

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І
АРХІТЕКТУРИ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І
АРХІТЕКТУРИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РУДНЄВА ІРИНА МИКОЛАЇВНА

УДК 69.056.55: 69.059

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЯКОСТІ ПІДСИЛЕННЯ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ ПІД ЧАС
РЕКОНСТРУКЦІЇ**

05.23.08 – Технологія та організація промислового та цивільного будівництва
19 – «Архітектура та будівництво»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



І.М. Руднева

Науковий консультант: Молодід Олександр Станіславович, доктор технічних наук, професор.

Київ - 2026 р.

АНОТАЦІЇ. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Анотація (українською мовою).

Руднєва І.М. Конструктивно-технологічна система забезпечення якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.08 - технологія та організація промислового та цивільного будівництва. Київський національний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України, Київ, 2026.

У дисертаційній роботі вирішено складну наукоємну проблему щодо формування конструктивно-технологічної системи (КТС) забезпечення якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції. Запропонована система побудована на принципах системного, життєво-циклового та багатокритеріального підходів і передбачає узгоджене формування моделей КТР та ОТР з урахуванням технічного стану каркасу, просторово-планувальних і виробничих обмежень, трудомісткості, тривалості, вартості, надійності, ефективності та сталості. Такий підхід дозволив підвищити рівень обґрунтованості вибору рішень на стадіях обстеження, проектування, варіантного опрацювання та виконання робіт з підсилення каркасних конструкцій.

За результатами аналізу сучасного стану проблеми встановлено, що потреба у підсиленні каркасних будівель є масовим явищем у практиці реконструкції цивільних і промислових об'єктів та зумовлена фізичним і моральним зносом, зміною функціонального призначення будівель, зростанням експлуатаційних навантажень, змінами нормативної бази, кліматичними впливами та наслідками бойових дій. Виявлено, що існуючі підходи до вибору КТР мають фрагментарний характер, не забезпечують комплексного врахування технічних, технологічних, організаційних, економічних, екологічних і соціальних факторів

та не формують єдиної системи підтримки прийняття рішень щодо якості підсилення.

У роботі визначено наукове трактування якості підсилення каркасних будівель як інтегральної характеристики КТР, що охоплює показники експлуатаційної надійності N , ефективності R та сталості A протягом усього життєвого циклу об'єкта. Систематизовано та класифіковано основні принципи забезпечення якості КТС підсилення каркасів будівель. Обґрунтовано доцільність життєво-циклового підходу та багатокритеріальної оцінки рішень за системою показників $N-R-A$, що охоплюють надійність, ефективність і сталість. Запропоновано методологічну основу вибору та оцінювання альтернативних моделей КТР і ОТР у межах єдиного керованого процесу.

Проведено дослідження методів і техніки обстеження елементів існуючого каркасу будівлі, систематизовано методи інструментального контролю за функціональними ознаками. Розроблено багатфакторну систему нормування витрат праці і часу на процеси підсилення, в якій враховано техніко-технологічні, організаційні, ергономічні, середовищні та виробничі фактори. Розвинуто методику цілочислового мікроелементного нормування процесів підсилення та запропоновано інтегральний коригувальний коефіцієнт, що дозволяє адаптувати нормативи трудомісткості до реальних умов реконструкції.

У результаті дослідження виявлено та систематизовано фактори, що впливають на технічний стан елементів каркасу, якість підсилення та вибір відповідних рішень. Сформовано класифікації дефектів і пошкоджень бетонних, залізобетонних і металевих конструкцій, встановлено їх зв'язок із проєктними, технологічними, монтажними та експлуатаційними причинами. Доведено, що дефекти й пошкодження слід розглядати не лише як локальні прояви зносу, а як індикатори системних недоліків на різних етапах життєвого циклу будівлі. Це дозволило сформувати систему факторів, необхідних для формалізації вибору КТР і побудови КТС забезпечення якості підсилення.

У роботі досліджено вплив просторово-планувальних параметрів існуючих будівель, параметрів робочих місць виконавців, виробничого середовища,

характеру дефектів і видів робіт на формування КТР. Запропоновано формалізовані моделі просторово-планувальних параметрів зон підсилення, а також параметричний опис умов виконання робіт, який дозволяє кількісно оцінювати їх вплив на трудомісткість, тривалість, безпеку й якість процесів підсилення. Встановлено, що параметри робочих місць, доступність зон виконання робіт, обмеженість фронту робіт і суміщення з діючим виробництвом є визначальними чинниками при виборі організаційно-технологічних моделей.

На підставі теоретичних, аналітичних і емпіричних досліджень розроблено та систематизовано систему базових моделей КТР підсилення каркасних конструкцій, що охоплюють локальне підсилення, зміну конструктивної схеми, підвищення просторової жорсткості, FRP-підсилення, попереднє напруження та інші рішення. Паралельно сформовано варіанти ОТР, які враховують проектування, управління ресурсами, механізацію, цифровізацію, а також управління якістю і ризиками. Це забезпечило системне поєднання конструктивних і організаційних компонентів у межах єдиної КТС.

Розроблено модель нормування та моделювання технологічних схем монтажу елементів підсилення на основі мікроелементного підходу та ієрархічної декомпозиції процесу. Встановлено, що ці процеси є стохастичними багатофакторними системами з високою варіативністю, оптимізація яких потребує формалізації технологічних переходів, суміщення операцій і використання мережевих моделей. Сформовано емпіричну базу трудових витрат, тривалості та собівартості, що забезпечило багатокритеріальне ранжування альтернативних рішень.

Ключовим науковим результатом є розроблення КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель, у якій підсилення розглядається як керована система з визначеними параметрами, обмеженнями та цільовими результатами. Запропоновано BIM-орієнтовану інформаційно-аналітичну підсистему як цифрове ядро КТС, що забезпечує формалізований вибір КТР і ОТР за критеріями ефективності, надійності та сталості. Обґрунтовано інтеграцію BIM, Lean, Digital Twin, LCA, SHM, ANN і методів машинного навчання для

підтримки прийняття рішень. Орієнтація на людиноцентричну модель реконструкції з використанням цих технологій є економічно й екологічно обґрунтованою, а ефективність забезпечується поєднанням моделювання, аналізу практичного досвіду та узгодження інтересів зацікавлених сторін. Застосування АНР забезпечує обґрунтований вибір критеріїв і підвищення надійності рішень, тоді як роботизація виступає інструментом підвищення якості процесів за рахунок зниження небезпечних і трудомістких операцій, мінімізації помилок і підвищення безпеки, ергономічності та стабільності виробничих систем.

Розроблено модифіковану КТС із застосуванням ВІМ та принципів ощадливого управління процесами для забезпечення сталого розвитку. У межах цієї модифікації формалізовано потоки ресурсів, робіт та інформації, імітаційного моделювання та багатокритеріального аналізу якості за системою N–R–A. Запропоновано операційну модель оптимізації КТР на основі функціонального зв'язку між групами технологічних операцій та інтегральною оцінкою якості рішень. Це дозволило перейти від описового підходу до алгоритмічного вибору і вдосконалення рішень підсилення.

