving facility managers is beneficial.

8.4. Building Information Modeling (BIM) in Facility Management (FM)

Over the past few decades, most industrial sectors have undergone significant transformations due to digitalization. Digitalization has led to a noticeable increase in productivity and product quality.

якості продукції. Значні зміни відбулися в галузі архітектури, інженерії та будівництва (АЕС) завдяки впровадженню цифрових інструментів у проєктуванні, будівництві та експлуатації будівель. На рисунку 8.3 наведено спрощений огляд хронології цих інструментів. Однак використання цифрових інструментів також призвело до втрати цінної інформації. Ця втрата пов'язана з тим, що дані передаються через креслення, або в друкованому паперовому вигляді, або в цифровому форматі. Здебільшого потік інформації порушується протягом життєвого циклу будівлі, особливо під час переходів між різними етапами.

Significant changes have occurred in the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industry through the adoption of digital tools in the design, construction, and operation of buildings. Figure 8.3 presents a simplified overview of the timeline of these tools. However, the use of digital tools has also resulted in the loss of valuable information. This loss is related to data being transmitted via drawings, either in printed paper form or in digital format. Typically, the flow of information is disrupted throughout the building's life cycle, especially during transitions between different stages.

Хронологія CAD АЕС / AEC CAD Timeline

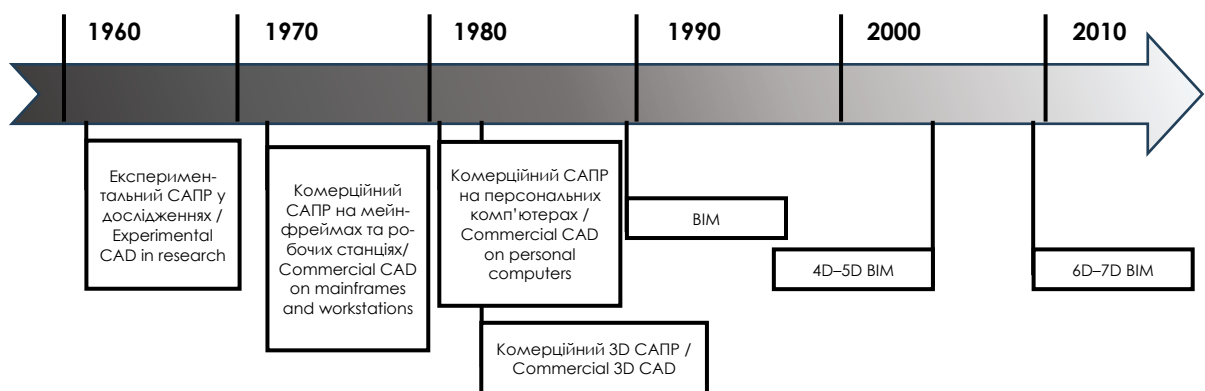


Рис. 8.3. Перехід до цифрових інструментів в АЕС / Transition to Digital Tools in AEC

Інформаційне моделювання будівель (BIM) було впроваджено в процес цифровізації для вирішення таких проблем. Впровадження BIM дозволяє більш свідомо використовувати комп'ютерні технології в галузі архітектури, інженерії та будівництва (АЕС). Аналіз та зберігання інформації є ключовими особливостями використання BIM, замість

Building Information Modeling (BIM) was introduced in the digitalization process to address such issues. The implementation of BIM allows for a more meaningful use of computer technologies in the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industry. Analysis and storage of information are key features

ручного внесення нотаток до креслень. Ці характеристики демонструються за допомогою моделей будівель. Покращується інтеграція та синхронізація проєктних зусиль, а також загальний контроль над процесом будівництва. Обсяг роботи, схильної до помилок, значно зменшився після впровадження BIM. Використання цифрової інформації дозволяє отримати численні переваги з тих самих даних та мінімізує необхідність повторного введення інформації.

BIM має кілька визначень, два найважливіших з яких слід виділити. По-перше, згідно з Autodesk, BIM визначається як структура, ініційована інтелектуальною 3D-моделлю, яка забезпечує координацію, міждисциплінарну співпрацю, управління документами та моделювання протягом усього життєвого циклу проєкту. Життєвий цикл включає планування, проєктування, будівництво, експлуатацію та обслуговування, а також знесення.

Комітет проєкту Національного стандарту BIM Сполучених Штатів Америки визначає BIM як засіб цифрового представлення функціональних та фізичних характеристик об'єкта. Концепція спільного ресурсу знань є ключовою для функціонування BIM при застосуванні до об'єкта, забезпечуючи надійне ухвалення рішень протягом усього життєвого циклу будівлі або інфраструктури (Національний стандарт BIM - Сполучені Штати, nd).

of using BIM, instead of manually adding notes to drawings. These characteristics are demonstrated through building models. Integration and synchronization of design efforts improve, as well as overall control over the construction process. The amount of error-prone work has significantly decreased after the introduction of BIM. The use of digital information enables numerous benefits from the same data and minimizes the need for data re-entry.

BIM has several definitions. Two of the most important definitions to highlight are: First, according to Autodesk, BIM is defined as a framework initiated by an intelligent 3D model that provides coordination, interdisciplinary collaboration, document management, and modeling throughout the entire project life cycle. The life cycle includes planning, design, construction, operation and maintenance, as well as demolition.

The U.S. National BIM Standard Project Committee defines BIM as a means of digital representation of the functional and physical characteristics of an asset. The concept of a shared knowledge resource is key to the functioning of BIM when applied to an asset, enabling reliable decision-making throughout the entire life cycle of a building or infrastructure (National BIM Standard – United States, n.d.).

Project development throughout its life cycle also faces the challenge

Розробка проєктів протягом їхнього життєвого циклу також стикається з проблемою досягнення зрілості моделей BIM. Існує кілька рівнів зрілості моделі BIM, відомих як рівні розвитку (LOD), а саме LOD 100, 200 тощо, які продовжують розвиватися разом із розвитком BIM, як показано на (рис. 8.4). Конкретні параметри поступово додаються до існуючої інформації BIM відповідно до вимог фаз проєкту. Ці доповнення представляють виміри BIM.

of achieving BIM model maturity. There are several levels of BIM model maturity, known as Levels of Development (LOD), namely LOD 100, 200, and so on, which continue to evolve alongside BIM development, as shown in (Fig. 8.4). Specific parameters are gradually added to the existing BIM information according to the requirements of project phases. These additions represent the dimensions of BIM.

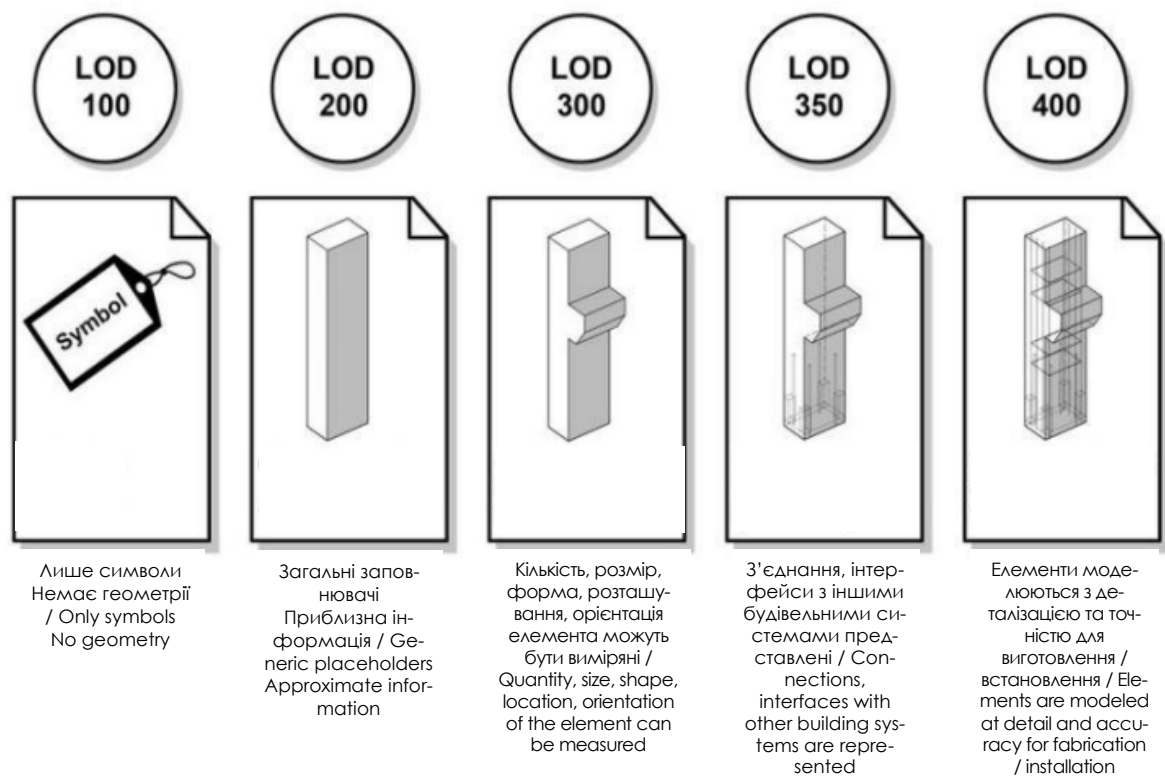


Рис. 8.4. Рівні розвитку в BIM / Levels of Development in BIM

Ці виміри (рис. 8.5) починаються з 3D BIM, який стосується геометрії та просторових розмірів будівлі. Далі йде 4D BIM, який включає часові шкали та планування проєкту. 5D BIM включає оцінку витрат та відстеження бюджету. Крім того, 6D BIM зосереджується на

These dimensions (Fig. 8.5) begin with 3D BIM, which relates to the geometry and spatial dimensions of the building. Next is 4D BIM, which includes project timelines and scheduling. 5D BIM involves cost estimation and budget tracking.

сталих та енергоефективних проєктах. Нарешті, 7D BIM представляє інформацію про управління об'єктами та життєвий цикл будівель.

Additionally, 6D BIM focuses on sustainable and energy-efficient designs. Finally, 7D BIM represents information about facility management and the building life cycle.

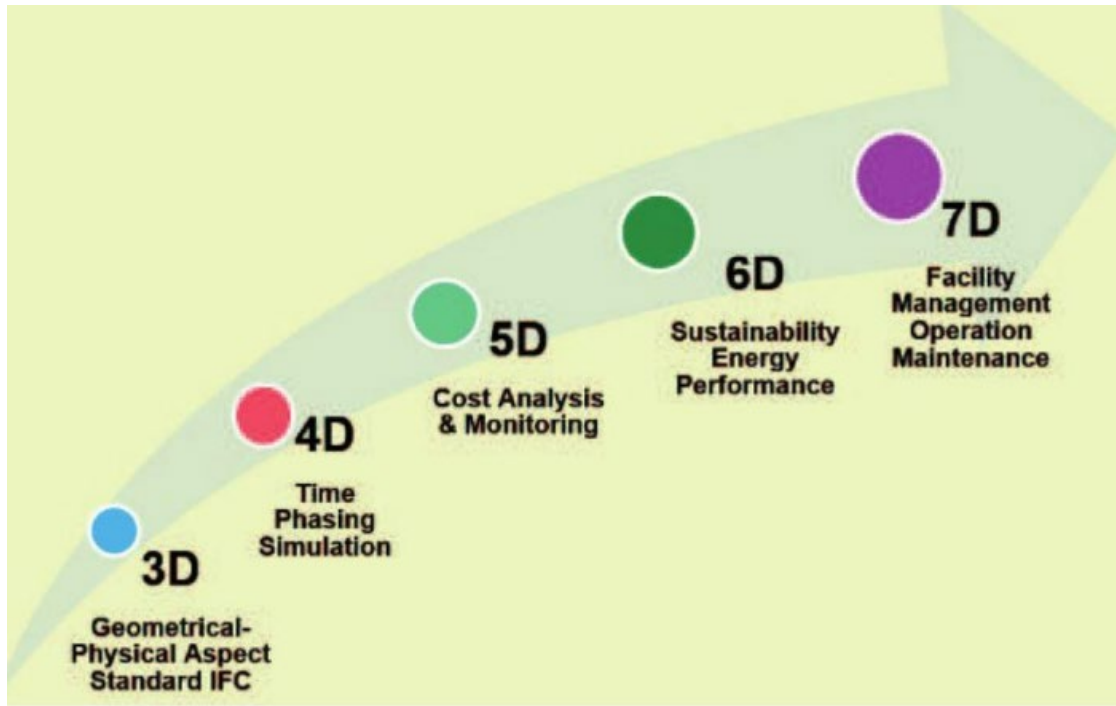


Рис. 8.5. Виміри BIM / BIM Dimensions

Кожен вимір виконує свою конкретну функцію, але разом усі виміри сприяють визначенню загальної вартості проєкту, часових рамок та очікуваного рівня сталості.

Each dimension performs its specific function, but together all the dimensions contribute to determining the overall project cost, timeline, and expected level of sustainability.

Список

Self-monitoring questions

Питання до самоконтролю

1. Чому витрати на експлуатацію і технічне обслуговування будівлі зазвичай перевищують витрати на її будівництво?

2. Чому інтеграція BIM із IoT, 3D-скануванням та іншими сучасними технологіями вважається перспективною для FM?

3. Які наслідки може мати неефективна комунікація для Facility Management?

4. У чому полягає суть превентивного (preventive) обслуговування?

5. Які основні проблеми передачі інформації у будівельних проєктах вирішує впровадження BIM?

6. Що таке рівні розвитку BIM-моделі (LOD) і яку роль вони відіграють у проєктному життєвому циклі?

7. Які виміри BIM (3D–7D) виділяють та які функції вони виконують?

8. Як використання BIM впливає на зменшення кількості помилок та дублювання даних у процесі проєктування та управління будівлею?

9. Які переваги BIM для Facility Management можна віднести до етапу експлуатації та технічного обслуговування будівель?

1. Why do the costs of operation and maintenance of a building usually exceed the costs of its construction?

2. Why is the integration of BIM with IoT, 3D scanning and other modern technologies considered promising for FM?

3. What consequences can ineffective communication have for Facility Management?

4. What is the essence of preventive maintenance?

5. What are the main problems of information transfer in construction projects that the implementation of BIM solves?

6. What are the levels of development of the BIM model (LOD) and what role do they play in the project life cycle?

7. What are the dimensions of BIM (3D–7D) and what are their functions?

8. How does the use of BIM affect the reduction of errors and data duplication in the design and management of a building?

9. What are the benefits of BIM for Facility Management in the operation and maintenance phase of buildings?

CHAPTER 9

6D BIM

РОЗДІЛ 9

6D BIM

Керуючі об'єктами були одними з перших фахівців, які усвідомили цінність проєктування, будівництва та експлуатації своїх будівель з використанням підходу BIM. Це стало можливим завдяки радикальним змінам у секторі AEC/FM. Причина також пов'язана з поточним економічним спадом, оскільки ефективне управління та обслуговування будівель стало першочерговим завданням для керівників об'єктів, які прагнуть заощадити кошти.

Окупність інвестицій, знайомство з принципами експлуатації та технічного обслуговування для впровадження BIM, а також сумісність у контексті експлуатації є прогалинами в дослідженнях, пов'язаних з експлуатацією та технічним обслуговуванням (E&M). Розуміння загальних вимог до даних BIM, сучасних методів доставки даних та картографування BIM, можливостей майбутніх технологій та гіпотетичних випадків використання BIM в E&M стало основою для проєктування потужних та широкодоступних систем та рішень BIM для E&M об'єктів.

Галузевий альянс за сумісність створив стандарт Industry Foundation Classes (IFC). Цей стандарт перетворення даних дозволяє

Facility managers were among the first professionals to recognize the value of designing, constructing, and operating their buildings using the BIM approach. This became possible due to radical changes in the AEC/FM sector. The reason is also related to the current economic downturn, as effective management and maintenance of buildings has become a top priority for facility managers seeking to save costs.

Return on investment, familiarity with operation and maintenance principles for BIM implementation, and interoperability in the context of operations are gaps in research related to operations and maintenance (E&M). Understanding general BIM data requirements, modern data delivery methods and BIM mapping, capabilities of future technologies, and hypothetical use cases of BIM in O&M has formed the basis for designing powerful and widely accessible BIM systems and solutions for facility E&M.

The Industry Alliance for Interoperability created the Industry Foundation Classes (IFC) standard. This data exchange standard allows sharing 3D models and other data

обмін 3D-моделлями та іншими даними між спеціалізованими інструментами BIM. IFC підтримується приблизно 150 програмними застосунками по всьому світу.

Національного стандарту моделювання інформації про будівлі (NBIMS) випустила стандарт, відомий як Обмін інформацією про будівельні операції (COBie).

COBie вибирає інформацію, отриману на етапах проєктування та будівництва, та передає її на етапи експлуатації та обслуговування. Зусилля щодо інтеграції COBie з BIM тривають.

BIM дозволяє керівникам об'єктів залучатися до процесу проєкту набагато раніше, впливаючи на проєктування та будівництво. Завдяки візуальній природі BIM усі зацікавлені сторони мають доступ до важливої інформації до завершення проєкту. Це включає орендарів, агентів з обслуговування та обслуговуючий персонал. Однак власники можуть зіткнутися з труднощами у визначенні найкращого часу для залучення цих осіб.

Використання технології BIM у управлінні об'єктами управління (FM) залежить від цілей організації, потреб допоміжної інфраструктури та різних інформаційних потреб організацій. Рис. 9.1 показує відсотковий розподіл досліджень BIM у різних сферах управління об'єктами.

between specialized BIM tools. IFC is supported by approximately 150 software applications worldwide.

The National Building Information Modeling Standard (NBIMS) has issued a standard known as Construction Operations Building Information Exchange (COBie).

COBie selects information obtained during the design and construction phases and transfers it to the operation and maintenance phases. Efforts to integrate COBie with BIM are ongoing.

BIM allows facility managers to become involved in the project process much earlier, influencing design and construction. Thanks to the visual nature of BIM, all stakeholders have access to important information before project completion. This includes tenants, service agents, and maintenance personnel. However, owners may face difficulties determining the best time to involve these parties.

The use of BIM technology in Facility Management (FM) depends on the organization's goals, auxiliary infrastructure needs, and various information requirements of organizations. Fig. 9.1 shows the percentage distribution of BIM research across different areas of facility management.