Апробація розробленої системи виконана на основі порівняльного аналізу чотирьох технологічних моделей підсилення, які відрізнялися рівнем організаційно-технологічної зрілості, застосуванням принципів ощадливої організації процесів, вбудованого контролю якості та використанням фіброармованих полімерів. Встановлено, що поетапне нарощування організаційно-технологічної зрілості забезпечує стійке зростання інтегральної якості КТР за системою критеріїв N–R–A. Кількісно підтверджено ефективність Lean-оптимізації: скорочення трудомісткості циклу, зменшення часу очікування, переробок і надлишкових запасів, підвищення продуктивності та зниження частоти ризикових подій. Найвищі результати отримано для моделі, що поєднує FRP-підсилення, принципи ощадливого управління процесами та вбудований контроль якості.

На підставі виконаних досліджень розроблено узагальнені методичні рекомендації щодо застосування КТС підвищення якості підсилення каркасних будівель як керованого багатокритеріального процесу узгодження КТР і ОТР. Методологія передбачає використання Lean-оптимізації, багатокритеріального моделювання, ранжування альтернатив, життєво-циклового управління ресурсами, системного контролю ризиків, а також інтеграцію екологічних і соціальних аспектів у прийняття рішень. Це дозволяє підвищити якість проєктних рішень, скоротити трудомісткість і вартість робіт, зменшити ризики реконструкції та підвищити надійність, довговічність і сталість каркасних будівель.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у формуванні наукоємної КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель та у науковому обґрунтуванні багатокритеріального вибору ефективних КТР і ОТР на стадіях обстеження, проєктування та реалізації реконструкції.

У результаті проведеного дослідження сформульовано нові наукові положення й висновки, зокрема:

вперше:

- сформульовано наукову концепцію КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель, у якій процес підсилення розглядається як керована багатокритеріальна система перетворень із визначеними вхідними параметрами, обмеженнями, моделями реалізації та цільовими результатами, а вибір рішень здійснюється за інтегрованою системою критеріїв ефективності R_i , експлуатаційної надійності N_i та сталості A_i ;

- запропоновано та обґрунтовано ВІМ-орієнтовану інформаційно-аналітичну підсистему як цифрове ядро КТС з інтегрованим інтелектуальним контуром управління якістю та стратегічного прийняття рішень, що забезпечує формалізований вибір моделей КТР і ОТР у межах єдиного інформаційного середовища;

– вперше систематизовано фактори недосконалого застосування матеріалів як окрему групу впливу на якість КТР, що дозволило формалізувати їх у складі критеріїв оцінювання та врахувати при багатокритеріальному виборі рішень.

– обґрунтовано та запроваджено формалізований механізм узгодження моделей $M_{KT}-M_{OT}$ з інтеграцією факторів ініціювання підсилення у просторі рішень «багато-до-багатьох» на основі логічної матриці відношень і запропонованого комплексу CRIST, що забезпечує перехід від описового вибору рішень до алгоритмізованого попереднього відбору допустимих комбінацій;

– сформовано ієрархічну модель універсальної множини КТР та систему базових моделей підсилення каркасних конструкцій $M_{KT0}-M_{KT12}$, які структуровано не лише за видом матеріалу чи типом елемента, а за характером втручання в роботу каркасу, просторово-планувальними обмеженнями та умовами організаційно-технологічної реалізації;

– сформовано формалізовану систему показників якості КТР підсилення каркасних будівель на основі інтеграції критеріїв надійності, ефективності та сталості, що охоплює технічні, технологічні, економічні, екологічні та організаційні аспекти протягом життєвого циклу об'єкта;

– сформовано ієрархічну модель універсальної множини організаційно-технологічних рішень (ОТР) підсилення каркасних будівель, представлену у вигляді формалізованої системи взаємопов'язаних підпроцесів ОТР; моделі ОТР структуровано у дві функціональні групи — моделі реалізації КТР та моделі управління, оптимізації й цифрової підтримки процесів, що забезпечує генерування та порівняння альтернативних сценаріїв підсилення залежно від умов реконструкції;

– запропоновано формалізовану операційну модель оптимізації підсилення, у межах якої встановлено функціональний зв'язок між групами технологічних операцій та інтегральною оцінкою якості КТР, що дало змогу кількісно оцінювати внесок окремих етапів процесу в досягнення цільового рівня якості;

– обґрунтовано модифікацію КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель із Lean-ядром, у межах якої BIM і Lean-технології

розглядаються не як допоміжні інструменти, а як структурні компоненти системи, що впливають на формування, оцінювання та вибір КТР і ОТР;

- запропоновано алгоритм цифровізації прийняття рішень щодо підсилення каркасних будівель, який поєднує 3D-сканування, BIM-середовище, оцінку технічного стану, життєво-циклові показники, імітаційне моделювання, а також механізми ітераційного коригування моделей $M_{KT}-M_{OT}$;

- обґрунтовано і реалізовано імітаційний підхід до оцінювання технологічних моделей підсилення на основі серії прогонів альтернативних сценаріїв організації робіт, що дозволило кількісно визначити вплив Lean-оптимізації, вбудованого контролю якості та застосування FRP-систем на показники якості;

- запропоновано методику порівняльного багатокритеріального оцінювання та ранжування моделей підсилення за показниками трудомісткості, вартості, просторових обмежень, тривалості експлуатації, рівня підвищення несучої здатності та сталості. Оцінювання здійснюється на основі рангово-бальних шкал і агрегування критеріїв із використанням індексу порівняльної доцільності як інтегрального показника вибору раціональних КТР;

- запропоновано підхід до інтеграції принципів сталого розвитку, Lean-ідентифікації втрат, життєво-циклового аналізу та цифрового моделювання в єдину систему підтримки прийняття рішень щодо підсилення будівель, що формує цифрово-орієнтований простір вибору конструктивно-технологічних рішень і забезпечує мінімізацію ресурсних витрат, викидів CO_2 , відходів і ризиків протягом життєвого циклу об'єкта.