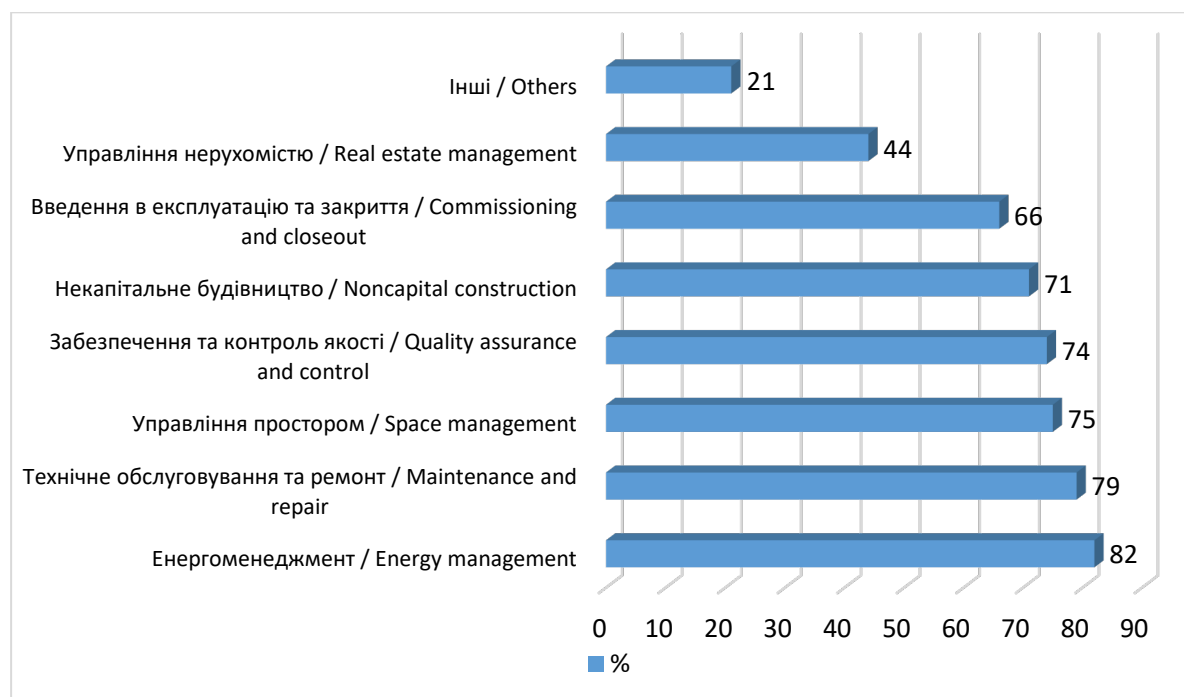


Рис. 9.1. Дослідження BIM у різних сферах управління об'єктами (2025) / BIM Research in Various Areas of Facility Management (2025)

Керівники та власники об'єктів використовують 6D BIM для управління експлуатацією та технічним обслуговуванням об'єктів. Цей вимір використовується для відстеження ключових даних про активи, таких як їх стан, документи з технічного обслуговування/експлуатації, історія технічного обслуговування та технічні характеристики для подальшого використання. 6D BIM – це унікальна концепція. Уся інформація про процес управління об'єктами збирається в одному місці в рамках інформаційної моделі будівлі. Ця стратегія допомагає покращити якість надання послуг протягом усього життєвого циклу проєкту. Використання 6D BIM гарантує, що вся інформація про проєкт буде доступна в найкращому можливому форматі від першого дня експлуатації до дня знесення.

Facility managers and owners use 6D BIM for managing the operation and maintenance of facilities. This dimension is used to track key asset data, such as their condition, operation/maintenance documents, maintenance history, and technical specifications for future use. 6D BIM is a unique concept. All information related to the facility management process is collected in one place within the Building Information Model. This strategy helps improve the quality of service delivery throughout the entire project life cycle. The use of 6D BIM ensures that all project information is available in the best possible format from the first day of operation until the day of demolition.

6D BIM дозволяє керівникам об'єктів та технічним спеціалістам ефективно знаходити компоненти будівлі та зменшує зусилля, необхідні для інтерпретації відображеної інформації. Ефективність досягається завдяки візуально орієнтованій 3D-інформації, що представляється BIM у синхронізованій формі.

Як наслідок, BIM у контексті управління об'єктами можна визначити як спільний інструмент «живого документа» в базі даних для управління точною інформацією про будівлю протягом усього її життєвого циклу. Це дозволяє власнику ефективніше керувати об'єктами.

9.1. Доповнена реальність (AR) / Віртуальна реальність (VR)

Технологічний розвиток по-різному впливає на всі галузі. В останні десятиліття цей вплив стає дедалі очевиднішим. Галузь архітектури, інженерії та будівництва (АЕС) значно еволюціонувала, з'являючись у складніших, великих будівлях та важкодоступних проєктах. Зростаюча увага до автоматизації будівництва, зумовлена зусиллями щодо подолання нестачі кваліфікованої робочої сили, призвела до впровадження нових інструментів у будівництві, таких як віртуальна реальність (VR). Цей інструмент був надалі розвинений у кілька VR-систем, включаючи доповнену реальність (AR).

6D BIM enables facility managers and technical specialists to efficiently locate building components and reduces the effort required to interpret the displayed information. Efficiency is achieved through visually oriented 3D information presented by BIM in a synchronized form.

As a result, BIM in the context of facility management can be defined as a collaborative “living document” tool within a database for managing accurate building information throughout its entire life cycle. This allows the owner to manage facilities more effectively.

9.1. Augmented Reality (AR) / Virtual Reality (VR)

Technological development affects all industries in different ways. In recent decades, this impact has become increasingly evident. The Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industry has significantly evolved, emerging in more complex, large-scale buildings and hard-to-reach projects. Growing attention to construction automation, driven by efforts to overcome the shortage of skilled labor, has led to the adoption of new construction tools such as Virtual Reality (VR). This tool has further evolved into several VR systems, including Augmented Reality (AR).

9.1.1. Використання AR/VR в управлінні об'єктами через BIM

Віртуальна реальність (VR) – це технологія, яка використовує комп'ютер для створення віртуальної 3D-моделі, що дозволяє користувачам бачити комп'ютерно-згенероване відтворення реальності або уявного середовища. Доповнена реальність (AR) – це технологія візуалізації, яка поєднує перегляд фізичного світу користувачем у реальному часі з віртуальними об'єктами, розміщеними в тому ж просторі.

VR – це штучно створене середовище, побудоване за допомогою програмного забезпечення та технологій, яке сприймається через слухові та візуальні канали. Величезна кількість завантаженої інформації може бути легко візуалізована за допомогою VR. Крім того, користувачі можуть взаємодіяти з віртуальними об'єктами та переміщатися по них. Функція навігації забезпечує зручне переміщення під час дослідження можливостей віртуального середовища.

Віртуальна реальність (VR) зробила можливою взаємодію з комп'ютерами та надзвичайно складними даними. VR було визначено як «представлення комп'ютерної моделі або бази даних, з якою можна взаємодіяти та маніпулювати через участь у віртуальному середовищі».

9.1.1. Use of AR/VR in Facility Management through BIM

Virtual Reality (VR) is a technology that uses computers to create a virtual 3D model, allowing users to see a computer-generated representation of reality or an imaginary environment. Augmented Reality (AR) is a visualization technology that combines the user's view of the physical world in real time with virtual objects placed in the same space.

VR is an artificially created environment built using software and technologies, perceived through auditory and visual channels. A vast amount of loaded information can be easily visualized using VR. Additionally, users can interact with virtual objects and move around within them. The navigation feature provides convenient movement while exploring the possibilities of the virtual environment.

Virtual Reality (VR) has made interaction with computers and highly complex data possible. VR has been defined as “the representation of a computer model or database with which one can interact and manipulate through participation in a virtual environment”.

Augmented Reality (AR) is defined as the overlay of 3D models onto physical space, including BIM-

Доповнена реальність (AR) визначається як накладання 3D-моделей на фізичний простір, включаючи інформацію про об'єкти на основі BIM, у режимі реального часу. AR забезпечує зручну платформу для підтримки польових робіт в управлінні об'єктами, їх експлуатації та технічному обслуговуванні (O&M).

Під час використання технології доповненої реальності (AR) зображення або дані, оброблені комп'ютером, накладаються на реальне середовище навколо користувача. Сенсорні дані надсилаються до мозку, у той час як мозок одночасно отримує стандартні сенсорні сигнали з навколишнього середовища.

Змішана реальність (3P) поєднує реальний та віртуальний світи з реальними та комп'ютерно-генерованими компонентами. Обидва світи «зливаються» разом, створюючи реалістичне середовище. Середовище 3P можна досліджувати, а користувачі можуть взаємодіяти як з реальними, так і з віртуальними об'єктами. У 3P поєднуються функції VR та AR. Оскільки ця технологія близька до AR, її іноді називають «покращеною» AR, але вона забезпечує більший ступінь фізичної взаємодії, ніж AR.

based object information, in real time. AR provides a convenient platform to support fieldwork in facility management, operation, and maintenance (O&M).

When using Augmented Reality (AR) technology, computer-processed images or data are overlaid onto the real environment surrounding the user. Sensory data is sent to the brain, while the brain simultaneously receives standard sensory signals from the surrounding environment.

Mixed Reality (MR) combines the real and virtual worlds with real and computer-generated components. Both worlds “merge” together, creating a realistic environment. The MR environment can be explored, and users can interact with both real and virtual objects. MR combines the features of VR and AR. Since this technology is close to AR, it is sometimes called “enhanced” AR, but it provides a higher degree of physical interaction than AR.

9.1.2. Інтеграція доповненої/віртуальної реальності (AR/VR) у секторі будівництва

Зі збільшенням інвестицій у віртуальну та доповнену реальність (VR) ця галузь починає розвивати технології, орієнтовані на певні сектори. Ці технології мають потенціал змінити спосіб ведення бізнесу в секторі будівництва, будівництва та комунального господарства (АЕС). У той час як кілька великих компаній удосконалюють VR та AR для конкретного використання в АЕС, стартапи в цій галузі зосереджуються виключно на секторі АЕС. Імерсійні технології, включаючи AR, VR та інші, зрештою трансформують весь ланцюг створення вартості в АЕС. Ця трансформація призводить до:

- покращення маркетингу;
- покращення взаємодії з клієнтами та командою;
- економії часу та коштів на етапі проєктування;
- виявлення дороговартісних помилок до їх виникнення;
- впливу на вибір будівельних матеріалів;
- підвищеної безпеки на будівельних майданчиках.

9.1.3. Роль доповненої реальності в управлінні будівництвом

Ефективного управління будівництвом можна досягти за допомогою технологій AR/VR завдяки інтуїтивному сприйняттю користувачами

9.1.2. Integration of Augmented/Virtual Reality (AR/VR) in the Construction Sector

With increasing investments in virtual and augmented reality (VR/AR), this industry is beginning to develop technologies focused on specific sectors. These technologies have the potential to change the way business is conducted in the architecture, engineering, construction, and operations (AECO) sector. While several large companies are refining VR and AR for specific use within AECO, startups in this field focus exclusively on the AECO sector. Immersive technologies, including AR, VR, and others, will ultimately transform the entire value chain in AECO. This transformation leads to:

- improved marketing;
- enhanced interaction with clients and teams;
- time and cost savings during the design phase;
- detection of costly errors before they occur;
- influence on the selection of building materials;
- increased safety on construction sites.

The Role of Augmented Reality in Construction Management

Effective construction management can be achieved using AR/VR technologies due to the intuitive

проектних креслень. Однак, з іншого боку, у віртуальному середовищі з використанням 4D BIM-моделі відсутня перспектива реальних умов на об'єкті. Як результат, якщо технологія AR, яка мінімізує когнітивний опір, застосовується до об'єктів технічного обслуговування, очікується значне підвищення продуктивності завдяки корисності та цінності AR. Ключові технології для процесів у реальному часі завдяки AR-візуалізації під час співпраці включають:

- технологію підтримки будівництва на основі VR/AR;
- 3D-накладання інформації + технологія доповненої реальності;
- технологію 3D-перетворення даних для доповненої реальності.

Поєднання віртуальних об'єктів з реальними зображеннями в режимі реального часу є основною концепцією доповненої реальності (AR). Процес впровадження виглядає таким чином:

- ідентифікуються об'єкти, а потім на основі спостережуваних об'єктів оцінюється положення камери;
- використовуючи оціночні дані, стає можливим передбачити місце, де будуть зареєстровані віртуальні об'єкти;
- віртуальні та реальні зображення змішуються.

За допомогою AR-систем локальний простір реального світу, який бачить користувач, поєднується з доповненим зображенням та віртуальними об'єктами. Для AR необхідно ідентифікувати мітки на елементах об'єктів, щоб легко їх

perception of design drawings by users. However, on the other hand, in a virtual environment using a 4D BIM model, the perspective of real on-site conditions is missing. As a result, if AR technology, which minimizes cognitive resistance, is applied to maintenance objects, a significant increase in productivity is expected due to the usefulness and value of AR. Key technologies for real-time processes enabled by AR visualization during collaboration include:

- VR/AR-based construction support technology;
- 3D information overlay + augmented reality technology;
- 3D data transformation technology for augmented reality.

The combination of virtual objects with real images in real time is the core concept of augmented reality (AR). The implementation process is as follows:

- objects are identified, then based on observed objects the camera position is estimated;
- using the estimated data, it becomes possible to predict locations where virtual objects will be registered;
- virtual and real images are blended.

With AR systems, the local real-world space visible to the user is combined with augmented imagery and virtual objects. For AR,

розпізнавати, подібно до систем RFID та штрих-кодів. Позиціонування користувача та візуальний маркер, а також орієнтація камери, використовуються для визначення місцезнаходження користувача. Це дозволяє точно відображати на екрані інформацію, пов'язану з технічним обслуговуванням, постійно показуючи її на розпізаному обладнанні.

Елементи, що використовуються під час застосування технології доповненої реальності (AR) в галузі будівництва, будівництва та конструювання.

1. Технологія на основі GPS: для визначення місцезнаходження користувача використовується технологія глобальної системи позиціонування (GPS). Процес доповнення реального середовища здійснюється шляхом проєктування 3D-моделі на заздалегідь визначене місцезнаходження за допомогою дисплея.

2. Технологія на основі зору: для поєднання 3D-моделі з реальним світом точкові об'єкти виявляються на основі зображень, отриманих камерою, і розраховується положення камери.

3. Технологія 3D-розпізнавання в реальному часі: для суміщення віртуальних об'єктів з реальними місцями ідентифікується та інтерпретується реальний простір.

4. Технологія відстеження положення: значення відстеження положення користувача в режимі реального часу відображаються на екрані.

it is necessary to identify tags on object elements to facilitate easy recognition, similar to RFID and barcode systems. User positioning and visual markers, along with camera orientation, are used to determine the user's location. This allows accurate display of maintenance-related information constantly on the recognized equipment.

Elements used when applying augmented reality (AR) technology in the architecture, engineering, and construction (AEC) industry.

1. GPS-based technology: global positioning system (GPS) technology is used to determine the user's location. The augmentation of the real environment is carried out by projecting the 3D model onto a predetermined location via a display.

2. Vision-based technology: to combine the 3D model with the real world, point objects are detected based on images captured by the camera, and the camera position is calculated.

3. Real-time 3D recognition technology: to align virtual objects with real locations, the real space is identified and interpreted.

4. Position tracking technology: user's real-time position tracking values are displayed on the screen.

5. Head tracking technology: by determining the user's position based

5. Технологія відстеження голови: Визначаючи положення користувача на основі його руху в реальному просторі та відстежуючи рухи голови навіть під час нерухомості, можна відповідно переміщувати віртуальні об'єкти.

6. Технологія відстеження погляду (відстеження зіниці): ця технологія використовує обробку зображень для відстеження фокусних точок зіниць або в режимі реального часу, або через спеціальний передавач.

7. Технологія високої прозорості: зображення віртуального об'єкта природним чином накладається на реальне середовище, відбиваючи світло з реального світу на сітківку.

Недоліки, такі як втрата часу на доступ до даних, погана усна комунікація та відволікаючі фактори, спричинені перемиканням між доменами, можна компенсувати за допомогою доповненої реальності (AR). Тепер менеджери можуть носити пристрої AR з собою куди завгодно, оскільки вони стали компактними та навіть портативними. Завдяки мобільним інструментам AR, удосконаленню доповненою візуалізацією, доступ до інформації про об'єкти можна отримати з будь-якого місця. Таким чином, завдяки отриманій цифровим методам інформації для ефективнішого управління об'єктами, автоматизована локалізація візуально доповнених даних може стати життєздатним рішенням.

on their movement in real space and tracking head movements even during stillness, virtual objects can be moved accordingly.

6. Eye-tracking technology (pupil tracking): this technology uses image processing to track focal points of the pupils either in real time or via a special transmitter.

7. High transparency technology: the image of the virtual object is naturally overlaid on the real environment, reflecting light from the real world onto the retina.

Disadvantages such as time loss accessing data, poor verbal communication, and distractions caused by domain switching can be compensated by augmented reality (AR). Now managers can carry AR devices with them anywhere, as they have become compact and even portable. Thanks to mobile AR tools enhanced with augmented visualization, access to facility information can be obtained from any location. Thus, through information obtained by digital methods for more efficient facility management, automated localization of visually augmented data can become a viable solution.

9.1.4. Роль віртуальної реальності в управлінні будівництвом

BIM охоплює всі етапи розробки, включаючи проєктування, впровадження та управління об'єктами. Результат технології BIM не повинен обмежуватися лише тривимірною моделлю. Вона також дозволяє адаптувати та впроваджувати модель BIM разом із технологією віртуальної реальності. Учасники галузі будівництва та конструювання можуть використовувати віртуальну реальність для дослідження проєкту до його будівництва. Інженери та архітектори можуть використовувати цю можливість для більш природного створення та модифікації своїх проєктів, а також повторного використання інформації безпосередньо з моделі. Віртуальна реальність вважається передовим інструментом навчання для фахівців із будівництва та конструювання.

Розширення BIM на нові технології, такі як VR, дозволяє інтегрувати доступність, маніпулювання та генерацію даних з BIM-проєкту з VR-візуалізацією та інтерактивністю. Таким чином, оптимізація продуктів для забезпечення користувачів BIM-та VR-підключенням стала основною метою для програмних компаній. У будівельній галузі різні бізнес-орієнтовані фактори, що пропонуються VR, можуть додати додаткову цінність та позитивно вплинути на час, вартість та якість.

9.1.4. The Role of Virtual Reality in Construction Management

BIM encompasses all stages of development, including design, implementation, and facility management. The outcome of BIM technology should not be limited to just a three-dimensional model. It also allows adapting and implementing the BIM model together with virtual reality technology. Construction and design industry participants can use virtual reality to explore the project before construction. Engineers and architects can use this opportunity for more natural creation and modification of their designs, as well as reuse information directly from the model. Virtual reality is considered an advanced training tool for construction and design professionals.