удосконалено:

- методологічні підходи до оцінювання якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції шляхом переходу від локального аналізу окремих технічних рішень до системного багатокритеріального оцінювання КТР у межах КТС;

- принципи побудови методики дослідження процесів підсилення каркасних будівель на основі поєднання системного, життєво-циклового, багатокритеріального, процесного та ризик-орієнтованого підходів;

- систему критеріїв і показників оцінювання якості КТР шляхом включення до неї показників технологічності, просторово-планувальних обмежень, ризиків виробничого середовища, трудомісткості, тривалості, собівартості, екологічної безпеки та довговічності;

- методичні положення щодо обстеження, аналізу дефектів і пошкоджень каркасних конструкцій шляхом систематизації їх причин, механізмів розвитку та впливу на несучу здатність, жорсткість, довговічність і вибір стратегій підсилення;

- методику дослідження та нормування витрат праці і часу на процеси підсилення каркасних конструкцій на основі багатофакторної системи чинників, які враховують техніко-технологічні, організаційні, ергономічні, середовищні та виробничі умови виконання робіт;

- модель мікроелементного нормування процесів підсилення за рахунок введення інтегрального коригувального коефіцієнта комбінованого впливу факторів, що дозволяє адаптувати норми часу до реальних умов реконструкції;

- підходи до формування організаційно-технологічних рішень щодо підсилення каркасних будівель шляхом їх поділу на моделі реалізації КТР і моделі управління, оптимізації, цифровізації та контролю якості;

- методичні підходи до врахування просторово-планувальних параметрів існуючих будівель, параметрів робочих місць, доступності зон підсилення, насиченості фронту робіт та виробничих обмежень у процесі вибору КТР і МОТ;

- підходи до вибору сучасних матеріалів і виробів для підсилення каркасів будівель шляхом врахування не лише їх міцнісних характеристик, а й технологічної реалізованості, маси, довговічності, ремонтпридатності, екологічного сліду та впливу на подальшу експлуатацію;

- методичні рекомендації щодо практичного застосування КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель на основі

багатокритеріального узгодження КТР і ОТР, використання АНР, BIM, принципів ощадливого управління процесами, життєво-циклового управління ресурсами та системного контролю ризиків.

дістали подальшого розвитку:

- теоретичні положення щодо реконструкції каркасних будівель як керованого процесу зміни властивостей несучого каркасу під впливом конструктивних, технологічних, організаційних, економічних та екологічних факторів;
- наукові уявлення про роль просторово-планувальних параметрів існуючих будівель у формуванні КТС відновлення та підсилення каркасів;
- підходи до систематизації дефектів, пошкоджень і факторів технічного стану елементів каркасу будівлі як інформаційної основи для вибору стратегій реконструкції та підсилення;
- положення щодо аналізу досвіду використання сучасних матеріалів і виробів, зокрема FRP-систем, у КТС підсилення каркасів будівель з урахуванням вимог низьковуглецевої реконструкції та сталого розвитку;
- методичні підходи до моделювання технологічних схем організації та механізації монтажу елементів підсилення на основі мікроелементного підходу, комбінаторного аналізу та мережевого подання процесів;
- положення щодо інтеграції BIM, Lean, Digital Twin, SHM, LCA та інтелектуальних методів (ANN, ML) у систему забезпечення якості підсилення каркасних будівель;
- науково-прикладні засади формування операційної системи оптимізації підсилення каркасних конструкцій за критеріями N–R–A, орієнтованої на підтримку прийняття рішень у середовищі реконструкції;
- підходи до апробації та порівняльного оцінювання альтернативних моделей підсилення каркасних будівель, що дозволяють визначати найдоцільніші рішення за інтегральною якістю, продуктивністю, ресурсною ефективністю та рівнем сталості;

– методичні засади переходу від описової класифікації способів підсилення до цифрово підтримуваного, алгоритмізованого та багатокритеріального вибору рішень у межах Construction 4.0-орієнтованої реконструкції.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблена КТС, методики, моделі та рекомендації доведені до можливості практичного використання при реконструкції цивільних і промислових будівель. Їх застосування дозволяє підвищити ефективність і якість проєктних робіт, скоротити трудомісткість, тривалість і вартість виконання підсилення, зменшити виробничі ризики, підвищити надійність і довговічність каркасних конструкцій, а також забезпечити більш високий рівень екологічної та організаційної сталості реконструкції.

Наукові результати можуть бути використані проєктними, науково-дослідними, експертними, будівельними та інвестиційними організаціями при розробленні нормативно-методичної бази, проєктно-кошторисної документації, інвестиційних програм, а також у підготовці бакалаврів, магістрів і докторів філософії за спеціальностями будівельного профілю.

Теоретичні та практичні положення дисертаційної роботи використані в освітньому процесі при викладанні дисциплін «Експлуатація будівель та споруд» та «Реконструкція будівель і споруд». За участю автора підготовлено методичні матеріали, які застосовуються під час проведення практичних занять і виконання курсових робіт здобувачами спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Ключові слова: каркасні будівлі, реконструкція, підсилення конструкцій, конструктивно-технологічна система (КТС), система підтримки прийняття рішень, конструктивно-технологічні рішення (КТР), організаційно-технологічні рішення (ОТР), оцінювання якості, формалізація вибору рішень, багатокритеріальний вибір, рангово-бальна оцінка, індекс порівняльної доцільності, BIM-моделювання, цифровий двійник, Lean, життєвий цикл, надійність, ефективність, сталість, мікроелементне нормування.

Abstract (in English).

Rudnieva I. M. A structural-and-technological system for quality assurance of the reinforcement of frame buildings during reconstruction. – Qualifying scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.23.08 – technology and organization of industrial and civil construction. – Kyiv National University of Construction and Architecture of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation addresses a complex science-intensive problem of developing a structural-and-technological system (STS) for quality assurance of strengthening of frame buildings during reconstruction. The proposed system is based on the principles of systemic, life-cycle, and multicriteria approaches and provides coordinated formation of structural-technological solutions (STR) and organizational-technological solutions (OTR), taking into account the technical condition of the structural frame, spatial-planning and production constraints, labor intensity, duration, cost, reliability, efficiency, and sustainability. This approach has made it possible to improve the validity of decision-making at the stages of inspection, design, alternative development, and execution of strengthening works for frame structures.

Based on the analysis of the current state of the problem, it has been established that the need for strengthening of frame buildings is a widespread phenomenon in the reconstruction practice of civil and industrial facilities, caused by physical and functional deterioration, changes in functional use, increased operational loads, updates in regulatory requirements, climatic impacts, and consequences of military actions. It has been revealed that existing approaches to the selection of STR are fragmented, do not ensure comprehensive consideration of technical, technological, organizational, economic, environmental, and social factors, and do not form an integrated decision-support system for ensuring strengthening quality.

The study defines the scientific interpretation of strengthening quality of frame buildings as an integral characteristic of STR, encompassing indicators of operational reliability (N), efficiency (R), and sustainability (A) throughout the entire life cycle of

the facility. The main principles of quality assurance within the STS have been systematized and classified. The feasibility of a life-cycle approach and multicriteria evaluation based on the N–R–A system has been substantiated. A methodological framework for the selection and evaluation of alternative STR and OTR models within a unified controlled process has been proposed.

Research has been conducted on methods and techniques for inspection of existing frame elements, and methods of instrumental control have been systematized according to functional characteristics. A multifactor system for standardizing labor and time expenditures for strengthening processes has been developed, accounting for technical, technological, organizational, ergonomic, environmental, and production factors. The methodology of integer microelement-based standardization has been further developed, and an integral correction coefficient has been proposed to adapt labor norms to actual reconstruction conditions.

The study identifies and systematizes factors affecting the technical condition of frame elements, strengthening quality, and the selection of appropriate solutions. Classifications of defects and damage in concrete, reinforced concrete, and steel structures have been developed, and their relationships with design, technological, installation, and operational causes have been established. It has been proven that defects and damage should be considered not only as local manifestations of deterioration but also as indicators of systemic deficiencies at different stages of the building life cycle. This made it possible to form a system of factors required for formalizing the selection of STR and for constructing the STS for quality assurance of strengthening.

The influence of spatial-planning parameters of existing buildings, workplace characteristics, production environment, defect types, and types of work on the formation of STR has been investigated. Formalized models of spatial-planning parameters of strengthening zones have been proposed, as well as a parametric description of working conditions enabling quantitative assessment of their impact on labor intensity, duration, safety, and quality of strengthening processes. It has been established that workplace parameters, accessibility of work zones, limitations of the

work front, and interaction with ongoing production are determining factors in selecting OTR models.

Based on theoretical, analytical, and empirical studies, a system of basic STR models for strengthening frame structures has been developed and systematized, including local strengthening, modification of structural schemes, enhancement of spatial stiffness, FRP strengthening, prestressing, and other solutions. In parallel, OTR variants have been formed, taking into account design, resource management, mechanization, digitalization, as well as quality and risk management. This ensured a systemic integration of structural and organizational components within a unified STS.

A model for standardization and modeling of technological schemes for installation of strengthening elements has been developed based on a microelement approach and hierarchical process decomposition. It has been established that these processes are stochastic multifactor systems with high variability, the optimization of which requires formalization of technological transitions, overlapping of operations, and the use of network models. An empirical database of labor costs, duration, and cost has been formed, enabling multicriteria ranking of alternative solutions.

A key scientific result is the development of the STS for quality assurance of strengthening of frame buildings, in which strengthening is considered as a controlled system with defined parameters, constraints, and target outcomes. A BIM-oriented information-analytical subsystem has been proposed as the digital core of the STS, ensuring formalized selection of STR and OTR based on efficiency, reliability, and sustainability criteria. The integration of BIM, Lean, Digital Twin, LCA, SHM, ANN, and machine learning methods for decision support has been substantiated. The human-centered approach to reconstruction using these technologies is economically and environmentally justified, while efficiency is achieved through the combination of modeling, analysis of practical experience, and alignment of stakeholder interests. The use of AHP ensures justified selection of criteria and increased reliability of decisions, while robotization acts as a tool for improving process quality by reducing hazardous and labor-intensive operations, minimizing errors, and increasing safety, ergonomics, and stability of production systems.

A modified STS incorporating BIM and Lean technologies for sustainable development has been developed. Within this modification, flows of resources, work, and information are formalized, along with simulation modeling and multicriteria quality analysis based on the N–R–A system. An operational model for optimization of STR has been proposed based on the functional relationship between groups of technological operations and the integral quality assessment of solutions, enabling a transition from a descriptive to an algorithm-based approach to decision-making and improvement.

Validation of the developed system was carried out through comparative analysis of four technological strengthening models differing in the level of organizational-technological maturity, application of Lean principles, embedded quality control, and use of fiber-reinforced polymers. It has been established that a stepwise increase in organizational-technological maturity ensures a stable growth of the integral quality of STR according to the N–R–A criteria system. The effectiveness of Lean optimization has been quantitatively confirmed: reduction in labor intensity, waiting time, rework, and excess inventory, as well as increased productivity and reduced frequency of risk events. The best results were obtained for the model combining FRP strengthening, Lean process organization, and embedded quality control.

Based on the conducted research, generalized methodological recommendations have been developed for applying the STS for improving the quality of strengthening of frame buildings as a controlled multicriteria process of coordinating STR and OTR. The methodology involves Lean optimization, multicriteria modeling, ranking of alternatives, life-cycle resource management, systematic risk control, and integration of environmental and social aspects into decision-making. This ensures improvement of design quality, reduction of labor intensity and cost, mitigation of reconstruction risks, and enhancement of reliability, durability, and sustainability of frame buildings.

The scientific novelty of the obtained results lies in the development of a science-intensive STS for quality assurance of the strengthening of frame buildings, as well as in the scientific substantiation of a multicriteria selection of effective STR and OTR at the stages of inspection, design, and implementation of reconstruction.

As a result of the conducted research, new scientific provisions and conclusions have been formulated, in particular:

firstly:

- a scientific concept of the STS for quality assurance of strengthening of frame buildings has been developed, in which the strengthening process is considered as a controlled multicriteria transformation system with defined input parameters, constraints, implementation models, and target outputs, while decision-making is performed based on an integrated system of efficiency criteria R_i , operational reliability N_i , and sustainability A_i ;
- a BIM-oriented information-analytical subsystem has been proposed and substantiated as the digital core of the STS, featuring an integrated intelligent loop for quality management and strategic decision-making, ensuring a formalized selection of STR and OTR models within a unified information environment;
- factors of imperfect application of materials have been systematized for the first time as a separate group influencing the quality of STR, enabling their formalization within the system of evaluation criteria and their consideration in multicriteria decision-making;
- a formalized mechanism for coordination of STR–OTR models has been substantiated and implemented, integrating strengthening initiation factors within a “many-to-many” decision space based on a logical relations matrix and the proposed CRIST framework, enabling the transition from descriptive decision-making to algorithm-based preselection of admissible solution combinations;
- a hierarchical model of the universal set of STR has been developed, along with a system of basic strengthening models for frame structures, structured not only by material or element type, but also by the nature of intervention in structural behavior, spatial-planning constraints, and organizational-technological implementation conditions;
- a formalized system of quality indicators for STR for strengthening frame buildings has been developed based on integration of reliability, efficiency, and

sustainability criteria, covering technical, technological, economic, environmental, and organizational aspects throughout the entire life cycle of the facility;

- a hierarchical model of the universal set of OTR has been developed in the form of a formalized system of interconnected subprocesses; OTR models are structured into two functional groups: (1) models for implementation of STR, and (2) models for management, optimization, and digital support of processes, enabling the generation and comparison of alternative strengthening scenarios depending on reconstruction conditions;

- a formalized operational model for optimization of strengthening has been proposed, establishing a functional relationship between groups of technological operations and the integral quality assessment of STR, enabling quantitative evaluation of the contribution of individual process stages to achieving the target quality level;

- a modification of the STS for quality assurance of strengthening with a Lean core has been substantiated, in which BIM and Lean technologies are treated not as auxiliary tools but as structural components influencing the formation, evaluation, and selection of STR and OTR;

- an algorithm for digitalization of decision-making on strengthening of frame buildings has been proposed, integrating 3D scanning, BIM environment, technical condition assessment, life-cycle indicators, simulation modeling, and iterative adjustment mechanisms for STR–OTR models;

- a simulation-based approach to evaluation of technological strengthening models has been substantiated and implemented through multiple runs of alternative work-organization scenarios, allowing quantitative assessment of the influence of Lean optimization, embedded quality control, and application of FRP systems on quality indicators;