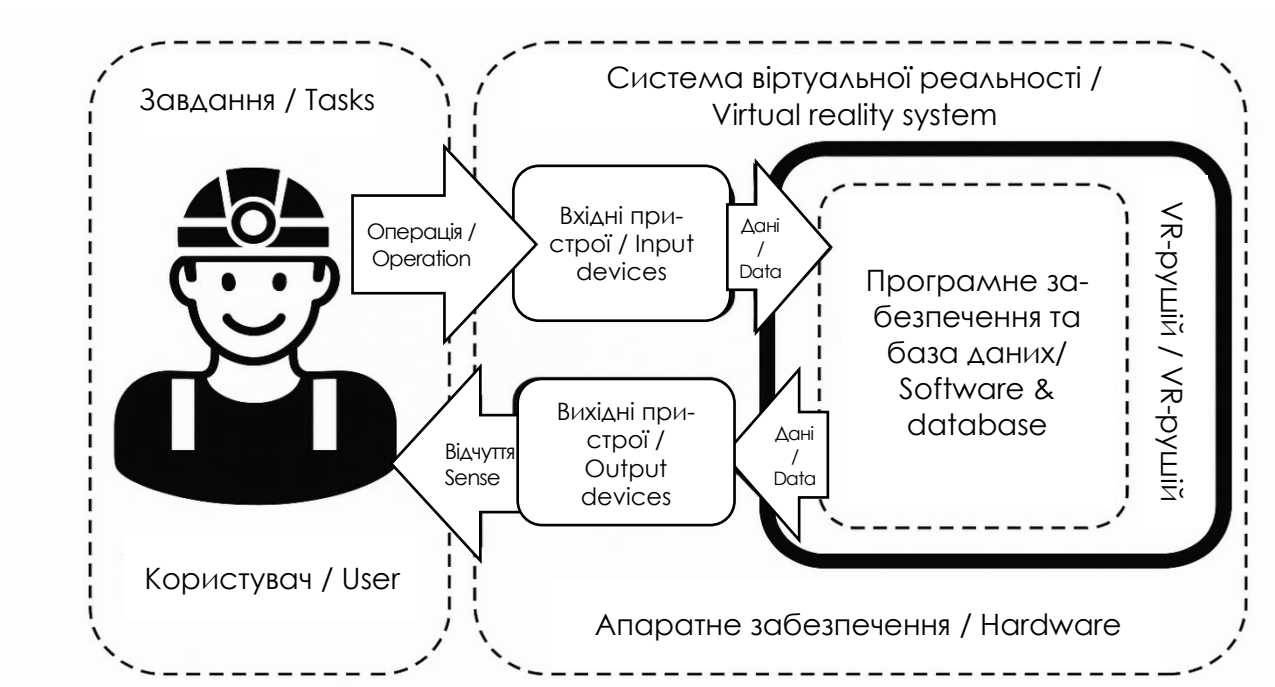
The extension of BIM to new technologies such as VR enables the integration of accessibility, manipulation, and data generation from the BIM project with VR visualization and interactivity. Thus, optimizing products to provide users with BIM and VR connectivity has become a primary goal for software companies. In the construction industry, various business-oriented benefits offered by VR can add additional value and positively impact time, cost, and quality.

Для візуалізації простору за допомогою віртуальної реальності (VR) необхідні такі важливі технології:

- інформаційна система, організована за етапами проєкту;
- процес розподілу та обміну інформацією;
- технологія, що використовується для позиціонування застосунків та внутрішніх маркерів.
- система віртуальної реальності поділяється на чотири основні частини (рис. 9.2);
- апаратне забезпечення, включаючи пристрої введення/виведення;
- VR-рушій, включаючи базу даних та програмне забезпечення;
- користувач;
- завдання, що виконуються користувачем.

The following key technologies are required to visualize space using virtual reality (VR):

- an information system organized by project stages;
- a process for distributing and sharing information;
- technology used for positioning applications and internal markers.
- The virtual reality system is divided into four main parts (Fig. 9.2);
- hardware, including input/output devices;
- VR engine, including database and software;
- user;
- tasks performed by the user.



**Рис. 9.2. Компоненти систем віртуальної реальності /
Components of Virtual Reality Systems**

Щодо пристроїв виведення, VR-додатки переважно покладаються на три загальні типи дисплеїв:

- візуальний;
- слуховий;
- тактильний.

Існує три основні типи візуальних дисплеїв, відомі як рівні занурення.

1. Неіммерсивна VR-платформа: неіммерсивна VR, також відома як Desktop VR, – це 3D-середовище, де монітор використовується для перегляду, а миша – для навігації. Цей тип дисплея має такі переваги, як портативність і низька вартість. Прикладом такого типу дисплея є Autodesk Navisworks.

2. Напівзахоплююча VR-платформа: система, класифікована як VR на основі проєкції, створює частковий досвід віртуальної реальності. Вона пропонує обмежене відчуття занурення порівняно з настільною VR. Компоненти системи включають великі екрани та кілька проєкторів. Яскравим прикладом такого типу дисплея є автоматичне віртуальне середовище печери (CAVE), показане на рис. 9.3. Користувач оточений 4-6 екранами, розташованими в кубічній формі для забезпечення мобільності користувача.

3. Повністю захоплююча VR-платформа: ця система надає користувачам повний огляд віртуального середовища на 360 градусів. Повне занурення досягається за допомогою дисплея, що кріпиться на голові (HMD) (рис. 9.4).

Regarding output devices, VR applications mainly rely on three common types of displays:

- visual;
- auditory;
- tactile.

There are three main types of visual displays, known as levels of immersion.

1. Non-immersive VR platform: Non-immersive VR, also known as Desktop VR, is a 3D environment where a monitor is used for viewing and a mouse for navigation. This type of display has advantages such as portability and low cost. An example of this display type is Autodesk Navisworks.

2. Semi-immersive VR platform: A system classified as projection-based VR creates a partial virtual reality experience. It offers a limited sense of immersion compared to desktop VR. System components include large screens and multiple projectors. A notable example of this display type is the automatic virtual environment Cave (CAVE), shown in Fig. 9.3. The user is surrounded by 4-6 screens arranged in a cubic shape to provide user mobility.

3. Fully immersive VR platform: This system provides users with a complete 360-degree view of the virtual environment. Full immersion is achieved using a head-mounted display (HMD) (Fig. 9.4). This display

Inspection, Diagnostics and Implementation of BIM Technologies in Construction

Цей дисплей створює репліку в масштабі 1:1, створюючи повне відчуття присутності.

creates a 1:1 scale replica, producing a full sense of presence.

Прототип віртуальної реальності CAVE / CAVE virtual reality prototype

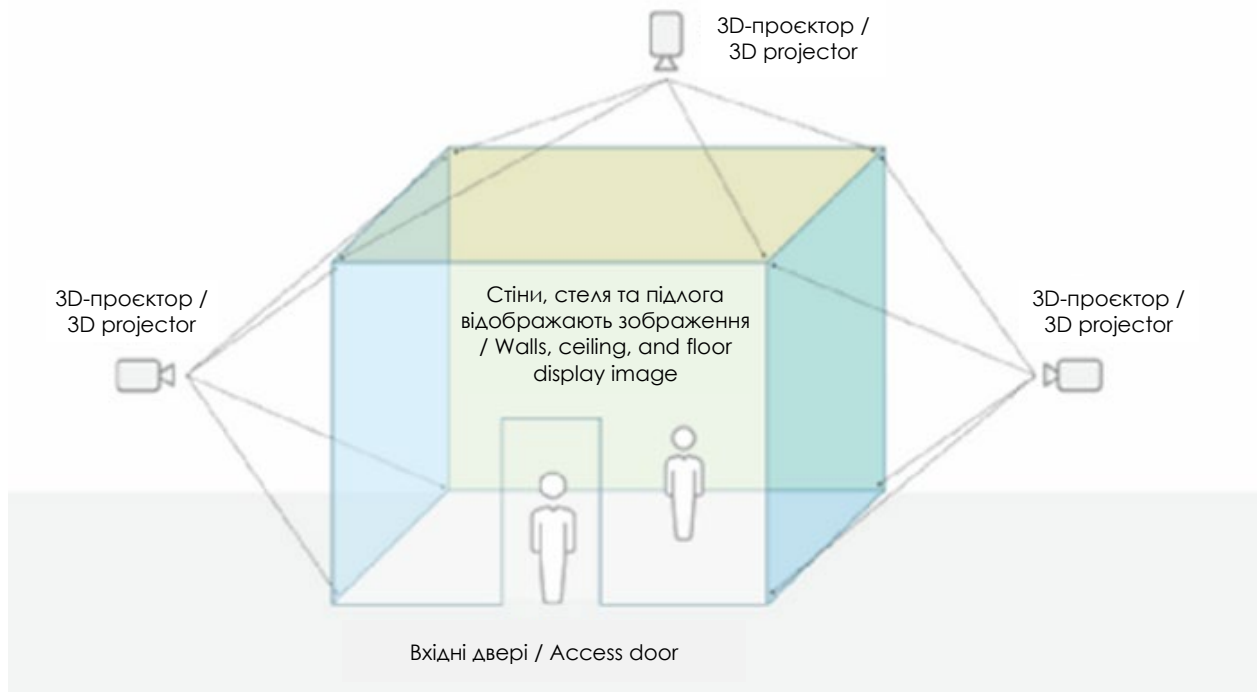


Рис. 9.3. ПЕЧЕРНЕ середовище g / CAVE environment



Рис. 9.4. Окуляри віртуальної реальності HMD / Virtual Reality Head-Mounted Display (HMD)

Пристрої введення відносяться до таких, з якими користувач взаємодіє

Input devices relate to how the user interacts with the virtual envi-

у віртуальному середовищі. Сигнали щодо дій користувача надсилаються до системи, а потім відповіді передаються назад користувачеві через пристрої виведення. Пристрої відстеження, також відомі як «датчики положення», використовуються для відстеження положення користувача. Прикладами таких пристроїв є ультразвукові, електромагнітні та оптичні датчики, а також контролери.

Щодо програмного забезпечення, основними типами програмного забезпечення для реалізації VR є інструментальні набори або комплекти розробки програмного забезпечення (SDK) та системи розробки. SDK відомі як бібліотеки програмування (зазвичай написані на C або C++). Вони надають набір функцій, що спрощують процес програмування для створення базового макета VR-додатку. Системи розробки – це додатки з вбудованими графічними інтерфейсами користувача (GUI), які дозволяють користувачам створювати віртуальні середовища без детальних знань програмування.

Програмні додатки для 3D-моделювання, які також називають інструментами розробки BIM, відповідають за створення віртуальних середовищ. Прикладами таких додатків є Autodesk Revit, ArchiCAD, Autodesk Navisworks, 3ds Max та інші. Технології розробки ігор також відіграють важливу роль у створенні програмних додатків VR. Unreal

Environment. Signals about the user's actions are sent to the system, and responses are then transmitted back to the user through output devices. Tracking devices, also known as "position sensors," are used to monitor the user's position. Examples of such devices include ultrasonic, electromagnetic, and optical sensors, as well as controllers.

Regarding software, the main types used for implementing VR are Software Development Kits (SDKs) and development systems. SDKs, known as programming libraries (usually written in C or C++), provide a set of functions that simplify the programming process to create a basic VR application layout. Development systems are applications with built-in graphical user interfaces (GUIs) that allow users to create virtual environments without detailed programming knowledge.

3D modeling software applications, also called BIM development tools, are responsible for creating virtual environments. Examples of such applications include Autodesk Revit, ArchiCAD, Autodesk Navisworks, 3ds Max, and others. Game development technologies also play an important role in creating VR software applications. Unreal Engine and Unity 3D are popular platforms that support VR technology in construction.

Engine та Unity 3D – це популярні платформи, що підтримують технологію VR у будівництві.

Ігровий движок — це програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом для комп'ютерних ігор з чудовим 3D-рендерингом та врахуванням фізичних законів. Ігрові движки широко використовуються в секторі АЕС.

Інтеграція ігрового движка на основі BIM та VR демонструє величезний потенціал у секторі АЕС з прогнозованим зростанням VR-технологій. Спілкування між користувачами VR можливе в межах віртуального середовища занурення, а також взаємодія з користувачем у цьому середовищі, що раніше було неможливо в ігрових движках на основі BIM.

Використання віртуальної реальності в бізнес-секторі АЕС зростає. Занурення користувачів у повномасштабне середовище та створення відчуття присутності в незабудованому просторі можливі лише завдяки VR. BIM має потенціал для оптимізації за допомогою VR, і це стало можливим двома способами:

1. Покрокові інструкції – найважливішою особливістю є те, що користувачі можуть досліджувати 3D-модель у віртуальному світі в режимі реального часу як зсередини, так і зовні.

2. Уточнення даних – це здебільшого стосується отримання збережених даних у BIM-моделі та

A game engine is open-source software for computer games featuring excellent 3D rendering and physics simulation. Game engines are widely used in the AEC sector.

The integration of BIM-based game engines and VR demonstrates enormous potential in the AEC sector, with expected growth in VR technologies. Communication between VR users is possible within the immersive virtual environment, as well as interaction with users in that environment, which was previously impossible in BIM-based game engines.

The use of virtual reality in the AEC business sector is increasing. Immersing users in a full-scale environment and creating a sense of presence in an unbuilt space is only possible through VR. BIM has the potential for optimization through VR, which has become possible in two ways:

1. Step-by-step instructions – the most important feature is that users can explore the 3D model in the virtual world in real time, both inside and outside.

2. Data refinement – this mostly concerns retrieving stored data from the BIM model and key parameters during the creation of parametric objects while modeling.

Considering the advantages of BIM use, the development of virtual

ключових параметрів під час створення параметричних об'єктів під час моделювання.

Враховуючи переваги використання BIM, розвиток практик віртуальної реальності (VR) у виробничому секторі, ймовірно, стимулював ширше використання VR-моделей у секторі будівництва, проєктування та будівництва. Однак, досі залишаються питання щодо точного використання VR на різних етапах будівництва, яке залишається невизначеним. У таблиці 9.1 показано додаткові способи використання VR в галузі будівництва, проєктування та будівництва.

Навчання використанню технології віртуальної реальності (VR) є важливим аспектом для максимального використання її переваг. Переваги VR-навчання в будівництві включають:

- запобігання реальним небезпекам та нещасним випадкам;
- підготовка до надзвичайних ситуацій;
- підвищення ефективності роботи.

З іншого боку, технології віртуальної реальності (VR) ще належить пройти довгий шлях, перш ніж вона стане широко впровадженою в будівельній галузі. Багато інженерів та архітекторів наразі не мають необхідних навичок для роботи з VR-моделями.

reality (VR) practices in the manufacturing sector likely stimulated broader use of VR models in the construction, design, and building sector. However, questions remain regarding the precise use of VR at various stages of construction, which remains unclear. Table 9.1 shows additional ways VR is used in the construction, design, and building industry.

Training in the use of Virtual Reality (VR) technology is an important aspect for maximizing its benefits. The advantages of VR training in construction include:

- prevention of real hazards and accidents;
- preparation for emergency situations;
- increased work efficiency.

On the other hand, Virtual Reality (VR) technologies still have a long way to go before becoming widely implemented in the construction industry. Many engineers and architects currently lack the necessary skills to work with VR models.

Таблиця 9.1 –Застосування віртуальної реальності (VR) у будівельній та конструкторській промисловості

Table 9.1 – Applications of Virtual Reality (VR) in the Construction and Structural Industry

Функції / Functions	Подробиці / Details
Співпраця/міждисциплінарна робота / Collaboration/interdisciplinary work	•Компіляція моделей VR для створення прототипів для представлення міждисциплінарної роботи / Compilation of VR models to build prototypes to represent interdisciplinary work. •Розробка користувальницьких інтерфейсів для дизайнерів / Developing user interfaces for designers.
Стандарти / Standards	•Розробка IFC для САПР / IFC development for CAD. •Обмін даними CAD і VR / CAD and VR data exchange. •Зв'язок із ГІС IAI, картографування IFC / Linking with GIS IAI, IFC mapping.
Аналіз вартості всього життя	•Візуальна калькуляція / Visual Costing. •Можливий аналіз / What-if analysis. •Аналіз роботи / Operation analysis.
Моделювання та конструювання	•Digital Architecture - просторовий аналіз дизайну / Digital Architecture - design spatial analysis. •Ранній етап проектування - інтеграція моделі VR зі структурною моделлю, перевірка змови / Early stage of design - integration of VR model, with structural model, collusion checking.
Планування	•Інформація про процес 4D-моделювання, пов'язана з об'єктами VR / 4D modelling process information linked to VR objects. •Інтеграція міського планування/ГІС/VR / Urban planning/GIS/VR integration.
вимірювання прогресу та моделювання. Інформація про виконання	•Захоплення зображення / Image Capture. •Технологія лазерного сканування для архітектурного середовища, інтеграція з презентаційними технологіями, розпізнавання об'єктів / Laser scanning technology for the built environment, integration with presentation technologies, object recognition.
спілкування	•Візуалізація/покрокове керівництво / Visualisation/Walkthrough. •3D/4D/nD візуалізація / 3D/4D/nD visualisations. •Мобільна та мережева технологія для передачі візуальних даних / Mobile and grid technology to communicate visual data.

Можна відзначити такі проблеми, що впливають на використання VR у будівельній галузі:

- відсутність оптимізованого програмного забезпечення;
- коригування 3D-моделей;
- рендеринг VR-моделей;
- культурні звички та прийняття віртуальної реальності.

The following issues affecting the use of VR in the construction industry can be noted:

- lack of optimized software;
- adjustment of 3D models;
- rendering of VR models;
- cultural habits and acceptance of virtual reality.

Regarding the first issue, building a VR model requires converting BIM

Щодо першої проблеми, побудова VR-моделі вимагає розподілу BIM-моделей у різні формати для ефективного використання ігрових двигунів для цілей VR.

Друга проблема полягає в різноманітності середовища BIM, де різні функції на кількох етапах проекту створюють труднощі. Проблема полягає в налаштуванні та інтеграції всіх цих функцій для забезпечення цілісного віртуального досвіду.

Рендеринг та графіка є критично важливими факторами для підтримки досвіду віртуальної реальності. Поточний рівень реалізму ще не відповідає очікуванням користувачів, а погано розроблені моделі все ще перешкоджають розумінню та сутності віртуальної реальності.

Опір змінам – ще одна значна проблема, що впливає на будь-яку нову та підтримуючу технологію. У будівельній галузі технологію віртуальної реальності часто сприймають як розвагу або «додаткову функцію». На жаль, недостатня обізнаність про корисність віртуальної реальності у складних інженерних завданнях залишається основною причиною такого сприйняття.

9.2. Інтеграція AR та VR в 6D BIM для оптимізації життєвого циклу будівлі

Важливим аспектом управління об'єктами (FM) є доступність інформації про FM для керівників об'єктів

models into different formats for effective use of game engines for VR purposes.

The second issue lies in the diversity of the BIM environment, where various functions at multiple project stages create difficulties. The challenge is configuring and integrating all these functions to provide a cohesive virtual experience.

Rendering and graphics are critical factors for supporting the virtual reality experience. The current level of realism still does not meet user expectations, and poorly designed models continue to hinder understanding and the essence of virtual reality.

Resistance to change is another significant challenge affecting any new and supportive technology. In the construction industry, virtual reality technology is often perceived as entertainment or an “extra feature.” Unfortunately, insufficient awareness of the usefulness of virtual reality in complex engineering tasks remains a major reason for this perception.

9.2. Integration of AR and VR in 6D BIM for optimizing the building lifecycle

An important aspect of facility management (FM) is the availability of FM information to facility man-

на вимогу. Іншим ключовим аспектом є представлення цієї інформації у спосіб, який персонал об'єкта може легко інтерпретувати. RFID, штрих-коди, доповнена реальність (AR) та віртуальна реальність (VR) були інтегровані з BIM для покращення процесів експлуатації, технічного обслуговування та ремонту.

Для технології доповненої реальності (AR) встановлення маркерів необхідне для ідентифікації елементів будівлі. Ідентифікація компонентів будівлі для технології доповненої реальності вимагає попередньо визначених фізичних маркерів, які можуть розпізнавати системи доповненої реальності. Тому будь-яка система обслуговування на основі доповненої реальності, що використовує модель BIM, не буде ефективною, якщо видимість маркерів нечітка.

Оскільки віртуальні моделі можуть бути дуже корисними для проєктування певних типів будівель, таких як заклади охорони здоров'я, їх часто використовуються під час перевірки проєктів. Можливість тестувати та досліджувати різні альтернативні варіанти дизайну з членами команди на ранніх етапах процесу проєктування може бути полегшена завдяки віртуальному прототипуванню.

Запропоновано застосування віртуальної реальності (VR), щоб надати користувачам можливість бачити моделі від першої особи. На відміну від перегляду моделей на

агерах за вимогою. Іншим ключовим аспектом є представлення цієї інформації у спосіб, який персонал об'єкта може легко інтерпретувати. RFID, штрих-коди, доповнена реальність (AR), та віртуальна реальність (VR) були інтегровані з BIM для покращення процесів експлуатації, технічного обслуговування та ремонту.

Для технології доповненої реальності (AR) встановлення маркерів необхідне для ідентифікації елементів будівлі. Ідентифікація компонентів будівлі для технології доповненої реальності вимагає попередньо визначених фізичних маркерів, які можуть розпізнавати системи доповненої реальності. Тому будь-яка система обслуговування на основі доповненої реальності, що використовує модель BIM, не буде ефективною, якщо видимість маркерів нечітка.

Оскільки віртуальні моделі можуть бути дуже корисними для проєктування певних типів будівель, таких як заклади охорони здоров'я, їх часто використовуються під час перевірки проєктів. Можливість тестувати та досліджувати різні альтернативні варіанти дизайну з членами команди на ранніх етапах процесу проєктування може бути полегшена завдяки віртуальному прототипуванню.

Запропоновано застосування віртуальної реальності (VR), щоб надати користувачам можливість бачити моделі від першої особи. На відміну від перегляду моделей на

робочому столі, VR дозволяє користувачам повніше відчувати середовище. Користувачі можуть зануритися у віртуальний світ, орієнтуватися в ньому та взаємодіяти з ним, допомагаючи оцінювати потенційні проблеми з обслуговуванням та надавати конструктивний зворотний зв'язок щодо них. Для цього використовується певний рівень розробки (LOD), який показує властивості елементів моделі, такі як форма, площа, розмір та просторовий розподіл. Цей LOD має вирішальне значення для процесів перевірки проєкту керівниками об'єктів. Рекомендований LOD – LOD 400.

Технології AR/VR в управлінні об'єктами дозволяють 6D BIM вийти на новий рівень, орієнтований на покращення та ефективне управління об'єктами.

9.2.1. Змішана реальність (MR) у 6D BIM

Застосування змішаної реальності (MR) досліджувалося в різних галузях, таких як інспекції будівель, використання BIM для проактивного управління дефектами, монтаж інженерних комунікацій та підвищення безпеки на будівельних майданчиках.

Використання технології доповненої реальності (AR) для перевірки компонентів будівель дозволяє співпрацювати в режимі реального часу, обмінюючись інформацією про стан на місці між керівником об'єкта та компанією з

it, and interact with it, helping to assess potential maintenance issues and provide constructive feedback. This uses a certain level of development (LOD) that shows element properties such as shape, area, size, and spatial distribution. This LOD is critical for project review processes by facility managers. The recommended LOD is LOD 400.

AR/VR technologies in facility management enable 6D BIM to reach a new level focused on improved and efficient facility management.

9.2.1. Mixed Reality (MR) in 6D BIM

The application of Mixed Reality (MR) has been explored in various fields such as building inspections, using BIM for proactive defect management, installation of engineering systems, and enhancing safety on construction sites.

The use of Augmented Reality (AR) technology for checking building components enables real-time collaboration by sharing on-site status information between the facility manager and the maintenance company. Thanks to AR/VR,

обслуговування. Завдяки використанню AR/VR стало можливим прийняття точніших та швидших рішень щодо питань технічного обслуговування, а також усунення неефективних елементів перероблення. Технологія VR дозволяє одночасно переглядати інформацію про історичний план перевірки та перевіряти положення на місці.

Було запроваджено технологію розгортання рамкової системи для використання змішаної реальності (MR) в управлінні об'єктами нерухомості (FM). Ця MR-система складається з двох основних модулів: модуля AR (доповненої реальності) та модуля інтерактивної доповненої віртуальності (IAV).

Розробка прототипу була здійснена за допомогою ігрового рушія Unity3D. Unity3D дозволив створити віртуальне середовище та взаємодію між користувачами та компонентами будівлі. Взаємодія базувалася на концепції, що елементи будуть підсвічуватися при виборі, після чого буде отримана інформація про вибраний елемент. Крім того, точний вибір елементів будівлі також був досягнутий за допомогою доповненої реальності (AR), де інформацію про елемент можна було отримати, не витрачаючи час на його пошук у BIM-моделі.

Однак ця технологія зіткнулася з такими проблемами, які потребують подальших досліджень:

more accurate and faster decisions can be made regarding maintenance issues, as well as the elimination of inefficient rework elements. VR technology allows simultaneous viewing of historical inspection plans and checking positions on site.

A deployment framework technology was introduced for using Mixed Reality (MR) in facilities management (FM). This MR system consists of two main modules: the AR (Augmented Reality) module and the Interactive Augmented Virtuality (IAV) module.

The prototype development was carried out using the Unity3D game engine. Unity3D enabled the creation of a virtual environment and interaction between users and building components. Interaction was based on the concept that elements would be highlighted when selected, after which information about the selected element would be obtained. Additionally, precise selection of building elements was also achieved through Augmented Reality (AR), where information about an element could be accessed without spending time searching for it in the BIM model.

However, this technology has encountered the following challenges that require further research:

- відсутність стандартів візуалізації щодо рівнів занурення та взаємодії;
- пошук унікальних цілей відстеження в приміщенні;
- відсутність безконтактного режиму, який би дозволив працівникам легше виконувати завдання;
- неможливість інтеграції рухомих об'єктів у середовище доповненої реальності (AR);
- метод вибору на сенсорному екрані може випадково активувати інші кнопки.

9.2.2. Використання доповненої реальності в 6D BIM

Було розроблено планшетну систему доповненої реальності для анотації реальних елементів коментарями, що підтримують завдання управління об'єктами (FM) через сенсорний інтерфейс для віддалених користувачів. Іншими словами, це система доповненої реальності для віддаленої співпраці під час перевірки та технічного обслуговування обладнання.

Система AR-фреймворку в 6D BIM використовує метод пошуку зображень для локалізації всередині приміщень. Концепція методу пошуку зображень полягає в тому, що 2D BIM-рендери використовуються як набір даних. Оскільки орієнтація BIM-рендерів відома, метод пошуку намагається оцінити місцезнаходження користувача, порівнюючи

- lack of visualization standards regarding levels of immersion and interaction;
- difficulty in locating unique tracking targets within rooms;
- absence of a contactless mode that would allow workers to perform tasks more easily;
- inability to integrate moving objects into the Augmented Reality (AR) environment;
- touchscreen selection method may accidentally activate other buttons.

9.2.2. Use of Augmented Reality in 6D BIM

A tablet-based augmented reality system was developed to annotate real-world elements with comments supporting facility management (FM) tasks through a touch interface for remote users. In other words, this is an augmented reality system for remote collaboration during equipment inspection and maintenance.

The AR framework system in 6D BIM uses an image retrieval method for indoor localization. The concept of the image retrieval method is that 2D BIM renders are used as a dataset. Since the orientation of the BIM renders is known, the retrieval method attempts to estimate the user's location by comparing the render with the image the user sees. Visualization

цей рендер із зображенням, яке бачить користувач. Візуалізація за допомогою AR є потужним та ефективним інструментом для передачі інформації про будівлю.

Доповнена реальність (AR) також досліджувалася для випробувань, щоб перевірити можливість використання природних маркерів, таких як покажчики виходу. Використання природних маркерів, таких як покажчики виходу, є кращою ідеєю для структурування. Здебільшого штучні маркери потрібні для забезпечення навігації в приміщенні через AR для орієнтації та визначення положення камери. Для навігації в приміщенні в режимі реального часу необхідно визначити дві речі: по-перше, для визначення місцезнаходження елемента обслуговування використовується BIM, а по-друге, необхідно визначити положення оператора в будівлі.

Натуральні маркери. Натуральні (природні) маркери – це маркери, які вже є на об'єкті, такі як знаки виходу або маркування місць розташування вогнегасників. Ці маркери мають високу ефективність для оптичного відстеження, оскільки вони легко видимі завдяки своїм кольорам та формі, а також мають оптимальний розмір. Крім того, ці маркери часто підсвічуються або мають яскраве забарвлення, що є важливим для їхнього використання в умовах надзвичайних ситуацій.

through AR is a powerful and effective tool for conveying building information.

Augmented reality (AR) has also been explored for trials to test the feasibility of using natural markers such as exit signs. The use of natural markers like exit signs is considered a better idea for structuring. Generally, artificial markers are required to enable indoor navigation through AR for orientation and camera positioning. For real-time indoor navigation, two things must be determined: first, the BIM is used to identify the location of the maintenance element, and second, the operator's position inside the building must be determined.

Natural markers. Natural markers are markers already present on the site, such as exit signs or fire extinguisher location markings. These markers are highly effective for optical tracking because they are easily visible due to their colors and shapes and have an optimal size. Additionally, these markers are often illuminated or brightly colored, which is important for their use in emergency conditions.

The overall system consists of three main stages. The first stage is the collection of digital work tasks, which includes gathering necessary information from BIM and FM essential for performing maintenance tasks. The second stage is

Загальна система складається з трьох основних етапів. Першим етапом є збір цифрових робочих завдань, що включає в себе збір необхідної інформації з BIM і FM, що є важливою для виконання завдань з обслуговування. Другим етапом є навігація по будівлі за допомогою доповненої реальності, де використовується система позиціонування і маршрутизації в приміщенні для спрямування персоналу. Третім етапом є надання інструкцій з обслуговування через доповнену реальність. На цьому етапі вже здійснюється фактичне виконання завдання з обслуговування на основі отриманих вказівок.

Природні маркери, які використовуються на об'єкті, виступають у ролі AR маркерів, що дозволяє накладати віртуальний 3D контент на реальний вигляд об'єкта, який відображається через камеру. Природні маркери мають велику перевагу в порівнянні зі штучними маркерами, оскільки вони вже є на місці й не потребують додаткової установки, що робить їх значно ефективнішими та зручнішими для використання у приміщеннях. Такий підхід дозволяє значно спростити роботу з AR.

Фреймворк для цієї системи реалізований на планшеті iPad 2, використовуючи фреймворк для доповненої реальності MetaioSDK 3.1. У межах експериментів у контрольованому середовищі було перевірено ефективність запро-

avigation inside the building using augmented reality, where an indoor positioning and routing system guides the staff. The third stage is providing maintenance instructions via augmented reality. At this stage, the actual maintenance task is performed based on the received guidance.

Natural markers used on-site act as AR markers, allowing virtual 3D content to be overlaid on the real view of the object displayed through the camera. Natural markers have a significant advantage compared to artificial markers because they are already in place and require no additional installation, making them much more efficient and convenient for indoor use. This approach greatly simplifies working with AR.

The framework for this system was implemented on an iPad 2 tablet using the MetaioSDK 3.1 augmented reality framework. Experiments in a controlled environment tested the system's effectiveness and demonstrated its potential for use in building maintenance.

This approach significantly improves maintenance efficiency and provides real-time access to critical information, facilitating staff work.

понованої системи і продемонстровано її потенціал у використанні для обслуговування будівель.

Цей підхід дозволяє значно покращити ефективність обслуговування і забезпечує наявність доступу до важливої інформації в реальному часі, що полегшує роботу персоналу.

На рис. 9.5 та рис. 9.6 показано різні типи згаданих природних маркерів.

Figures 9.5 and 9.6 show different types of the aforementioned natural markers.



Рис. 9.5. Приклад природних маркерів / Example of natural markers

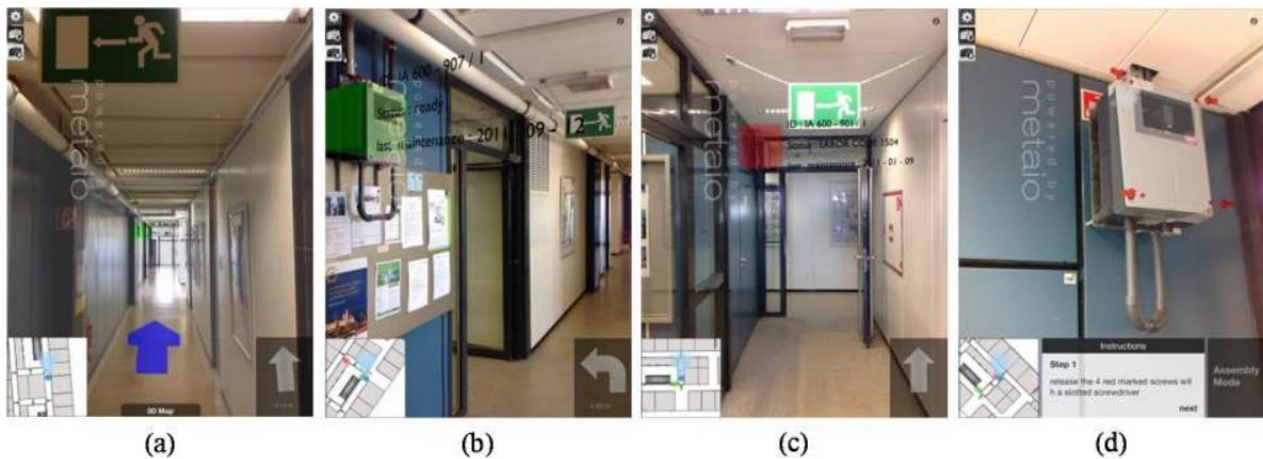


Рис. 9.6. Доповнене зображення в реальному часі:

- а – накладена 3D-модель, 3D-стрілка навігації та положення неушкодженого детектора диму (зелений прямокутник); б – показ інструкції щодо повороту ліворуч та неушкодженого детектора диму (зелений колір);
- с – накладене положення цільового детектора диму (червоний прямокутник) та код помилки; д – текстові інструкції (внизу) та накладені 3D-анімовані інструкції (червоні стрілки) /

Real-time augmented image:

- а – overlaid 3D model, 3D navigation arrow, and position of intact smoke detector (green rectangle); б – display of left turn instruction and intact smoke detector (green color); с – overlaid position of target smoke detector (red rectangle) and error code; д – text instructions (bottom) and overlaid 3D animated instructions (red arrows)

Під час використання штучних маркерів є обмеження в можливості визначення місцезнаходження оператора в межах об'єкта, оскільки вони не відображають його точку зору. Встановлення штучних маркерів по всьому об'єкту є виснажливим. Для порівняння, природні маркери мають великий потенціал для підтримки доповненої реальності (AR) в операціях з управління об'єктами.

When using artificial markers, you are limited in the ability to determine the operator's location within the facility, as they do not reflect their point of view. Installing artificial markers throughout the facility is exhausting. In contrast, natural markers have great potential to support augmented reality (AR) in facility management operations.

9.2.3. Використання віртуальної реальності в 6D BIM

Використання ігрового движка на основі BIM для вивчення поведінки під час евакуації є перспективною стратегією. Він дозволяє учасникам взаємодіяти із середовищем будівлі та з іншими учасниками. Основними компонентами системи є багатокористувацька мережа та ігровий движок на основі BIM.

Багатокористувацьке спільне віртуальне середовище для управління об'єктами.

BIM-моделі, конвертація моделей та ігровий рушій були трьома основними підрозділами ігрового рушія на основі BIM (рис. 9.7). Архітектурні моделі, моделі MEP (механічні, електричні та сантехнічні) та структурні моделі конвертуються в ігровий рушій (Unity3D) в модулі ігрового рушія. Одночасно забезпечується співпраця в режимі реального часу для кількох користувачів через хмарну мережу. Як платформа для співпраці в режимі реального часу використовувалася Photon Unity Networking (PUN). PUN було обрано, оскільки воно повністю сумісне з кількома ігровими рушіями та доступне як безкоштовне програмне забезпечення.

9.2.3. Use of Virtual Reality in 6D BIM

The use of a BIM-based game engine for studying evacuation behavior is a promising strategy. It allows participants to interact with the building environment and with other participants. The main components of the system are a multiplayer network and a BIM-based game engine.

Multiplayer collaborative virtual environment for facility management.

BIM models, model conversion, and the game engine were the three main components of the BIM-based game engine (Fig. 9.7). Architectural models, MEP models (mechanical, electrical, and plumbing), and structural models are converted into the game engine (Unity3D) within the game engine module. Simultaneously, real-time collaboration for multiple users is enabled through a cloud network. Photon Unity Networking (PUN) was used as the platform for real-time collaboration. PUN was chosen because it is fully compatible with multiple game engines and is available as free software.

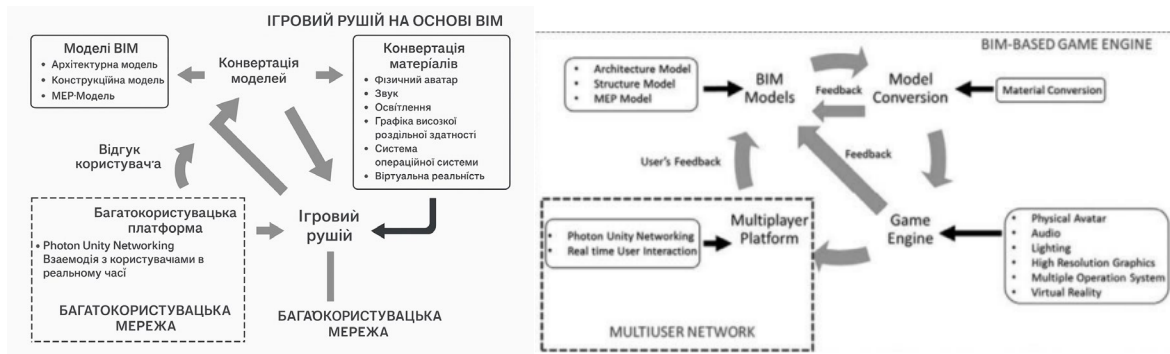


Рис. 9.7. Структура спільного віртуального середовища для багатокоористувацького FM-зв'язку / Structure of the collaborative virtual environment for multi-user FM communication

Для тестування запропонованої концепції як модель для оцінки було використано зал. Два користувачі підключилися до VR-моделі за допомогою гарнітур Oculus Rift. Для цього тесту було створено два аватари. Один користувач виступав у ролі проєктувальника/виробника компонентів MEP (механічних, електричних та сантехнічних), які мали деякі експлуатаційні проблеми, тоді як інший виступав у ролі спеціаліста з управління об'єктами (FM), який знав про ці проблеми та шукав їхні причини. У змодельованому сценарії спеціаліст FM вказував проєктувальнику на місце проблеми, а елементи MEP позначалися вказівником.

Запропоноване спільне середовище виявилось доцільним та сприяло покращенню комунікації між проєктувальниками та фахівцями з управління об'єктами. Крім того, інші зацікавлені сторони, такі як орендарі, керуючі об'єктами, а також постачальники та проєктувальники систем опалення, вентиляції та кондиціонування (MEP), також

To test the proposed concept, a hall was used as a model for evaluation. Two users connected to the VR model using Oculus Rift headsets. For this test, two avatars were created. One user acted as a designer/manufacturer of MEP components (mechanical, electrical, and plumbing) that had some operational issues, while the other acted as a facility management (FM) specialist who was aware of these issues and was investigating their causes. In the simulated scenario, the FM specialist pointed out the problem location to the designer, and the MEP components were highlighted with a pointer.