- a methodology for comparative multicriteria evaluation and ranking of strengthening models has been proposed based on labor intensity, cost, spatial constraints, reliability, load-bearing capacity improvement, and sustainability, using rank-score scales and aggregation of criteria via a comparative efficiency index as an integral decision-making indicator for selecting rational STR;

- an approach has been proposed for integrating principles of sustainable development, Lean waste identification, life-cycle assessment, and digital modeling into a unified decision-support system for strengthening, forming a digitally oriented decision space for selecting STR and OTR and ensuring minimization of resource consumption, CO₂ emissions, waste, and risks throughout the life cycle.

improved:

- methodological approaches to quality assessment of strengthening of frame buildings during reconstruction through a shift from local evaluation of individual solutions to system-level multicriteria assessment of STR within the STS;

- principles for constructing research methodology of strengthening processes based on integration of system, life-cycle, multicriteria, process-based, and risk-oriented approaches;

- the system of criteria and indicators for assessing STR quality by incorporating manufacturability, spatial constraints, production risks, labor intensity, duration, cost, environmental safety, and durability;

- methodological provisions for inspection and analysis of defects and damage of frame structures through systematization of their causes, development mechanisms, and impact on load-bearing capacity, stiffness, durability, and selection of strengthening strategies;

- methods for studying and standardizing labor and time expenditures for strengthening processes based on a multifactor system considering technical, organizational, ergonomic, environmental, and production conditions;

- the microelement-based standardization model for strengthening processes through introduction of an integral correction coefficient accounting for combined factor influence, enabling adaptation of time norms to real reconstruction conditions;

- approaches to formation of OTR through their structuring into models for implementation of STR and models for management, optimization, digitalization, and quality control;

- methodological approaches to accounting for spatial-planning parameters of existing buildings, workplace characteristics, accessibility of strengthening zones, work-front density, and production constraints in selecting STR and OTR;

- approaches to selecting modern materials and systems for strengthening of building frames, taking into account not only strength characteristics but also constructability, weight, durability, maintainability, environmental footprint, and operational impact;

- methodological recommendations for practical implementation of the STS based on multicriteria coordination of STR and OTR, using AHP, BIM, Lean, life-cycle resource management, and systematic risk control.

received further development:

- theoretical provisions on reconstruction of frame buildings as a controlled process of modifying structural properties under the influence of structural, technological, organizational, economic, and environmental factors;

- scientific understanding of the role of spatial-planning parameters of existing buildings in forming the STS for restoration and strengthening of frames;

- approaches to systematization of defects, damage, and technical-condition factors of frame elements as an information basis for selecting reconstruction and strengthening strategies;

- provisions for analyzing the use of modern materials and systems, including FRP, FRCM, and TRM, within the STS for strengthening of building frames, taking into account low-carbon reconstruction and sustainability requirements;

- methodological approaches to modeling technological schemes of organization and mechanization of installation of strengthening elements based on microelement analysis, combinatorial methods, and network representation of processes;

- provisions for integration of BIM, Lean, Digital Twin, SHM, LCA, and intelligent methods (ANN, ML) into the STS for quality assurance of strengthening;

- scientific and applied foundations for developing an operational system for optimization of strengthening of frame structures according to N–R–A criteria, oriented toward decision support in reconstruction;

- approaches to validation and comparative evaluation of alternative strengthening models, enabling selection of the most appropriate solutions based on integral quality, productivity, resource efficiency, and sustainability;

– methodological foundations for transition from descriptive classification of strengthening methods to digitally supported, algorithm-based, and multicriteria selection of STR and OTR within Construction 4.0-oriented reconstruction.

The practical significance of the obtained results lies in the fact that the developed STS, methods, models, and recommendations have been brought to the stage of possible practical use in the reconstruction of civil and industrial buildings. Their application makes it possible to improve the efficiency and quality of design works, reduce labor intensity, duration, and cost of reinforcement execution, reduce production risks, increase the reliability and durability of frame structures, and also ensure a higher level of environmental and organizational sustainability of reconstruction.

The scientific results can be used by design, research, expert, construction, and investment organizations in the development of regulatory and methodological frameworks, design and estimate documentation, investment programs, as well as in the training of bachelors, masters, and Doctors of Philosophy in construction-related specialties.

Theoretical and practical provisions of the dissertation were used in the educational process while teaching the disciplines “Operation of Buildings and Structures” and “Reconstruction of Buildings and Structures.” With the participation of the author, methodological materials were prepared that are used during practical classes and course projects by students of specialty 192 “Construction and Civil Engineering.”

Keywords: frame buildings, reconstruction, structural strengthening, structural-and-technological system (STS), decision support system, structural-technological solutions (STR), organizational-technological solutions (OTR), quality assessment, decision-making formalization, multi-criteria selection, rank-based evaluation, comparative feasibility index, BIM modeling, digital twin, Lean, life cycle, reliability, efficiency, sustainability, microelement standardization.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові роботи, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті в міжнародних виданнях та ті, які рецензуються в SCOPUS та Web of Science Core Collection

1. Rudnieva I. A conceptual model for quality assessment of frame strengthening during building reconstruction. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2026, Issue 116, pp. 425-432. Kyiv: KNUBA. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2026.116.425-432> (Web of Science). Особистий внесок: розроблення концептуальної моделі оцінювання якості підсилення каркасних будівель, формалізація критеріїв для їх інтеграції у систему підтримки прийняття рішень.
2. Tonkacheiev H., Rashkivskyi V., Rudnieva I., Dubovyk I. Investigation of labour intensity and duration of the assembly processes of structural covering blocks. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2023, Issue 110, pp. 393–403. Kyiv: KNUBA. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.393-403> (Web of Science). Особистий внесок: аналіз і систематизація показників трудомісткості та тривалості монтажних процесів, узагальнення результатів дослідження.
3. Tonkacheiev H., Rudnieva I., Tonkacheiev V., Priadko I. Features of standard time formation to implement construction processes: a case study. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2022, Issue 109, pp. 141–151. Kyiv: KNUBA. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.141-151> (Web of Science Core Collection). Особистий внесок: розроблення методичних підходів до мікроелементного нормування часу будівельних процесів, формалізація їх структури, узагальнення результатів.
4. Tonkacheiev H.M., Molodid O.S., Galinskyi O.M., Plokhuta R.O., Rudnieva I.M., Priadko I.M. The technology of crack repair by polymer composition. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2022, Issue 108, pp. 203–216. Kyiv: KNUBA. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.203-216> (Web of Science Core Collection). Особистий внесок: аналіз технологічних рішень ремонту тріщин та узагальнення результатів досліджень.

5. Rudnieva I. Comparative analysis of strengthening of building structures (masonry, metal structures, reinforced concrete) using FRP-materials and traditional methods during reconstruction. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2020, Issue 105, pp. 267–291. Kyiv: KNUBA. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2020.105.267-291> (Web of Science Core Collection). Особистий внесок: порівняльний аналіз традиційних та альтернативних методів підсилення конструкцій, проведення розрахункових досліджень, оцінювання та обґрунтування ефективності цих методів.