The proposed collaborative environment proved to be feasible and contributed to improved communication between designers and facility management specialists. Additionally, other stakeholders such as tenants, facility managers, as well as HVAC (MEP) system suppliers and designers, could also benefit from this system. The proposed system

могли б скористатися перевагами цієї системи. Запропонована система виявилася більш ефективним та реалістичним середовищем для комунікації порівняно з існуючими системами. Також можна зазначити, що витрати на комунікацію зменшуються, а непорозуміння можна мінімізувати, тим самим сприяючи сталому розвитку проєктів, що застосовують цю технологію, у довгостроковій перспективі.

Проблеми використання спільного віртуального середовища для багатьох користувачів для FM-спілкування:

- взаємодія з системою – використання існуючих протоколів для передачі даних не дозволяє повноцінно конвертувати BIM-моделі в ігрові рушії, це призводить до значної втрати даних про матеріали під час передачі, щоб вирішити цю проблему застосували скрипт для конвертації BIM-матеріалів у стандартні матеріали, зрозумілі ігровому рушію;

- реалізм віртуального середовища – рівень реалізму у віртуальному середовищі ще не досяг очікуваних технологічних стандартів, це створює труднощі у застосуванні віртуальних моделей для точного представлення реальних об'єктів та процесів, знижуючи ефективність технології;

- обмежені можливості змінювати елементи будівлі – учасники не мають можливості змінювати елементи будівлі у віртуальному

was found to be a more efficient and realistic communication environment compared to existing systems. It can also be noted that communication costs are reduced and misunderstandings minimized, thereby promoting the sustainable development of projects employing this technology in the long term.

Challenges of using a multi-user collaborative virtual environment for FM communication:

- system interaction – the use of existing data transmission protocols does not allow full conversion of BIM models into game engines, leading to significant loss of material data during transfer; to address this problem, a script was applied to convert BIM materials into standard materials understandable by the game engine;

- realism of the virtual environment – the level of realism in the virtual environment has not yet reached the expected technological standards, creating difficulties in using virtual models to accurately represent real objects and processes, reducing the effectiveness of the technology;

- limited ability to modify building elements – participants do not have the ability to modify building elements within the virtual environment, which creates additional challenges in integrating BIM models with game engines;

середовищі, що створює додаткові труднощі з інтеграцією BIM-моделей з ігровими движками;

– продуктивність з великими або складними проєктами – віртуальне середовище може зазнавати затримок під час обробки великих або складних проєктів, що значно погіршує враження від віртуальної реальності, це створює технічні проблеми під час роботи з великими наборами даних, необхідними для точного представлення всіх аспектів проєкту.

Автоматизована перевірка доступності компонентів будівлі для технічного обслуговування

Іншим прикладом тестування автоматизованої доступності компонентів будівлі було використання системи, яка поєднувала BIM, VR та ігровий движок. Запропонована система (рис. 9.8) в основному використовувалася для збору відгуків від фахівців з управління об'єктами (FM) щодо обслуговування та доступності компонентів. Для зберігання та аналізу даних використовувалася Microsoft Azure. Крім того, відгуки від фахівців з управління об'єктами також оброблялися в Microsoft Azure.

– performance with large or complex projects – the virtual environment may experience delays when processing large or complex projects, significantly worsening the VR experience; this creates technical issues when working with large datasets necessary for accurate representation of all project aspects.

Automated verification of building components' accessibility for maintenance

Another example of testing automated accessibility of building components was the use of a system combining BIM, VR, and a game engine. The proposed system (Fig. 9.8) was mainly used to collect feedback from facility management (FM) specialists regarding maintenance and accessibility of components. Microsoft Azure was used for data storage and analysis. Additionally, feedback from FM specialists was also processed in Microsoft Azure.

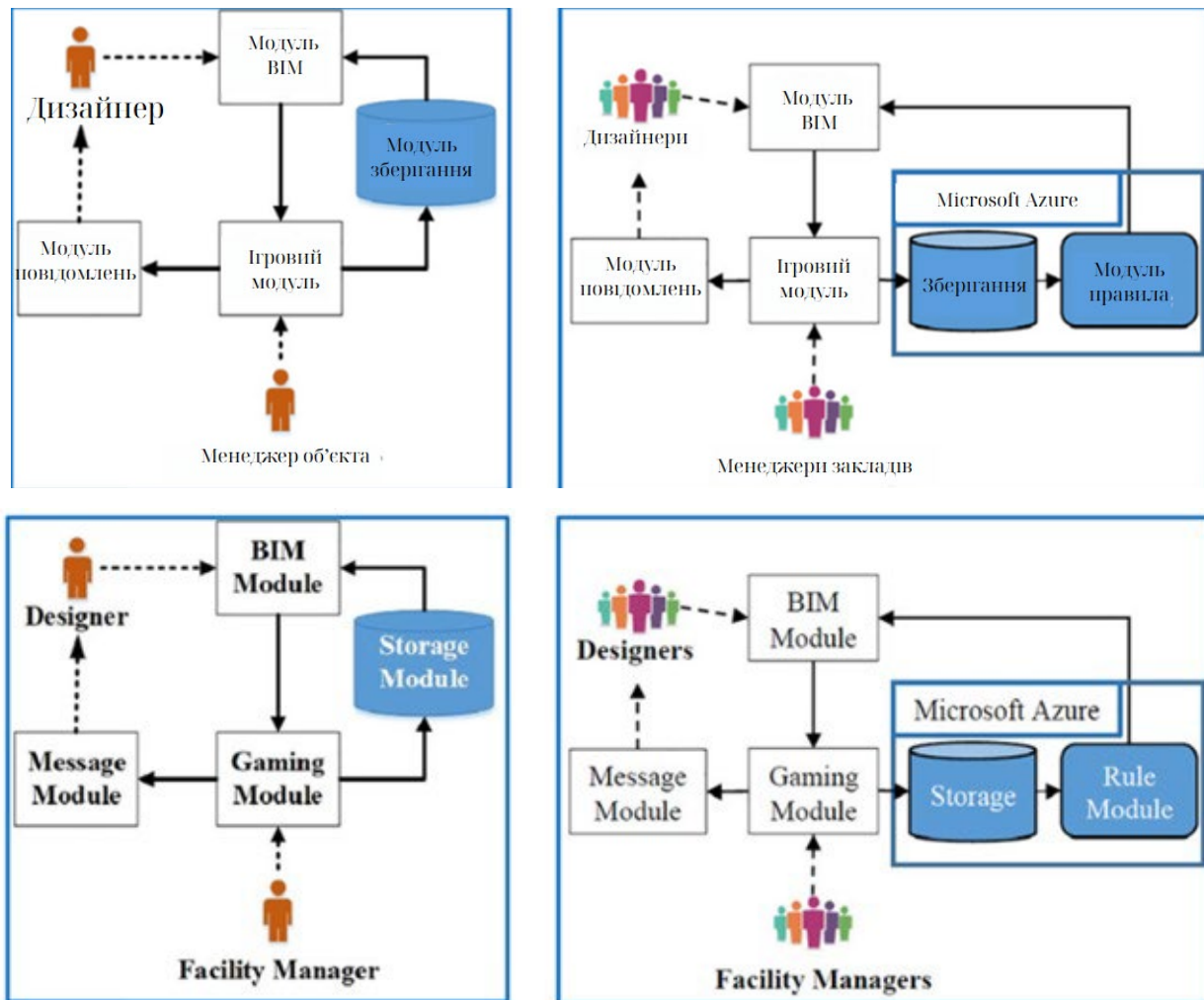


Рис. 9.8. Автоматизована система перевірки доступності компонентів / Automated system for checking component accessibility

Основними факторами, що визначають здатність персоналу об'єкта отримувати доступ до компонента, є їхня здатність дістатися до компонента та наявність платформи для доступу до обладнання. «Досяжність» та «доступність платформи» були двома критеріями, що використовувалися для перевірки доступності. Функція критерію доступності полягає в оцінці того, чи можна отримати доступ до обладнання за допомогою спеціального обладнання для доступу (наприклад, драбин). Функція критерію платформи полягає в перевірці наявності

The main factors determining the ability of facility personnel to access a component are their ability to reach the component and the availability of a platform to access the equipment. "Reachability" and "platform availability" were two criteria used to check accessibility. The function of the accessibility criterion is to evaluate whether the equipment can be accessed using special access equipment (e.g., ladders). The function of the platform criterion is to check the availability of a platform to place the access

платформи для встановлення обладнання для доступу. Критерії доступності застосовувалися після вибору будь-якого обладнання. Критерії оцінюють доступність шляхом віднімання висоти драбини від висоти компонента, вимірної від підлоги.

Тестування системи було проведено на моделі навчального закладу. У цю модель було включено різні компоненти MEP, але не всі вони були доступні для обслуговування. Моделювання було виконано в Autodesk Revit, а Unity3D було обрано як ігровий рушій для VR. За допомогою розробленого інтерфейсу було обрано освітлювальний прилад та перевірено критерії досяжності.

Після цього фахівці з управління об'єктом або працівники з технічного обслуговування були віртуально розміщені на місці. Далі, після вибору драбини з доступних варіантів доступу, віртуальний лазерний промінь використовувався для вимірювання висоти драбини відносно висоти освітлювального приладу від підлоги. Другий інструмент (сходи) був обраний для перевірки критеріїв платформи. Працівники з технічного обслуговування побачили рожевий прямокутник навколо сходів, що свідчило про відсутність належної платформи для розміщення драбини.

Переваги системи включають зворотний зв'язок, який використовується для аналізу ключових аспектів, що дозволяє вдосконалювати інструменти BIM.

equipment. Accessibility criteria were applied after selecting any equipment. The criteria assess accessibility by subtracting the ladder height from the component height measured from the floor.

The system testing was conducted on a model of an educational institution. This model included various MEP components, but not all were accessible for maintenance. The modeling was performed in Autodesk Revit, and Unity3D was chosen as the game engine for VR. Using the developed interface, a lighting fixture was selected and reachability criteria were checked.

After this, facility managers or maintenance workers were virtually placed on site. Then, after selecting a ladder from available access options, a virtual laser beam was used to measure the ladder height relative to the height of the lighting fixture from the floor. A second tool (stairs) was selected to check the platform criteria. Maintenance workers saw a pink rectangle around the stairs, indicating the absence of a proper platform for placing the ladder.

Advantages of the system include feedback used to analyze key aspects, allowing improvements in BIM tools.

Interactive V3DM+ BIM Collaboration System

Інтерактивна система співпраці V3DM+ BIM

Наступна система поєднує BIM та VR для покращення інтерактивної співпраці в управлінні об'єктами (FM). Процес включає інтеграцію BIM-моделей, створених за допомогою різних інструментів, та залучення учасників до обговорень після отримання інформації з об'єкта. Що стосується етапу проєктування, питання, пов'язані з обладнанням, обговорюються через платформу для співпраці, що надається системою. На етапі технічного обслуговування інформацію можна отримати від виробника та призначити завдання з технічного обслуговування. Крім того, система також надає сповіщення про терміни придатності обладнання, такого як вогнегасники, за тиждень до закінчення терміну їх придатності.

Використовуючи Unity3D для віртуальних середовищ та HTML5 для ведення обговорень, було розроблено систему V3DM+ для управління об'єктами. Було створено веб-платформу на основі універсальної системи FM, яка дозволяє менеджерам об'єктів та персоналу взаємодіяти. Крім того, система V3DM+ допомагає візуалізувати складну інформацію набагато краще, ніж традиційні методи.

До переваг системи належать:

- обмежене використання даних лише для існуючих проєктів –

The next system combines BIM and VR to enhance interactive collaboration in facility management (FM). The process involves integrating BIM models created using different tools and engaging participants in discussions after receiving information from the facility. Regarding the design phase, equipment-related issues are discussed through the collaboration platform provided by the system. At the maintenance stage, information can be obtained from the manufacturer and maintenance tasks assigned. Additionally, the system provides notifications about the expiration dates of equipment, such as fire extinguishers, one week before their expiration.

Using Unity3D for virtual environments and HTML5 for discussions, the V3DM+ system was developed for facility management. A web platform based on a universal FM system was created, allowing facility managers and staff to interact. Furthermore, the V3DM+ system helps visualize complex information much better than traditional methods.

Advantages of the system include:

- limited use of data only for existing projects – the system operates when 3D models and as-built reports exist as data sources;

- manual data import – the system should include an automatic

система працює, коли як джерела даних існують 3D-моделі та звіти про завершене будівництво;

- ручний імпорт даних – система повинна включати функцію автоматичного імпорту даних, а не покладатися на бібліотеки API для ручного імпорту;

- різноманітність проєктів – оскільки кожен проєкт унікальний і має свої власні вимоги, важко налаштувати систему для задоволення всіх функцій, які повинні базуватися на різних управлінських підходах.

Структура, заснована на досвіді (EBD)

Проектування на основі досвіду (EBD) – це передовий метод проектування, який зосереджений на досвіді персоналу та потребах кінцевих користувачів у закладі для пошуку унікальних дизайнерських рішень. Двигуни 3D-ігор були поєднані з популярною технікою огляду проєктів на основі користувацького досвіду. Метою методу є розробка методу огляду проєктів в інтерактивному середовищі з захопливим ефектом. На рис. 9.9 показано запропоновану архітектуру системи. Структура системи виділяє три основні компоненти:

- бібліотека елементів;
- двигун сценаріїв;
- користувацька сцена.

Сценарії на основі завдань були написані в механізмі сценаріїв, який є найважливішим компонентом запропонованої системи.

data import function instead of relying on API libraries for manual import;

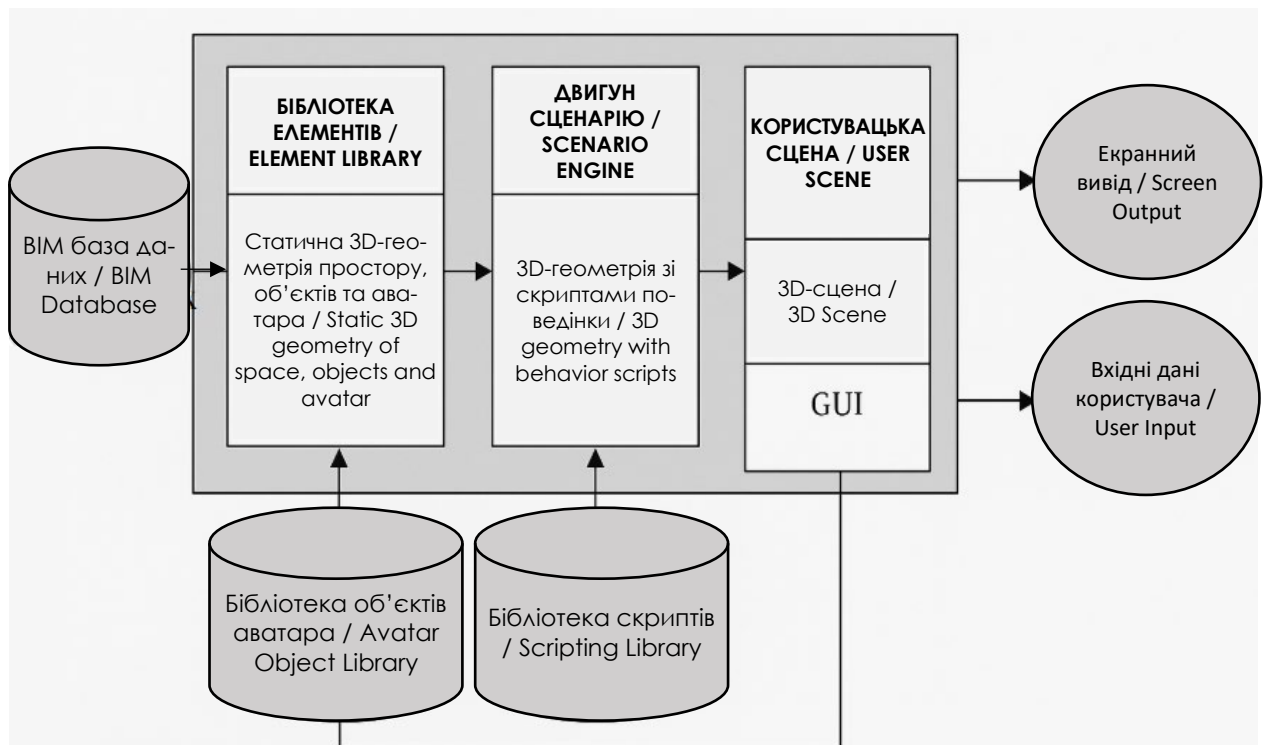
- project variety – since each project is unique and has its own requirements, it is difficult to customize the system to meet all functions, which should be based on different management approaches.

Experience-Based Design (EBD)

Experience-Based Design (EBD) is an advanced design method focused on staff experience and the needs of end-users in the facility to find unique design solutions. 3D game engines were combined with a popular project review technique based on user experience. The goal of the method is to develop a project review method in an interactive environment with an immersive effect. Fig. 9.1 shows the proposed system architecture. The system structure highlights three main components:

- element library;
- script engine;
- user scene.

Task-based scenarios were written in the script engine, which is the most important component of the proposed system.



**Рис. 9.9. Запропонована архітектура системи EBD /
Proposed architecture of the EBD system**

Додаток, розроблений на основі зображеної діаграми, отримав назву «Віртуальний симулятор прототипування на основі досвіду» (EVPS). Для створення BIM-моделей використовувався Autodesk Revit, а для налаштування віртуального середовища – Unity3D. Вибір Unity був зроблений завдяки його швидкій та високоякісній візуалізації, можливостям налаштування та зручному інтерфейсу.

Під час перенесення даних з Revit до Unity система зіткнулася з такими проблемами сумісності.

Загальна ієрархія моделі. Під час перенесення даних з Autodesk Revit до Unity3D ієрархія моделі зберігалася неправильно. У Revit моделі часто мають складну структуру, де елементи організовані в

The application developed based on the depicted diagram was named the “Experience-based Virtual Prototyping Simulator” (EVPS). Autodesk Revit was used to create BIM models, and Unity3D was chosen for configuring the virtual environment. Unity was selected due to its fast and high-quality visualization, customization capabilities, and user-friendly interface.

During data transfer from Revit to Unity, the system encountered the following compatibility issues.

Overall model hierarchy. When transferring data from Autodesk Revit to Unity3D, the model hierarchy was not preserved correctly. Revit models often have a complex structure where elements are organized into various categories (e.g.,

різні категорії (наприклад, стіни, вікна, двері, меблі) з чітко визначеними зв'язками. Однак у Unity ця ієрархія часто порушувалася, і елементи втрачали свої структурні зв'язки або групи.

Освітлювальні прилади. Характеристики освітлювальних приладів у BIM-моделях, створених у Revit, не були належним чином перенесені до Unity3D. Хоча геометрію приладів було успішно імпортовано, такі параметри, як потужність, колір та тип світла, або не були передані, або були передані неправильно. Це включає важливі характеристики освітлення, такі як типи ламп, інтенсивність світла та кольорова температура, які є критично важливими для точної візуалізації в Unity. Через цю проблему потрібно було ручне налаштування елементів освітлення в Unity, що призводило до збільшення часу налаштування та неточного освітлення сцени.

Текстури. Текстури, що використовувалися в моделях Revit, не завжди коректно переносилися в Unity. Іноді текстури губилися, спотворювалися або замінювалися іншими форматами. Крім того, виникали проблеми з налаштуваннями текстур, такими як розмір, масштабування та рівень деталізації. Це вимагало ручного налаштування текстур, що займало багато часу та могло поставити під загрозу точність матеріалу та візуальну якість моделі.

walls, windows, doors, furniture) with clearly defined relationships. However, in Unity, this hierarchy was often disrupted, and elements lost their structural relationships or grouping.

Lighting fixtures. The characteristics of lighting fixtures in BIM models created in Revit were not properly transferred to Unity3D. Although the geometry of the fixtures was successfully imported, parameters such as power, color, and light type were either not transferred or transferred incorrectly. This includes important lighting features like lamp types, light intensity, and color temperature, which are critical for accurate visualization in Unity. Due to this issue, manual adjustment of lighting elements in Unity was required, leading to increased setup time and inaccurate scene lighting.

Textures. Textures used in Revit models were not always correctly transferred into Unity. Sometimes textures were lost, distorted, or replaced with other formats. Additionally, issues arose with texture settings such as size, scaling, and level of detail. This required manual texture adjustments, which was time-consuming and could compromise the accuracy of materials and visual quality of the model.

Script compatibility. Script triggers had to be assigned individually

Сумісність скриптів. Тригери для скриптів довелося призначати окремо кожному ігровому об'єкту, оскільки об'єкти були унікальними та не групувалися за сімействами Revit. Це значно збільшило обсяг необхідного кодування.

Залучення управління об'єктами на етапі проєктування за допомогою BIM: Структура та тематичне дослідження

Інтеграція управління об'єктами (FM) на етапі проєктування за допомогою BIM мала на меті подолати прогалини в робочих процесах, забезпечивши операційну модель, яка надає необхідну інформацію за допомогою BIM.

Щоб продемонструвати концепцію включення BIM у FM, було розглянуто сценарій дослідження, що включав визначення місцезнаходження елемента будівлі для цілей технічного обслуговування. Замість перемикання між кількома базами даних для пошуку елемента в межах об'єкта, за допомогою BIM інформацію про місцезнаходження легко отримати. Це економить час і зусилля персоналу FM.

Принцип базується на попередньому проєктуванні оптимального маршруту доступу до елемента будівлі, яке базується на відгуках керівників об'єктів та експертів з просторових питань. Цей маршрут потім вбудовується в базу даних BIM та використовується, коли місцезнаходження

to each game object because objects were unique and not grouped by Revit families. This significantly increased the amount of necessary coding.

Engaging facility management (FM) at the design stage through BIM: Structure and case study

The integration of facility management (FM) at the design stage using BIM aimed to bridge workflow gaps by providing an operational model that delivers necessary information through BIM.

To demonstrate the concept of including BIM in FM, a study scenario was considered involving the identification of the location of a building element for maintenance purposes. Instead of switching between multiple databases to find an element within the facility, BIM makes it easy to retrieve location information. This saves time and effort for FM staff.

The principle is based on pre-designing an optimal access route to the building element, relying on feedback from facility managers and spatial experts. This route is then embedded into the BIM database and used when the element's location is determined for maintenance purposes.

For implementing this scenario, Autodesk Revit was selected as the BIM modeling tool. Visualization was

елемента визначається з метою технічного обслуговування.

Для реалізації цього сценарію як інструмент для створення BIM-моделей було обрано Autodesk Revit. Для візуалізації було використано режим покрокового огляду (незанурювальний метод).

Одним із важливих аспектів цього випадку є концепція попереднього проєктування оптимального маршруту доступу до елементів будівлі, які потребують обслуговування. Цей маршрут розробляється на основі відгуків керівників об'єктів та експертів з просторового планування. Після цього маршрут вбудовується в базу даних BIM, що робить доступ до елемента можливим після отримання даних про його місцезнаходження для цілей обслуговування.

performed using a walkthrough mode (non-immersive method).

One important aspect of this case is the concept of pre-designing the optimal access route to building elements requiring maintenance. This route is developed based on feedback from facility managers and spatial planning experts. Afterwards, the route is embedded into the BIM database, making element access possible once location data is obtained for maintenance purposes.

Self-monitoring questions

Питання до самоконтролю

1. Як економічні чинники вплинули на впровадження BIM у сфері управління будівлями?

2. Які основні прогалини в дослідженнях щодо використання BIM у процесах експлуатації та обслуговування (O&M) залишаються актуальними?

3. Які основні дані збираються та зберігаються в межах 6D BIM для управління експлуатацією об'єктів?

4. Як використання 6D BIM сприяє підвищенню якості надання послуг протягом усього життєвого циклу проєкту?

1. How have economic factors influenced the adoption of BIM in the field of building management?

2. What are the main gaps in research on the use of BIM in operations and maintenance (O&M) processes that remain relevant?

3. What key data is collected and stored within 6D BIM for facility management?

4. How does the use of 6D BIM contribute to improving the quality of service provision throughout the project lifecycle?

5. Що таке змішана реальність (MR) і чим вона відрізняється від AR?

6. Як використання VR/AR впливає на безпеку будівельних майданчиків?

7. Опишіть процес накладання віртуальних об'єктів на реальне середовище в AR.

8. Як мобільні AR-пристрої вплинули на доступність цієї технології для менеджерів?

9. Які нові можливості для комунікації між користувачами відкриває VR у порівнянні з традиційними BIM-інструментами?

10. Які основні проблеми стримують поширення VR у будівельній сфері?

5. What is mixed reality (MR) and how does it differ from AR?

6. How does the use of VR/AR affect construction site safety?

7. Describe the process of overlaying virtual objects on the real environment in AR.

8. How have mobile AR devices affected the accessibility of this technology for managers?

9. What new opportunities for communication between users does VR open up compared to traditional BIM tools?

10. What are the main challenges that hinder the spread of VR in the construction industry?

References

Список рекомендованої літератури

1. A Review of Concrete Carbonation Depth Evaluation Models / Wang X., Yang Q., Peng X., Qin F. // *Coatings*. – 2024. – Vol. 14. – P. 386. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14040386>.
2. Akanmu Abiola. Automated checking of building component accessibility for maintenance / Akanmu Abiola, Olatunji Oluwole // *Automation in Construction*. – 2020. – Vol. 114. DOI: [10.1016/j.autcon.2020.103196](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103196).
3. Becerik-Gerber B. Application areas and data requirements for BIM-enabled facilities management / B. Becerik-Gerber, F. Jazizadeh, N. Li, G. Calis // *Journal of construction engineering and management*. – 2012. – Vol. 138(3). – Pp. 431-442.
4. Beddoe R. E. Determination of chlorides in concrete structures / R. E. Beddoe // *Woodhead Publishing*. – 2010. – Vol. 1. – Pp. 198-216. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845699536.2.198>.
5. Breysse D. Deterioration processes in reinforced concrete: An overview / Denys, Breysse. – 2010. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845699536.1.28>.
6. Concrete Core Cutting and Testing [Electronic resource]. – Accessed mode: <https://www.indiamart.com/proddetail/concrete-core-sampling-semi-destructive-testing-service-2855870552191.html>.
7. Dahanayake K. C. IoT-BIM-based digital transformation in facilities management: a conceptual model / K. C. Dahanayake, N. Sumanarathna // *Journal of Facilities Management*. – 2022. – Vol. 20(3). – Pp. 437-451.
8. Dawood Nashwan. VR-roadmap: a vision for 2030 in the built
1. Wang, X., Yang, Q., Peng, X., Qin, F. (2024). A Review of Concrete Carbonation Depth Evaluation Models. *Coatings*, 14, 386. <https://doi.org/10.3390/coatings14040386>.
2. Akanmu, Abiola & Olatunji, Oluwole. (2020). Automated checking of building component accessibility for maintenance. *Automation in Construction*. 114. [10.1016/j.autcon.2020.103196](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103196).
3. Becerik-Gerber, B., Jazizadeh, F., Li, N., & Calis, G. (2012). Application areas and data requirements for BIM-enabled facilities management. *Journal of construction engineering and management*, 138(3), 431-442.
4. Beddoe, R. E. (2010). Determination of chlorides in concrete structures. *Woodhead Publishing*, 1, 198-216, <https://doi.org/10.1533/9781845699536.2.198>.
5. Breysse, D. (2010). *Deterioration processes in reinforced concrete: An overview*. <https://doi.org/10.3390/coatings14040386>.
6. Concrete Core Cutting and Testing. (n.d.). <https://www.indiamart.com/proddetail/concrete-core-sampling-semi-destructive-testing-service-2855870552191.html>.
7. Dahanayake, K. C., & Sumanarathna, N. (2022). IoT-BIM-based digital transformation in facilities management: a conceptual model. *Journal of Facilities Management*, 20(3), 437-451.
8. Dawood, Nashwan. (2009). VR-roadmap: a vision for 2030 in the built

environment / Nashwan Dawood // J. Inf. Technol. Constr. – 2009. – Vol. 14. – Pp. 489-506.

9. Exploring Crack Reduction in High-Performance Concrete: The Impact of Nano-Silica, Polypropylene, and 4D Metallic Fibers / Alvansazyazdi Mohammadfarid, Farinango Diego, Yaucan Javier, Cadena Alexander, Santamaria Jorge, Bonilla Pablo, Leon Mario, Debut Alexis, Feizbahr Mahdi, Leon Luis, Ayala Byron, Cpi Procedia // International Journal of Engineering & Technology Sciences. – 2024. – 13 p.

10. Flat Jack Testing Accessories [Electronic resource]. – Accessed mode: <https://sisgeo.com/products/pressure-cells/flat-jack-testing-accessories>.

11. Gregorczyk P. A Review on Flat-Jack Testing [Electronic resource] / Pawel Gregorczyk, Paulo B. Lourenço. – 2019. – Accessed mode: https://www.researchgate.net/publication/237334295_A_Review_on_Flat-Jack_Testing

12. Hadee Mohammed Najm. Destructive and Non-Destructive Evaluation of Fibre-Reinforced Concrete: A Comprehensive Study of Mechanical Properties / Hadee Mohammed Najm, Ominda Nanayakkara, Mohanad Muayad Sabri Sabri // *Materials*. – 2022. – № 15(13). – P. 4432. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15134432>.

13. Kim J. Change in blink rate in the metaverse VR HMD and AR glasses environment / J. Kim, L. Hwang, S. Kwon, S. Lee // International journal of environmental research and public health. – 2022. – Vol. 19(14). – P. 8551.

14. Kontothanasis Panayotis. BIM and Advanced Computer-Based Tools for the Design and Construction of Underground Structures and Tunnels / Kontothanasis, Panayotis & Krommyda, Vicky & Roussos, Nikolaos. – 2019. DOI: 10.5772/intechopen.88315.

15. Li Shuixiang. A hybrid expert system for finite element modeling of

environment. *J. Inf. Technol. Constr.* 14, 489-506.

9. Alvansazyazdi, Mohammadfarid, Farinango, Diego, Yaucan, Javier, Cadena, Alexander, Santamaria, Jorge, Bonilla, Pablo, Leon, Mario, Debut, Alexis, Feizbahr, Mahdi, Leon, Luis, Ayala, Byron, Cpi, Procedia. (2024). Exploring Crack Reduction in High-Performance Concrete: The Impact of Nano-Silica, Polypropylene, and 4D Metallic Fibers. *International Journal of Engineering & Technology Sciences*.

10. 2. Flat Jack Testing Accessories. (n.d.). <https://sisgeo.com/products/pressure-cells/flat-jack-testing-accessories>.

11. 3. Gregorczyk, P., Paulo B. Lourenço. (2019). A Review on Flat-Jack Testing. https://www.researchgate.net/publication/237334295_A_Review_on_Flat-Jack_Testing

12. 4. Hadee Mohammed Najm, Ominda Nanayakkara, and Mohanad Muayad Sabri Sabri. (2022). Destructive and Non-Destructive Evaluation of Fibre-Reinforced Concrete: A Comprehensive Study of Mechanical Properties. *Materials*, 15(13), 4432. <https://doi.org/10.3390/ma15134432>.

13. Kim, J., Hwang, L., Kwon, S., & Lee, S. (2022). Change in blink rate in the metaverse VR HMD and AR glasses environment. *International journal of environmental research and public health*, 19(14), 8551.

14. Kontothanasis, Panayotis & Krommyda, Vicky & Roussos, Nikolaos. (2019). BIM and Advanced Computer-Based Tools for the Design and Construction of Underground Structures and Tunnels. 10.5772/intechopen.88315.

fuselage frames / Li Shuixiang, Qiao Minggao // *Expert Syst. Appl.* – 2003. – Vol. 24. – Pp. 87-93. DOI: 10.1016/S0957-4174(02)00086-6.

16. Lima M. M. Structural Health Monitoring of Concrete Bridges in Guilan Province Based on a Visual Inspection Method / M. M. Lima, D. Miller, J. Doh // *Structural Durability and Health Monitoring*. – 2013. – Vol. 9(4). – Pp. 269–285. DOI: <https://doi.org/10.32604/sdhm.2013.009.269>.

17. Linfei Li, Renee Railsback Evaluation of different types of waterproofing membranes (asphaltic and non-asphaltic) as cost effective bridge deck barriers in reducing corrosion chloride effects [Electronic resource] / Linfei Li, Yunping Xi // CDOT-2018-16: University of Colorado Boulder. – 2018. – Accessed mode: https://www.researchgate.net/publication/344639126_Evaluation_of_different_types_of_waterproofing_membranes_asphaltic_and_non-asphaltic_as_cost_effective_bridge_deck_barriers_in_reducing_corrosion_chloride_effects.

18. Mekawy Mohammed. BIM-Based Model Checking in the Early Design Phases of Precast Concrete Structures / Mekawy Mohammed, Petzold Frank. – 2018. DOI: 10.52842/conf.caadria.2018.2.071.

19. Moczko A. In-situ examination of the concrete quality European standard approach / Andrzej Moczko, and Marta Moczko // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – № 196. DOI: <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201819602045>.

20. Multi-usage, long scan, deep [Electronic resource]. – Accessed mode: <https://www.screeningeagle.com/en/products/proceq-gp8000>.

21. Nguyen D. C. BIM-based mixed-reality application for bridge inspection and maintenance / D. C. Nguyen, R. Jin, C. H. Jeon, C. S. Shim //

15. Li, Shuixiang & Qiao, Minggao. (2003). A hybrid expert system for finite element modeling of fuselage frames. *Expert Syst. Appl.*, 24, 87-93. 10.1016/S0957-4174(02)00086-6.

16. Lima, M. M., Miller, D., Doh, J. (2013). Structural Health Monitoring of Concrete Bridges in Guilan Province Based on a Visual Inspection Method. *Structural Durability and Health Monitoring*, 9(4), 269–285. <https://doi.org/10.32604/sdhm.2013.009.269>.

17. Linfei Li, Yunping Xi. (2018). Renee Railsback. Evaluation of different types of waterproofing membranes (asphaltic and non-asphaltic) as cost effective bridge deck barriers in reducing corrosion chloride effects. CDOT-2018-16: University of Colorado Boulder. https://www.researchgate.net/publication/344639126_Evaluation_of_different_types_of_waterproofing_membranes_asphaltic_and_non-asphaltic_as_cost_effective_bridge_deck_barriers_in_reducing_corrosion_chloride_effects.

18. Mekawy, Mohammed & Petzold, Frank. (2018). BIM-Based Model Checking in the Early Design Phases of Precast Concrete Structures. 10.52842/conf.caadria.2018.2.071.

19. Moczko, A., Moczko M. (2018). In-situ examination of the concrete quality European standard approach. *MATEC Web of Conferences*, 196. <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201819602045>.

20. Multi-usage, long scan, deep. (n.d.). <https://www.screeningeagle.com/en/products/proceq-gp8000>.

Construction Innovation. – 2021. – Vol. 22(3). – Pp. 487-503.

22. Numerical and analytical predictions of the limit load of rectangular two way slabs / O. R. Famiyesin, K.M.A. Hossain, Y. H. Chia, P.A. Slade // *Computers & Structures*. – 2001. – Vol. 79, Issue 1. – Pp. 43-52. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(00\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(00)00113-9).

23. Olanrewaju O. I. Modelling the impact of building information modelling (BIM) implementation drivers and awareness on project lifecycle / O. I. Olanrewaju, A. F. Kineber, N. Chileshe, D. J. Edwards // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13(16). – P. 8887.

24. Perelmutter, A. V. Selected problems of reliability and safety of building structures / A. V. Perelmutter. – Kiev: Publishing House of Ukr NII Proektstalkonstrukttsiya, 2000.

25. Photoluminescent signs. Avtomalyar [Electronic resource]. – 02.04.2025. – Accessed mode: <https://avtomalyar.in.ua/ua/p1336580214-fotoluminestsentnye-znaki-assortimente.html>.

26. Pichugin, S.F. Accidents features in construction / S. F. Pichugin, L. A. Klochko // *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. – Полтава: ПолтНТУ, 2019. – Т. 1 (52). – С. 91-101. DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2019.52.1681>.

27. Pivotto I. D. CAVE automatic virtual environment technology to enhance social participation of autistic people: A classification and literature review / I. D. Pivotto, V. Matias, de Paula Ferreira W. // *Research in Autism Spectrum Disorders*, (2024). – Vol. 117. – Art. 102453.

28. RADL, Michael. Cretaceous foraminifera of the Gosau Group (Krappfeld, Carinthia). na, 2008.

29. Salem Ossama. BIM and VR/AR technologies: from project development to lifecycle asset

21. Nguyen, D. C., Jin, R., Jeon, C. H., & Shim, C. S. (2021). BIM-based mixed-reality application for bridge inspection and maintenance. *Construction Innovation*, 22(3), 487-503.

22. Famiyesin, O.R., Hossain, K.M.A., Chia, Y.H., Slade, P.A. (2001). Numerical and analytical predictions of the limit load of rectangular two way slabs. *Computers & Structures*, 79(1), 43-52. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(00\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(00)00113-9).

23. Olanrewaju, O. I., Kineber, A. F., Chileshe, N., & Edwards, D. J. (2021). Modelling the impact of building information modelling (BIM) implementation drivers and awareness on project lifecycle. *Sustainability*, 13(16), 8887.

24. Perelmutter, A. V. (2000). *Selected problems of reliability and safety of building structures*. Publishing House of Ukr NII Proektstalkonstrukttsiya.

25. Photoluminescent signs. Avtomalyar (02.04.2025). <https://avtomalyar.in.ua/ua/p1336580214-fotoluminestsentnye-znaki-assortimente.html>.

26. Pichugin, S. F., & Klochko L. A. (2019). Accidents features in construction. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 1(52), 91-101. <https://doi.org/10.26906/znp.2019.52.1681>.

27. Pivotto, I. D., Matias, V., & de Paula Ferreira, W. (2024). CAVE automatic virtual environment technology to enhance social participation of autistic people: A classification and literature review. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 117, 102453.

management / Salem Ossama, Johnsamuel Immanuel, He Song // *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*. – 2020. – Vol. 7. DOI: 10.14455/ISEC.res.2020.7(1).AAE-11.