6. Rudnieva I., Priadko I., Tonkacheiev H., Priadko N. Investigation of the effectiveness of strengthening with FRP applied in metal elements of suspension roof: an analytical approach. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2021, Issue 107, pp. 170–183. Kyiv: KNUBA. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2021.107.170-183> (Web of Science Core Collection). Особистий внесок: розроблення та чисельне моделювання розрахункових моделей, аналітичне дослідження ефективності підсилення металевих елементів із застосуванням FRP-систем, оцінювання їх впливу на показники надійності та узагальнення результатів.

7. Priadko I.N., Rudnieva I.N., Ribakov Y., Bartolo H. A new approach to the design of suspension roof systems. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2020, Issue 104, pp. 191–220. Kyiv: KNUBA. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2020.104.191-220> (Web of Science Core Collection). Особистий внесок: розроблення алгоритму оцінювання надійності висячих покриттів, формалізація підходів до визначення геометричних параметрів конструкцій та участь у створенні методики розрахунково-аналітичного оцінювання напружено-деформованого стану і показників надійності складних просторових систем.

Статті у вітчизняних фахових виданнях (всі видання індексуються в міжнародних базах даних)

8. Rudnieva I.M. Analysis of Improper Use of Materials and Strengthening Systems in Structural Rehabilitation. *Building Structures. Theory and Practice*, 2026, № 18, pp. 64-77. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.18.2026.64-77>. Особистий внесок: систематизація факторів недосконалого застосування матеріалів і систем

підсилення, їх формалізація як окремої групи впливу на якість підсилення, розроблення моделі ризиків.

9. Молодід О.С., Руднєва І.М., Богдан С.М. Експериментальне дослідження підсилення металевих конструкцій зовнішнім армуванням методом наклеювання високоміцних композитних вуглецевих матеріалів (FRP). *Дороги і мости*, 2021, вип. 24, с. 84–96. Київ: ДП «ДерждорНДІ». <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.084>. Особистий внесок: участь в експериментальних дослідженнях підсилення, аналіз результатів та кількісне оцінювання ефективності за деформативністю і несучою здатністю конструкцій.

10. Руднєва І.М. Механізми впровадження Lean-технологій, як інноваційного підходу при моделюванні структури визначення норми часу на виконання будівельних процесів. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*, 2021, № 47, с. 26–36. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2021.47\(1\).26-36](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2021.47(1).26-36). Особистий внесок: розроблення методичних підходів до впровадження Lean-технологій у нормування часу будівельних процесів, спрямованих на підвищення продуктивності.

11. Руднєва І. Технологічні особливості підсилення металевих конструкцій методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем при реконструкції. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, 2021, № 8, pp. 32–43. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.8.2021.32-43>. Особистий внесок: аналіз технологічних особливостей підсилення металевих конструкцій композитними матеріалами та обґрунтування рекомендацій щодо їх ефективного і надійного застосування.

12. Тонкачєєв Г.М., Руднєва І.М. Дослідження критеріїв підвищення експлуатаційної надійності каркасів будівель. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2021. № 47. С. 52–63. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2021.47\(1\).52-63](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2021.47(1).52-63). Особистий внесок: формування критеріїв оцінювання експлуатаційної надійності каркасів будівель з урахуванням життєвого циклу та умов реконструкції.

13. Тонкачєєв Г.М., Руднєва І.М. Особливості впливу факторів типу робочих місць на вибір підмостей для здійснення процесів підсилення будівельних конструкцій при реконструкції. *Містобудування та територіальне планування*, 2021, № 78, с. 493–507. Київ: КНУБА. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.78.493-507>. Особистий внесок: систематизація факторів робочих місць та формалізація їх впливу на вибір підмостей і формування ОТР при підсиленні конструкцій.

14. Тонкачєєв Г.М., Руднєва І.М. Дослідження факторів, що впливають на вибір підмостей для здійснення процесів підсилення будівельних конструкцій при реконструкції. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*, 2021, № 48, с. 3–12. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2021.48\(1\).3-12](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2021.48(1).3-12). Особистий внесок: дослідження та систематизація факторів, що впливають на вибір підмостей, і обґрунтування їх урахування при формуванні ОТР підсилення.

15. Руднєва І.М., Глонь І.В., Грабовська Т.О., Пузіна К.І. Збереження архітектурної спадщини України шляхом реконструкції історичних будівель, як чинник розвитку ідентичності нації. *Містобудування та територіальне планування*, 2021, № 77, с. 398-409. Київ: КНУБА. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.77.56-64>. Особистий внесок: обґрунтування ролі збереження архітектурної спадщини та її впливу на формування ефективних підходів до відновлення будівель.

16. Руднєва І.М., Прядко Ю.М., Прядко М.В., Тонкачєєв Г.М. Особливості та перспективи використання технологій підсилення будівельних конструкцій композиційними матеріалами при реконструкції споруд. *Building Structures. Theory and Practice*, 2020, No. 7, pp. 12–22. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.7.2020.12-22>. Особистий внесок: узагальнення та аналіз методів підсилення будівельних конструкцій фіброармованими системами, оцінювання їх ефективності та обґрунтування перспектив застосування при реконструкції.

17. Руднева И.Н., Прядко Ю.Н. Сравнительный анализ Еврокодов и национальных стандартов Украины, в том числе частных коэффициентов надежности и учета фактора времени, при проектировании конструкций. *Промислове будівництво та інженерні споруди*, 2020, № 1, с. 39–45. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pbis_2020_1_10. Особистий внесок: порівняльний аналіз положень Єврокодів і ДБН щодо коефіцієнтів надійності та врахування фактора часу, з обґрунтуванням їх впливу на проектування конструкцій.

18. Руднева І., Прядко Ю., Прядко М. Аналіз причин обвалення покрівель виробничих будівель *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, 2020, № 6, pp. 85–93. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.85-93>. Особистий внесок: аналіз причин обвалень покрівель виробничих будівель та обґрунтування факторів, що впливають на їх надійність при реконструкції.

19. Руднева І.М. Управління інвестиційними ризиками та енергоефективність, з урахуванням капітальних і операційних витрат, в промисловому девелопменті *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*, 2020, № 46, с. 56–64. <https://doi.org/10.32347/2707-501x.2020.46.56-64>. Особистий внесок: розроблення підходів до управління інвестиційними ризиками з урахуванням життєвого циклу об'єкта, обґрунтування впливу капітальних і експлуатаційних витрат на ефективність проектних рішень.

20. Прядко Н., Шамрина Г., Прядко Ю., Руднева И. Усиление конструкций фундаментов жилого дома. *Проблеми розвитку міського середовища*, 2014, вип. 12, с. 14–22. Особистий внесок: участь в обстеженні технічного стану конструкцій, аналіз дефектів і пошкоджень фундаментів та обґрунтування рішень їх підсилення.