30. Santhosh K. V. A Smart Displacement Measuring Technique Using Linear Variable Displacement Transducer / K. V. Santhosh, B. K. Royo // *Procedia Technology*. – 2012. – № 4(854). – P. 861.

31. Sarthak Joshi. Linear Variable Differential Transducer (LVDT) & Its Applications in Civil Engineering / Sarthak Joshi, Shrikant Madhav Harle // *International Journal of Transportation Engineering and Technology*. – 2017. – Vol. 3, No. 4. – Pp. 62-66. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ijtet.20170304.13>.

32. Shen W. Building Information Modeling-based user activity simulation and evaluation method for improving designer–user communications / W. Shen, Q. Shen, Q. Sun // *Automation in Construction*. – 2012. – Vol. 21. – Pp. 148-160.

33. A Multiuser Shared Virtual Environment for Facility Management / Shi Yangming, Du Jing, Lavy Sarel, Zhao Dong // *Procedia Engineering*. 2016. – Vol. 145. – Pp.120-127. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.029.

34. Shokrabadi Mehran. Ground Penetrating Radar (GPR) Applications in Concrete Pavements / Shokrabadi Mehran, Joshaghani Alireza // *International Journal of Pavement Engineering*. – 2022. – Vol. 23, Issue 13. – Pp. 4504-4531. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1954182>.

35. Review of BIM literature and government initiatives to promote BIM in Malaysia / Sinoh Saznizam, Ibrahim Zainah, Othman Faridah, Muhammad N. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. –

28. RADL, Michael. Cretaceous foraminifera of the Gosau Group (Krappfeld, Carinthia). (2008).

29. Salem, Ossama & Johnsamuel, Immanuel & He, Song. (2020). BIM and VR/AR technologies: from project development to lifecycle asset management. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*. 7. 10.14455/ISEC.res.2020.7(1).AAE-11.

30. Santhosh, K.V., Royo, B.K. (2012). A Smart Displacement Measuring Technique Using Linear Variable Displacement Transducer. *Procedia Technology*, 4, 854 – 861.

31. Sarthak Joshi, Shrikant Madhav Harle. (2017). Linear Variable Differential Transducer (LVDT) & Its Applications in Civil Engineering. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 3(4), 62-66. <https://doi.org/10.11648/j.ijtet.20170304.13>.

32. Shen, W., Shen, Q., & Sun, Q. (2012). Building Information Modeling-based user activity simulation and evaluation method for improving designer–user communications. *Automation in Construction*, 21, 148-160.

33. Shi, Yangming & Du, Jing & Lavy, Sarel & Zhao, Dong. (2016). A Multiuser Shared Virtual Environment for Facility Management. *Procedia Engineering*. 145. 120-127. 10.1016/j.proeng.2016.04.029.

34. Shokrabadi, Mehran, Joshaghani, Alireza. (2022). Ground Penetrating Radar (GPR) Applications in Concrete Pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(13), 4504-4531. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1954182>.

35. Sinoh, Saznizam & Ibrahim, Zainah & Othman, Faridah &

Vol. 943. – Art. 012057. DOI: 10.1088/1757-899X/943/1/012057.

36. Practical Implementation of Structural Health Monitoring in Multi-Story Buildings / A. Sivasuriyan, D. S. Vijayan, W. Górski, Ł. Wodzyński, M. D. Vaverková, E. Koda // *Buildings*. – 2021. – Vol. 11(6). – P. 263. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings11060263>

37. Soutsos M. Introduction: Key issues in the non-destructive testing of concrete structures / Soutsos Marios, Bungey J. H. – 2010. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845699536.1.3>.

38. Tech Hub [Electronic resource]. – Accessed mode: <https://www.screeningeagle.com/en/inspection/what-gpr-can-reveal>.

39. Engagement of Facilities Management in Design Stage through BIM: Framework and a Case Study / Wang Ying, Wang Xiangyu, Wang Jun, Yung Ping, Jun Guo // *Advances in Civil Engineering*. – 2013. – Vol. 189105. – 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/189105>.

40. X-Ray Services [Electronic resource]. – Accessed mode: <https://concrete-view.com/service/x-ray-services>.

41. Zhang Hui. Head-mounted display-based intuitive virtual reality training system for the mining industry / Zhang, Hui // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 27. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.005.

42. Барашиков А. Я. Оценка технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений / А. Я. Барашиков. – Київ : НМЦ Держнаглядохорпраці України, 1998. – 238 с.

43. Безпека життєдіяльності : навч. посіб. / П. С. Атаманчук, В. В. Мендерецький, О. П. Панчук, О. Г. Чорна. – Київ : Центр учбової літератури, 2011. – 276 с.

Muhammad, N. (2020). Review of BIM literature and government initiatives to promote BIM in Malaysia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 943, 012057. DOI: 10.1088/1757-899X/943/1/012057.

36. Sivasuriyan, A., Vijayan, D. S., Górski, W., Wodzyński, Ł., Vaverková, M. D., & Koda, E. (2021). Practical Implementation of Structural Health Monitoring in Multi-Story Buildings. *Buildings*, 11(6), 263. <https://doi.org/10.3390/buildings11060263>

37. Soutsos, Marios & Bungey, J.H. (2010). Introduction: Key issues in the non-destructive testing of concrete structures. <https://doi.org/10.1533/9781845699536.1.3>.

38. Tech Hub. <https://www.screeningeagle.com/en/inspection/what-gpr-can-reveal>.

39. Wang, Ying, Wang, Xiangyu, Wang, Jun, Yung, Ping, Jun, Guo, Engagement of Facilities Management in Design Stage through BIM: Framework and a Case Study, *Advances in Civil Engineering*, 2013, 189105, 8 pages, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/189105>.

40. X-Ray Services. (n.d.). URL: <https://concrete-view.com/service/x-ray-services/>.

41. Zhang, Hui. (2017). Head-mounted display-based intuitive virtual reality training system for the mining industry. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.005.

42. Барашиков А. Я. Оценка технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений.

44. Болотов Г. Г. Аналіз ефективності застосування мігруючих інгібіторів корозії (МІК) для підвищення експлуатаційної довговічності залізобетону / Г. Болотов, С. Цибуля, М. Болотов, І. Прибисько, С. Ющенко // *Технічні науки та технології*. – 2022. – № 1(27). – С. 199-210.

45. Болотов М. Г. Аналітичний огляд основних причин та наслідки аварій будівель та споруд, що сталися на території України за останні п'ять років / М. Г. Болотов // *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. – 2013. – №4 (69). – С. 197-204.

46. Болотов М. Шляхи підвищення корозійної стійкості залізобетону / М. Болотов, Г. Болотов, І. Прибисько, М. Корзаченко // *Технічні науки та технології*. – 2019. – № 4 (18). – С. 247-258.

47. Гайдайчук В. В. Комплексний моніторинг технічного стану великорозмірної будівельної споруди / В. В. Гайдайчук, К. Е. Котенко, І. А. Ткаченко // *Підводні технології*. – 2017. – № 05. – С. 61-66.

48. Гармаш А. В. Оцінювання технічного стану залізобетонних залізничних мостів / А. В. Гармаш, В. І. Соломка, О. В. Горбова // *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. – 2011. – Вип. 39. – С. 33-36. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2011/6868>

49. ДБН А.2.1-1-2008. «Інженерні вишукування для будівництва». – Київ : Мінрегіонбуд України. 2008 р. – 72 с.

50. ДБН В.1.2-14-2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд.

51. ДБН В.1.2-6:2021 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість.

Київ : НМЦ Держнаглядохорпраці України, 1998. 238 с.

43. Атаманчук, П. С., Мендерецький, В. В., Панчук, О. П., Чорна, О. Г. (2011). *Безпека життєдіяльності* : навч. посіб. Центр учбової літератури.

44. Болотов, Г., Цибуля, С., Болотов, М., Прибисько, І., Ющенко, С. (2022). Аналіз ефективності застосування мігруючих інгібіторів корозії (МІК) для підвищення експлуатаційної довговічності залізобетону. *Технічні науки та технології*, (1(27)), 199-210.

45. Болотов, М. Г. (2013). Аналітичний огляд основних причин та наслідки аварій будівель та споруд, що сталися на території України за останні п'ять років. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, 4(69), 197-204.

46. Болотов, М., Болотов, Г., Прибисько, І., Корзаченко, М. (2019). Шляхи підвищення корозійної стійкості залізобетону. *Технічні науки та технології*, (4(18)), 247-258.

47. Гайдайчук, В. В., Котенко, К. Е., Ткаченко, І. А. (2017). Комплексний моніторинг технічного стану великорозмірної будівельної споруди. *Підводні технології*, (05), 61-66.

48. Гармаш А. В., Соломка В. І., Горбова О. В. (2011). Оцінювання технічного стану залізобетонних залізничних мостів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*, 39, 33–36. <https://doi.org/10.15802/stp2011/6868>.

49. ДБН А.2.1-1-2008. «Інженерні вишукування для будівництва». (2008). Мінрегіонбуд України.

52. ДСТУ 8855:2019 Будівлі та споруди. Визначення класу наслідків (відповідальності). – Чинний з 019–12–01. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 17 с.

53. ДСТУ 9273:2024 Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість.

54. ДСТУ Б В.2.7-220:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю. [Чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 20 с.

55. Кліменко В. З. Випробування та обстеження будівельних конструкцій і споруд / В. З. Кліменко, І. Д. Бєлов. – Київ : Основа, 2005. – 208 с.

56. Лепська Л. А. Стикові з'єднання збірних конструкцій та проблеми забезпечення точності монтажу каркасів будинків / Л. А. Лепська // Містобудування та територіальне планування: КНУБА. – 2015. – № 55. – С. 49–257.

57. Лисницька, К. Оцінка надійності будівлі на прикладі житлового будинку / К. Лисницька, В. Першаков // Будівельні конструкції. Теорія і практика. – 2018. – № 1(3). – С. 58–67. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.3.2018.58-67>.

58. На Чорнобиль чекає друга катастрофа [Електронний ресурс] // Уніан. – 10.08.12. – Режим доступу: <https://tsn.ua/ukrayina/na-chornobil-chekaye-druga-katastrofa.html>.

59. Обстеження, випробування та експлуатація будівель і споруд : навчальний посібник / М. М. Корзаченко, І. О. Прибисько, Т. Р. Ганєєв, М. Г. Болотов. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – 110 с.

60. Основи безпеки життєдіяльності людини : навч. посіб. / Ю. О. Іщейкіна, В. Л. Філатова, Л. В. Нечепасва, Л. В. Буря, О. Д. Саргош, М. В. Бичко. –

50. ДБН В.1.2-14-2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд.

51. ДБН В.1.2-6:2021 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість.

52. ДСТУ 8855:2019 Будівлі та споруди. Визначення класу наслідків (відповідальності). (2019). ДП «УкрНДНЦ».

53. ДСТУ 9273:2024 Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість.

54. ДСТУ Б В.2.7-220:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю. [Чинний від 2010-09-01]. (2010). Мінрегіонбуд України.

55. Кліменко В. З., Бєлов І. Д. Випробування та обстеження будівельних конструкцій і споруд. Київ : Основа, 2005. 208 с.

56. Лепська, Л. А. (2015). Стикові з'єднання збірних конструкцій та проблеми забезпечення точності монтажу каркасів будинків. *Містобудування та територіальне планування: КНУБА*, (55), 49–257.

57. Лисницька, К., & Першаков В. Оцінка надійності будівлі на прикладі житлового будинку. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2018. № 1(3). С. 58–67. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.3.2018.58-67>.

58. На Чорнобиль чекає друга катастрофа. (10.08.12). <https://tsn.ua/ukrayina/na-chornobil-chekaye-druga-katastrofa.html>.

Полтава : Вид-во ПО "ІШидкоДрук", 2013. – 113 с.

61. Панкевич О. Д. Діагностування тріщин будівельних конструкцій за допомогою нечітких баз знань : монографія / О. Д. Панкевич, С. Д. Штовба. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 108 с. 3

62. Федоренко М. М. Про утворення тріщин і роботу розтягнутого бетону між тріщинами в елементах залізобетонних конструкцій / М. М. Федоренко // Будівельні матеріали і конструкції. – 1968. – № 4. – С. 39–46.

63. Чим відрізняється бороскоп від ендоскопу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://simvolt.ua/chim-vidriznyaietsya-boroskop-vid-endoskopy/>

64. Якименко О. В. Технічна експлуатація будівель та споруд : навч. посібник / О. В. Якименко, К. О. Кіктьова; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 247 с.

59. Корзаченко, М. М., Прибителько, І. О., Ганєєв, Т. Р., Болотов, М. Г. (2021). *Обстеження, випробування та експлуатація будівель і споруд* : навчальний посібник. НУ «Чернігівська політехніка».

60. Іщейкіна, Ю. О., Філатова, В. Л., Нечепасва, Л. В., Буря, Л. В., Саргош, О. Д., & Бичко, М. В. (2013). *Основи безпеки життєдіяльності людини* : навч. посіб. Вид-во ПО "ІШидкоДрук".

61. Панкевич О. Д., Штовба С. Д. (2005). Діагностування тріщин будівельних конструкцій за допомогою нечітких баз знань : монографія. УНІВЕРСУМ-Вінниця.

62. Федоренко М. М. (1968). Про утворення тріщин і роботу розтягнутого бетону між тріщинами в елементах залізобетонних конструкцій. *Будівельні матеріали і конструкції*, (4), 39–46.

63. Чим відрізняється бороскоп від ендоскопу. (2022). <https://simvolt.ua/chim-vidriznyaietsya-boroskop-vid-endoskopy/>

64. Якименко О. В., Кіктьова К. О. (2019). *Технічна експлуатація будівель та споруд*. ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.

THE MAIN TERMS AND DEFINITIONS

ОСНОВНІ ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

3D-модель – візуальне представлення будівлі, що включає її просторове планування та геометричну форму, часто використовується для аналізу, презентації та комунікації в проєктуванні, будівництві та експлуатації.

3D-сканування – метод цифрового відтворення фізичних об'єктів шляхом збору точок даних, що утворюють файл хмари точок, який потім використовується для створення точних 3D-моделей об'єктів.

BIM (інформаційне моделювання будівлі) – технологія цифрового моделювання інформації про будівлю, яка об'єднує всі дані про будівлю (геометричні, матеріальні та експлуатаційні) у єдину модель для управління її життєвим циклом.

Аварійний стан – категорія технічного стану конструкції або будівлі та споруди загалом, що характеризується пошкодженнями й деформаціями, що свідчать про вичерпання несучої здатності й небезпеки обвалення (необхідне проведення термінових протиаварійних заходів).

Аналіз ефективності будівлі – оцінка ефективності будівлі в таких сферах, як споживання енергії, тепловий комфорт, освітлення та якість повітря.

Архітектурне моделювання – процес створення віртуальних 3D-моделей будівель та споруд, що дозволяє проєктувати, оцінювати та аналізувати характеристики будівель протягом усього їхнього життєвого циклу.

Взаємодія – здатність різних систем або програмних інструментів працювати разом, обмінюватися та використовувати спільні дані для спрощення

3D model – a visual representation of a building that includes its spatial layout and geometric form; it is often used for analysis, presentation, and communication in design, construction, and operation.

3D scanning – a method of digitally capturing physical objects by collecting data points that form a point cloud file, which is then used to create accurate 3D models of the objects.

BIM (Building Information Modeling) – a technology for digitally modeling building information that integrates all data about a building (geometric, material, and operational) into a single model for managing its entire life cycle.

Emergency condition - a category of technical condition of building, characterized by damages and deformations, indicating the **exhaustion of bearing capacity** and the risk of collapse (urgent emergency measures are required).

Building Performance Analysis – the assessment of a building's effectiveness in areas such as energy consumption, thermal comfort, lighting, and air quality.

Architectural Modeling – the process of creating virtual 3D models of buildings and structures, enabling the design, evaluation, and analysis of building characteristics throughout their entire life cycle.

Interoperability – the ability of different systems or software tools to work together, exchange, and utilize shared data to streamline processes in

процесів у будівництві та управлінні будівлями.

Використання простору – вимірювання та оптимізація ефективності використання простору будівлі, часто за допомогою даних, зібраних за допомогою датчиків або пристроїв Інтернету речей.

Відновлення – комплекс заходів, що забезпечують підвищення експлуатаційних якостей конструкцій, які прийшли в обмежено працездатний стан, до рівня їхнього первісного стану.

Віртуальна реальність (VR) – технологія, яка створює повністю захопливе віртуальне середовище, де користувачі можуть взаємодіяти з об'єктами та моделями будівель, допомагаючи в процесах проєктування та навчання.

Геопросторові дані – інформація, пов'язана з певним географічним розташуванням, яка часто використовується в управлінні об'єктами для картографування та відстеження активів.

Дефект – окрема невідповідність конструкцій якомусь параметру, встановленому проєктом або нормативним документом.

Діагностика – встановлення і вивчення ознак, що характеризують стан будівельних конструкцій будівель і споруд для визначення можливих відхилень і запобігання порушень нормального режиму їх експлуатації.

Доповнена реальність (AR) – технологія, яка накладає віртуальні елементи на реальний світ, наприклад, відображаючи 3D-моделі поверх фізичних об'єктів, щоб допомогти у виконанні завдань технічного обслуговування та ремонту.

Експлуатаційні показники будівлі – сукупність технічних, об'ємно-плану-

construction and building management.

Space Utilization – the measurement and optimization of a building's space efficiency, often using data collected from sensors or Internet of Things (IoT) devices.

Restoration - a set of measures that ensure the improvement of the operational qualities of structures that have reached a limited operational state, to the level of their original state.

Virtual Reality (VR) – a technology that creates a fully immersive virtual environment where users can interact with building objects and models, aiding in design and training processes.

Serviceable (Normal) Condition – a category of the technical condition of a building structure or an entire building/facility, characterized by the absence of defects or damages that could reduce load-bearing capacity or operational suitability.

The Defect - a separate inconsistency (inhomogeneity) of structures to a parameter set by the project or regulatory documents.

The Diagnosis - the establishment of signs that characterize the condition of buildings in order to determine possible deviations and prevention of violations of their normal operational mode.

Augmented Reality (AR) – a technology that overlays virtual elements onto the real world, for example, displaying 3D models over physical objects to assist in performing maintenance and repair tasks.

Building's operational indicators - a set of technical, spatial-planning, sanitary-hygienic, economic and aesthetic

вальних, санітарно-гігієнічних, економічних та естетичних характеристик будівлі, що обумовлюють його експлуатаційні якості.

Енергетичний менеджмент – процес моніторингу, контролю та збереження енергії в будівлі з метою зниження витрат та підвищення експлуатаційної ефективності.

Життєвий цикл будівлі – період від етапу проєктування та будівництва до експлуатації та знесення будівлі, протягом якого всі етапи та процеси повинні бути оптимізовані за допомогою BIM.

Змішана реальність (MR) – технологія, яка поєднує фізичний та віртуальний світи для створення середовища, де цифрові та реальні елементи співіснують та взаємодіють у режимі реального часу. ЗР є розширенням доповненої реальності (AR), що пропонує розширені можливості взаємодії.

Індекс стану об'єкта (ІСФ) – показник, що використовується для оцінки фізичного стану будівлі або її компонентів, зазвичай використовується для визначення пріоритетності проєктів технічного обслуговування або капітального ремонту.

Інструменти моделювання – програмні додатки, що використовуються для створення, керування та модифікації BIM-моделей, включаючи AutoCAD, Revit та інші. Ці інструменти необхідні для створення цифрового представлення об'єкта.

Інформаційне моделювання – створення, управління та обробка цифрових моделей будівель за допомогою різних технологій для зберігання та впорядкування всіх даних, пов'язаних з проєктом, протягом його життєвого циклу.

Капітальний ремонт будівлі – комплекс будівельних та організаційно-

characteristics of a building that determine its operational qualities.

Energy Management – the process of monitoring, controlling, and conserving energy in a building to reduce costs and improve operational efficiency.

Building Life Cycle – the period from design and construction to operation and demolition of a building, during which all stages and processes should be optimized using BIM.

Mixed Reality (MR) – a technology that combines the physical and virtual worlds to create an environment where digital and real elements coexist and interact in real time. MR is an extension of Augmented Reality (AR), offering enhanced interaction capabilities.

Facility Condition Index (FCI) – a metric used to assess the physical condition of a building or its components, typically employed to determine the priority of maintenance or capital repair projects.

Modeling Tools – software applications used to create, manage, and modify BIM models, including AutoCAD, Revit, and others. These tools are essential for generating a digital representation of a building or structure.

Information Modeling – the creation, management, and processing of digital building models using various technologies to store and organize all project-related data throughout its life cycle.

Major repairs of a building - a set of construction and organizational and

технічних заходів щодо усунення фізичного й морального зносу, що не передбачають зміну основних техніко-економічних показників будівлі та споруди, що включають, у разі потреби, заміну окремих конструктивних елементів і систем інженерного обладнання.

Категорія технічного стану – ступінь експлуатаційної придатності будівельної конструкції або будівлі та споруди загалом, встановлена залежно від частки зниження несучої здатності й експлуатаційних характеристик конструкцій.

Компетентність – стосується здатності ефективно виконувати роботу, враховуючи знання, навички, досвід та кваліфікацію. Компетентність включає як формальну кваліфікацію, так і особистісні характеристики, необхідні для виконання конкретних завдань.

Критерії оцінки – встановлене проектом або нормативним документом кількісне або якісне значення параметра, що характеризує міцність, деформативність і інші нормовані характеристики будівельної конструкції.

Модернізація будівлі – окремий випадок реконструкції, який передбачає через трансформаційні зміни і оновлення об'ємно-планувальних і архітектурних рішень існуючої будівлі старої споруди і його морально застарілого інженерного обладнання відповідно до вимог, що висувуються чинними нормами до естетики умов проживання та експлуатаційних параметрів житлових будинків і промислових будівель.

Моральний знос будівлі – поступове (в часі) відхилення основних експлуатаційних показників від сучасного рівня технічних вимог експлуатації будівель і споруд.

technical measures to eliminate physical and moral wear and tear, which do not involve changing the main technical and economic indicators of the building and structure, including, if necessary, the replacement of individual structural elements and engineering equipment systems.

Category of technical condition - the degree of the building's usability, set depending on the share of reduction of bearing capacity and operational characteristics of structures.

Competence – refers to the ability to perform work effectively, taking into account knowledge, skills, experience, and qualifications. Competence includes both formal qualifications and personal attributes necessary to carry out specific tasks.

Evaluation criteria - a quantitative or qualitative value of a parameter established by a project or regulatory document that characterizes the strength, deformability and other standardized characteristics of a building and structure.

Modernization - a special case of reconstruction, which involves transformational changes and updating of spatial planning and architectural solutions of an existing building of an old structure and its obsolete engineering equipment in accordance with the requirements set forth by current standards for the aesthetics of living conditions and operational parameters of residential buildings and industrial buildings.

Moral wear of a building - a gradual (over time) deviation of the main operational indicators from the current level of technical requirements for the operation of buildings and structures.

Неприпустимий (передаварійний) стан – категорія технічного стану будівельної конструкції або будівлі та споруди загалом, що характеризується зниженням несучої здатності й експлуатаційних характеристик, при якому є небезпека для перебування людей і збереження обладнання (необхідне проведення страхувальних заходів і посилення конструкцій).

Несучі конструкції – будівельні конструкції, що сприймають експлуатаційні навантаження і впливи й забезпечують просторову стійкість будинку.

Нормальна експлуатація – експлуатація конструкції або будівлі загалом, що здійснюється у відповідності до передбачених в нормах або проект технологічними або побутовими умовами.

Нормативний рівень технічного стану – категорія технічного стану, при якому кількісне і якісне значення параметрів усіх критеріїв оцінки технічного стану будівельних конструкцій будівель і споруд відповідають вимогам нормативних документів.

Обмежено працездатний (незадовільний) стан – категорія технічного стану конструкцій, при якій є дефекти і пошкодження, що призвели до деякого зниження несучої здатності, але відсутня небезпека раптового руйнування і функціонування конструкції можливо при контролі її стану, тривалості та умов експлуатації.

Обмін даними – процес передачі даних між різними системами або програмними платформами в BIM, що дозволяє різним зацікавленим сторонам (таким як архітектори, інженери та підрядники) безперешкодно обмінюватися важливою інформацією.

Обмін інформацією про будівлі (BIX) – стандарт або платформа для об-

Unsatisfactory condition - a category of technical condition of structures, in which there are defects and damages that led to some reduction in load-bearing capacity, but there is no danger of sudden destruction and operation of the structure is possible only with the total control of its state.

Load-bearing structures - building structures that absorb operational loads and impacts and ensure the spatial stability of the building.

Normal operation - operation of a structure or building in general, carried out in accordance with the technological or domestic conditions stipulated in the standards or project.

Regulatory level of technical condition - a category of technical condition in which the quantitative and qualitative value of the parameters of all criteria for assessing the building's technical condition meet all the requirements of regulatory documents.

Limited Serviceable (Unsatisfactory) Condition – a category of a structure's technical state in which defects and damages have caused some reduction in load-bearing capacity, but there is no immediate risk of sudden failure, and the structure can continue to function under monitored conditions, duration, and operational requirements.

Data Exchange – the process of transferring data between different systems or software platforms in BIM, enabling various stakeholders (such as architects, engineers, and contractors) to seamlessly share important information.

Building Information Exchange (BIX) – a standard or platform for exchanging building information at various stages

міну інформацією про будівлі на різних етапах життєвого циклу будівлі, від проєктування до будівництва та експлуатації.

Обстеження – комплекс заходів щодо визначення та оцінки фактичних значень контрольованих параметрів, що характеризують експлуатаційний стан, придатність і працездатність об'єктів обстеження і визначають можливість їх подальшої експлуатації або необхідність відновлення і посилення.

Огляд проєкту – процес оцінки проєкту будівлі, часто на ранніх стадіях, щоб переконатися, що він відповідає нормативним вимогам, функціональним потребам та естетичним стандартам. Він включає багатьох зацікавлених сторін, включаючи дизайнерів, архітекторів та керівників об'єктів.

Операційна ефективність – здатність надавати послуги та експлуатацію будівель найбільш економічно ефективним та ресурсоефективним способом, зберігаючи при цьому якість та сталий розвиток.

Охорона праці та безпека (WHS) – політика, процедури та практика, розроблені для забезпечення безпечного робочого середовища для працівників та підрядників у будівельному секторі та секторі управління об'єктами.

Оцінка технічного стану – встановлення ступеня пошкодження і категорії технічного стану будівельних конструкцій або будинків і споруд загалом на основі зіставлення фактичних значень кількісно оцінюваних ознак зі значеннями цих самих ознак, встановлених проєктом або нормативним документом.

Параметричне проєктування – підхід до проєктування в BIM, який дозволяє визначати параметри (такі як властивості матеріалів, розміри або експлуатаційні характеристики), що можуть

of the building life cycle, from design and construction to operation.

The Inspection - a set of measures to determine the actual values of controlled parameters that characterize the operational condition, suitability and efficiency of the buildings and determine the possibility of their further reliable operation or the need for restoration and strengthening.

Project Review – the process of evaluating a building project, often at early stages, to ensure it meets regulatory requirements, functional needs, and aesthetic standards. This process involves multiple stakeholders, including designers, architects, and facility managers.

Operational Efficiency – the ability to deliver building services and operations in the most cost-effective and resource-efficient manner while maintaining quality and supporting sustainable development.

Workplace Health and Safety (WHS) – the policies, procedures, and practices designed to ensure a safe working environment for employees and contractors in the construction and facility management sectors.

The technical condition assessment - establishing the damage degree and the category of technical condition of buildings based on comparison the quantified features actual values with the values of the same features established by the project or regulatory document.

Parametric Design – a BIM design approach that allows defining parameters (such as material properties, dimensions, or performance characteristics) which can automatically adjust when changes

автоматично коригуватися при внесенні змін, забезпечуючи узгодженість та ефективність.

Перевірочний розрахунок – розрахунок існуючої конструкції за чинними нормами проектування з введенням у розрахунок отриманих у результаті обстеження або по проектної та виконавчої документації геометричних параметрів конструкції, фактичної міцності будівельних матеріалів в умовах діючих навантажень, уточненої розрахункової схеми з урахуванням наявних дефектів і пошкоджень.

План профілактичного обслуговування – структурований графік регулярних робіт з технічного обслуговування, спрямований на запобігання поломкам обладнання та продовження терміну служби активів.

Планування технічного обслуговування – процес планування та організації завдань з технічного обслуговування, щоб забезпечити своєчасне обслуговування та ремонт обладнання та систем, зменшуючи час простою та витрати.

Посилення – комплекс заходів, що забезпечують підвищення несучої здатності й експлуатаційних властивостей будівельної конструкції або будівлі та споруди загалом у порівнянні з фактичним станом або проектними показниками.

Поточний ремонт будівлі – комплекс будівельних та організаційно-технічних заходів з метою усунення несправностей (відновлення працездатності) елементів будівлі й підтримки нормального рівня експлуатаційних показників.

Пошкодження – несправність, отримана конструкцією при виготовленні, транспортуванні, монтажі або експлуатації.

Працездатний (задовільний) стан – категорія технічного стану, при якій

are made, ensuring consistency and efficiency.

Verification calculation - calculation of an existing structure according to current design standards with the introduction into the calculation of the geometric parameters of the structure obtained because of the inspections or according to the design and execution documentation, the actual strength of building materials, acting loads, and a refined calculation scheme taking into account existing defects and damage.

Preventive Maintenance Plan – a structured schedule of regular maintenance activities aimed at preventing equipment failures and extending the lifespan of assets.

Maintenance Planning – the process of scheduling and organizing maintenance tasks to ensure timely servicing and repair of equipment and systems, reducing downtime and costs.

Strengthening - a set of measures that ensure the increase in the load-bearing capacity and operational properties of a building structure or building and structure as a whole in comparison with the actual state or design indicators.

Current repairs - a set of construction and organizational and technical measures to eliminate malfunctions (restoration of operability) of building elements and maintain a normal level of operational indicators.

The Damage - a defect of the structure caused during manufacture, transportation, installation or operation.

Serviceable (satisfactory) condition - a category of technical condition in which some of the numerically

деякі з чисельно оцінюваних параметрів, що контролюються, не відповідають вимогам проекту, норм і стандартів, але наявні порушення вимог, наприклад, щодо деформативності, а в залізобетоні й за тріщиностійкістю, у цих конкретних умовах експлуатації не призводять до порушення працездатності, і несуча здатність конструкцій, з урахуванням впливу наявних дефектів і пошкоджень, забезпечується.

Прогнозування сталого розвитку та ефективності – процес у BIM для моделювання та аналізу екологічних показників та сталості будівлі. Це включає використання енергії, матеріалів та управління відходами протягом життєвого циклу будівлі.

Реконструкція будівлі – комплекс будівельних робіт та організаційно-технічних заходів, пов'язаних зі зміною основних техніко-економічних показників (навантажень, планування приміщень, будівельного обсягу та загальної площі будівлі, інженерної оснащеності) з метою зміни умов експлуатації, максимального заповнення втрати внаслідок фізичного і морального зносу, досягнення нових цілей експлуатації будівлі.

Реконструкція та реставрація – процес відновлення будівлі чи споруди до її початкового стану або адаптації до нових вимог зі збереженням її історичної цінності. Це включає моделювання, ремонт та заміну компонентів за необхідності.

Рентабельність інвестицій (ROI) – показник ефективності, що використовується для оцінки ефективності або прибутковості інвестицій, розраховується

evaluated parameters that are monitored do not meet the requirements of the project, norms and standards, but existing violations of requirements, for example, regarding deformability, and in reinforced concrete, crack resistance, do not lead to a violation of serviceability in these specific operating conditions, and the load-bearing capacity of structures, taking into account the influence of existing defects and damage, is ensured.

Sustainability and Performance Forecasting – a BIM process for modeling and analyzing a building's environmental performance and sustainability. This includes the use of energy, materials, and waste management throughout the building's life cycle.

Reconstruction - a complex of works/organizational and technical measures associated with changing the main technical and economic indicators (loads, layout of premises, engineering equipment) of building in order to change the operating conditions to compensate of physical and moral wear.

Renovation and Restoration – the process of returning a building or structure to its original condition or adapting it to new requirements while preserving its historical value. This includes modeling, repair, and replacement of components as needed.

Return on Investment (ROI) – a performance metric used to evaluate the efficiency or profitability of an investment, calculated by dividing the

шляхом ділення чистого прибутку від інвестицій на їхню початкову вартість.

Рівень розробки (LOD) – ступінь деталізації BIM-моделі, який визначає, наскільки точно представлені елементи будівлі на кожному етапі проєктування.

Розумна будівля – будівля, яка використовує передову автоматизацію та цифрові технології для підвищення комфорту, ефективності та сталого розвитку мешканців.

Система автоматизації будівель (BAS) – централізована система, що використовується для керування та моніторингу систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, освітлення, безпеки та інших систем будівлі з метою підвищення енергоефективності та комфорту мешканців.

Система управління об'єктами (FMS) – програмна платформа, яка інтегрує різні процеси управління об'єктами, такі як управління активами, управління простором та управління технічним обслуговуванням.

Справний (нормальний) стан – категорія технічного стану будівельної конструкції або будівлі та споруди загалом, що характеризується відсутністю дефектів і пошкоджень, що впливають на зниження несучої здатності та експлуатаційної придатності.

Сталий розвиток – здатність підтримувати та покращувати екологічні, соціальні та економічні показники будівлі або інфраструктури протягом усього її життєвого циклу.

Стандарт IFC – Галузеві базові класи (IFC) – це стандартизована модель даних для BIM, яка використовується для обміну інформацією між різними програмними системами BIM,

net profit from the investment by its initial cost.

Level of Development (LOD) – the degree of detail in a BIM model, indicating how accurately building elements are represented at each stage of the design process.

Smart Building – a building that utilizes advanced automation and digital technologies to enhance comfort, efficiency, and sustainability for its occupants.

Building Automation System (BAS) – a centralized system used to control and monitor a building's heating, ventilation, and air conditioning, lighting, security, and other systems to enhance energy efficiency and occupant comfort.

Facility Management System (FMS) – a software platform that integrates various facility management processes, such as asset management, space management, and maintenance management.

Serviceable (Normal) Condition – a category of the technical condition of a building structure or an entire building/facility, characterized by the absence of defects or damages that could reduce load-bearing capacity or operational suitability.

Sustainable Development – the ability to maintain and improve the environmental, social, and economic performance of a building or infrastructure throughout its entire life cycle.

Industry Foundation Classes (IFC) – a standardized data model for BIM used to exchange information between different BIM software systems, ensuring a more consistent and integrated workflow throughout the entire building life cycle.

що забезпечує більш цілісний та інтегрований робочий процес протягом усього життєвого циклу будівлі.

Ступінь пошкодження – встановлена у процентному відношенні частка проєктної несучої здатності будівельної конструкції.

Точки вимірювання – окремі елементи або точки, що фіксують геометричні параметри будівлі чи споруди під час сканування для створення моделі.

Управління активами – систематичний процес експлуатації, обслуговування, модернізації та утилізації активів найбільш економічно ефективним способом.

Управління життєвим циклом – комплексний підхід до управління будівлею або спорудою від її початкового проєктування через будівництво та експлуатацію, до остаточного знесення або реконструкції, що забезпечує ефективне використання ресурсів та підтримку функціональності.

Управління життєвим циклом активів (ALM) – управління активами протягом усього їхнього життєвого циклу, від придбання та експлуатації до утилізації, з метою максимізації цінності та мінімізації витрат.

Управління об'єктами (FM) – практика координації фізичного робочого місця з людьми та роботою організації. FM включає управління щоденною експлуатацією, технічним обслуговуванням та ремонтом об'єктів, забезпечення оптимальної продуктивності та дотримання нормативних стандартів.

Фази проєктування та будівництва – фази життєвого циклу будівлі, що включають проєктування та будівництво будівлі. Технологія BIM переважно використовується на цих фазах для

The damage degree - the percentage of the design load-bearing capacity of the building structure.

Measurement Points – specific elements or locations that record the geometric parameters of a building or structure during scanning for model creation.

Asset Management – a systematic process of operating, maintaining, upgrading, and disposing of assets in the most cost-effective manner.

Life Cycle Management – a comprehensive approach to managing a building or structure from its initial design through construction and operation to eventual demolition or reconstruction, ensuring efficient resource use and sustained functionality.

Asset Life Cycle Management (ALM) – the management of assets throughout their entire life cycle, from acquisition and operation to disposal, aimed at maximizing value and minimizing costs.

Facility Management (FM) – the practice of coordinating the physical workplace with people and organizational activities. FM includes managing daily operations, maintenance, and repair of facilities, ensuring optimal productivity and compliance with regulatory standards.

Design and Construction Phases – stages of a building's life cycle that encompass the design and construction of the facility. BIM technology is primarily used during

моделювання, візуалізації та координації проєкту.

Фізичний знос будівлі – погіршення технічних і пов'язаних з ними експлуатаційних показників будівлі, викликане об'єктивними причинами.

Цифровий двійник – цифрове представлення фізичного об'єкта або системи, що дозволяє моніторинг та моделювання умов у режимі реального часу.

these phases for modeling, visualization, and project coordination.

Physical wear of a building - a deterioration in the technical and related operational indicators of a building caused by objective reasons.

Digital Twin – a digital representation of a physical object or system that enables real-time monitoring and simulation of conditions.

**INSPECTION, DIAGNOSTICS AND IMPLEMENTATION
OF BIM TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION**

**ОБСТЕЖЕННЯ, ДІАГНОСТИКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ BIM-
ТЕХНОЛОГІЙ У БУДІВНИЦТВІ**

M. Bolotov, M. Korzachenko, I. Petrenko, I. Prybytko, M. Rudenko

Болотов М. Г., Корзаченко М. М.,
Петренко І. В., Прибителько І. О., Руденко М. М.

Підписано до друку 01.09.2025. Формат 60×84/16.
Ум. друк. арк. – 17,3. Тираж 100 пр. Замовлення № 23/25.

Редакційно-видавничий відділ Національного університету «Чернігівська політехніка»
14030, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.
Свідectво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
серія ДК № 7128 від 18.08.2020 р.