21. Прядко Н., Прядко Ю., Руднева И. Рациональный угол наклона мансардного окна при реконструкции жилых домов. *Проблеми розвитку міського середовища*, 2014, вип. 12, с. 39–45. Особистий внесок: аналіз конструктивних параметрів мансардних вікон та обґрунтування їх впливу на ефективність рішень при реконструкції будівель.

22. Руднєва І.М. Методика расчета и проектирования большепролетной висячей оболочки, учитывающая эксплуатационную надежность ограждающих конструкций, выполненных из углепластиков. *Металлические конструкции*, 2006, т. 9, № 1, с. 5–17. Особистий внесок: розроблення методики розрахунку великопрольотних висячих оболонок з урахуванням експлуатаційної надійності огорожувальних конструкцій та аналіз впливу деформацій на їх надійність.

23. Прядко М.В., Прядко І.Н. (Руднєва). Опыт реконструкции крупнопанельного жилого дома в г. Макеевке. *Вісник ДонДАБА*, 2001, № 3(28), с. 21–22. Особистий внесок: обстеження та оцінка технічного стану конструкцій, аналіз дефектів і обґрунтування рішень з підсилення під час реконструкції.

24. Прядко М.В., Коровіна А.А., Прядко І.Н. (Руднєва). О результатах обследования конструкций жилого дома в г. Макеевке. *Вісник ДонДАБА*, 2001, № 3(28), с. 34. Особистий внесок: аналіз результатів обстеження та оцінка технічного стану конструкцій будівлі.

Матеріали конференцій, де здійснено апробацію роботи

25. Rudnieva I. A multicriteria framework for quality assessment of strengthening systems in structural rehabilitation. *Шістнадцята міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем – 2026»*, Чернігів, 2026, с.194-195. Особистий внесок: розроблення багатокритеріальної системи оцінювання якості підсилення будівельних конструкцій, формалізація критеріїв оцінки та обґрунтування їх впливу на надійність, сталість і ефективність рішень під час реконструкції.

26. Rudnieva I. Quality assurance of sustainable reconstruction: focusing on renovation of buildings in Ukraine from a Circular Economy and climate perspective. *International scientific and technical forum “Architecture, Construction, Design: Technology, Energy, Management – 2024”*, 2024, pp. 102–103. Особистий внесок: формування підходів до забезпечення якості реконструкції з урахуванням принципів Circular Economy, обґрунтування їх впливу на ресурсну ефективність, енергоефективність і зниження викидів.

27. Руднєва І.М. Синергія BIM та LEAN-технологій як інструментів технологічного забезпечення ощадливої реконструкції. *Міжнародний науково-технічний форум “Архітектура та Будівництво: нові тенденції і технології. Теорія та практика”*, 2022, с. 120–121. Особистий внесок: обґрунтування ефективності інтеграції BIM та Lean-технологій у процесах реконструкції.

28. Руднєва І.М. Основи впровадження Lean-технологій як інноваційного підходу при проектуванні, будівництві та реконструкції будівель і споруд. *I Міжнародна науково-практична онлайн-конференція «Актуальні проблеми, пріоритетні напрямки та стратегії розвитку України»*, 15 березня 2021 р., с. 675–677. Особистий внесок: розробка підходів до впровадження Lean-технологій у будівництві та реконструкції, обґрунтування їх впливу на ефективність організаційно-технологічних процесів і зниження втрат.

29. Руднєва І.М. Дослідження ефективності підсилення висячих металевих конструкцій наскрізного перерізу зовнішнім армуванням методом наклеювання фіброармованих систем. *III Науково-практична конференція «Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції»*, Київ, КНУБА, 22–23 квітня 2021 р., с. 35–36. Особистий внесок: аналітичне дослідження ефективності та надійності підсилення висячих металевих конструкцій FRP-системами та оцінювання його впливу на несучу здатність.

30. Руднєва І.М. Застосування лазерного сканування для моніторингу стану будівель та споруд при реконструкції. *VII International scientific and practical conference “Transfer of Innovative Technologies”*, Kyiv–Dortmund–Nur-Sultan–Jiangsu, 19–20 May 2021, pp. 19–22. Особистий внесок: дослідження застосування лазерного сканування для моніторингу технічного стану конструкцій та обґрунтування його інтеграції в BIM-середовище реконструкції.

31. Руднєва І.М. Підсилення металевих конструкцій зовнішнім армуванням методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем: аналітичний підхід. *VII International scientific and practical conference “Transfer of Innovative Technologies”*, Kyiv–Dortmund–Nur-Sultan–Jiangsu, 19–20 May 2021, pp. 5–7.

Особистий внесок: дослідження ефективності технології підсилення конструкцій FRP-системами та оцінювання впливу підсилення на їх надійність.

32. Руднєва І.М. Дослідження підсилення металевих конструкцій зовнішнім армуванням методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем. *IV міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні»*, Харків, 20–21 травня 2021 р., с. 291–293. Особистий внесок: дослідження ефективності технологій підсилення металевих конструкцій FRP-системами.

33. Руднєва І.М. Досвід Італії в збереженні архітектурної, культурної та екологічної спадщини як факторів, що впливають на рівень економіки держави. *Conference “EU Principled Pragmatism – Consequences for the Eastern and South-Eastern Europe: political, economic, legal and communication aspects”*, 21–22 May 2021, Kyiv, pp. 60–62. Особистий внесок: аналіз міжнародного досвіду збереження спадщини та його впливу на ефективність підходів до реконструкції.

34. Молодід О.С., Руднєва І.М., Мусіяка І.В., Богдан С.М. Експериментальне дослідження підсилення металевих конструкцій зовнішнім армуванням методом наклеювання високоміцних композитних матеріалів (FRP). *I Міжнародна науково-практична конференція ім. П.М. Коваля «Актуальні питання мостового господарства та шляхи його покращення»*, Запоріжжя, 15–17.09.2021 р., с. 85–88. Особистий внесок: аналіз результатів та кількісне оцінювання ефективності за деформативністю і несучою здатністю конструкцій.

35. Руднєва І.М. BIM як основний інструмент впровадження Lean-технологій під час будівництва або реконструкції. *Міжнародний науково-технічний форум “Архітектура та Будівництво: нові тенденції і технології. Теорія та практика”*, 26 жовтня 2021 р., с. 315–316. Особистий внесок: обґрунтування застосування BIM як ключового інструменту впровадження Lean-підходів та підвищення ефективності технологічних процесів у реконструкції.

36. Rudnieva I. Technology of building structures strengthening by composite materials during the reconstruction. *International Scientific-Practical Conference of Young Scientists “Build-Master-Class-2020”*, Kyiv, November 2020, pp. 134–135.

Особистий внесок: дослідження традиційних і FRP-технологій підсилення конструкцій, їх порівняльний аналіз та оцінювання ефективності.

37. Руднєва І.М., Носач А. Професійні комунікації та впровадження BIM-модельовання як основні інструменти підвищення компетенцій студентів-архітекторів. *Всеукраїнська наукова конференція «Сучасна архітектурна освіта»*, КНУБА, 25 листопада 2021, р. 137-139. Особистий внесок: аналіз ролі BIM та професійних комунікацій у формуванні компетенцій фахівців.

38. Rudnieva I.N. Influence of temperature effects on the stress-strain state of suspension system formed by the systems of the bending-rigid threads. *International Scientific and Practical Conference of Young Scientists "Build-Master-Class-2016"*, Kyiv, 16–18 November 2016, p. 146. Особистий внесок: дослідження впливу температурних факторів на НДС та обґрунтування їх урахування.

39. Rudnieva I. Analyze of the methods of strengthening of buildings and structures, such as traditional methods and alternative methods using FRP materials. *International seminar «Economics of the cultural heritage, tourism and modern fortifications in EU»*, Venice (Italy), 2016, p. 248. Особистий внесок: порівняльний аналіз методів підсилення будівельних конструкцій.

40. Руднева И.Н., Прядко Н.В., Шамрина Г.В., Прядко Ю.Н. Обследование и усиление конструкций фундаментов жилого дома в г. Макеевка. *Материалы Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы механики в современном строительстве»*, Пенза, 2013, с. 133–141. Особистий внесок: обстеження та оцінювання технічного стану фундаментів, аналіз дефектів і пошкоджень та обґрунтування рішень з їх підсилення.

41. Horokhov Y., Muschanov V., Rudnieva I., Sivokon Y. Analysis and design of suspended roof shells with large openings. 9th International Conference "Modern Building Materials, Structure and Techniques". Vilnius, Lithuania, 2007. P. 584–594. Особистий внесок: дослідження напружено-деформованого стану та експериментальна перевірка роботи великопрольотних висячих оболонок, розробка рекомендацій щодо їх проєктування та монтажу.

42. Горохов Є.В., Мушчанов В.П., Касимов В.Р., Руднєва І.М., Сивоконь Ю.В. Теоретическое и экспериментальное исследование стационарных висячих покрытий над трибунами реконструируемых стадионов. *Материалы международной конференции «РЕКОНСТРУКЦИЯ-2005»*, Санкт-Петербург, 2005, с. 15–19. Особистий внесок: дослідження НДС покриттів та оцінювання їх роботи за результатами теоретичних і експериментальних досліджень.

43. Прядко И.Н. (Руднєва), Мушчанов В.Ф. Влияние последовательности монтажа на изменение напряженно-деформированного состояния пространственных покрытий, образованных жесткими нитями. *Конференція молодих учених КНУБА*, Київ, 2002, стендова доповідь. Особистий внесок: дослідження впливу технології монтажу на просторову роботу конструкцій.

Міжнародні науково-дослідні проєкти (за фінансування Європейського Союзу)

44. Weber B., Rudnieva I. Common Assessment Study for the Preparedness and Needs for Innovations in Construction Industry in Danube Area. *Міжнародний проєкт Circular DigiBuild, програма Interreg Danube Region Programme (фінансування Європейського Союзу)*, 2024, 77 р. Особистий внесок: проведення аналітичного дослідження рівня готовності будівельної галузі до інновацій у Дунайському регіоні, узагальнення результатів та формування висновків.

45. Vašak M.; Contributors: Rudnieva I., et al. Disruptive Technologies, Circular Economy and the Building Industry in the Danube Area. *Міжнародний проєкт Circular DigiBuild, програма Interreg Danube Region Programme (фінансування Європейського Союзу)*, 2025, 184 р. Особистий внесок: аналіз сучасних підходів цифрових та циркулярних технологій в Німеччині та оцінювання їх впливу на розвиток будівельної галузі.

Додаткові публікації

46. Priadko I.N., Mushchanov V.P., Bartolo H., Rudnieva I.N., Vatin N.I. Improved numerical methods in reliability analysis of suspension roof joints. *Magazine of Civil Engineering*, 2016, No. 5, pp. 27–41. (Web of Science, Scopus Q3)

<https://doi.org/10.5862/MCE.65.3>. Особистий внесок: дослідження та оцінювання впливу конструктивних параметрів вузлів висячих покриттів на їх надійність.

47. Руднева І. М. Вплив податливості опор на напружено-деформований стан висячої системи, утвореної системою згинально-жорстких ниток. Матеріали конф. молодих учених, аспірантів і студентів КНУБА, 17 листоп. 2014 р., Київ. Київ : КНУБА, 2014. С. 117.

48. Мущанов В. П., Руднева І. М. Определение траектории разрушения элементов покрытия, образованного жесткими нитями сквозного сечения. Вісник ДонНАБА. 2012. № 3 (95). С. 3–6.

49. Мущанов В. П., Руднева І. М. Напряженно-деформированное состояние висячей системы, образованной системой изгибно-жестких нитей, при учете податливости опор. Металлические конструкции. 2012. Т. 18, № 1. С. 5–16.

50. Мущанов В. П., Руднева І. М. Влияние температурных воздействий на напряженно-деформированное состояние висячей системы, образованной системой изгибно-жестких нитей. Сучасне промислове та цивільне будівництво. 2012. Т. 8, № 1. С. 5–13.

51. Мущанов В.П., Руднева І.М. Чувствительность конструктивной схемы висячего покрытия к осадкам основания. Вісник ДонНАБА. 2011. № 6(92). С. 106–116.

52. Горохов Є.В., Мущанов В.П., Касимов В.Р., Сивоконь Ю.В., Руднева І.М. Теоретическое и экспериментальное исследование конструктивных форм большепролетных покрытий над трибунами стадионов. Збірник наукових праць УкрНДПроектстальконструкція ім. В.М. Шимановського. 2010. Вип. 6. С. 5–20.

53. Горохов Є.В., Мущанов В.П., Руднева І.Н. Behavior features of translucent carbon fiber-reinforced plastic panels in structure of suspended rod shell. Proceedings of X International Colloquium of IASS Polish Chapter «Lightweight Structures in Civil Engineering». Warsaw, 2005. P. 247–254.

54. Мущанов В.П., Руднева І.М., Прядко Ю.М. Экспериментальное исследование блока висячих ферм при действии неравновесных нагрузок. Металлические конструкции. 2005. Т. 8, № 1. С. 35–42.

55. Мушанов В.П., Руднева И.М., Прядко Ю.М. Экспериментальное исследование блока висячих ферм пространственной стержневой оболочки. Современные строительные конструкции из металла и древесины. Одесса: ОГАСА, 2005. Ч. 1. С. 138–144.

56. Мушанов В.П., Руднева И.М. Экспериментальные исследования величин и характера снеговых нагрузок на покрытия с ограждающей конструкцией из ячеистого поликарбонатного пластика. Вісник ДонНАБА. 2005. № 3(51). С.66–71.

57. Горохов Є.В., Мушанов В.П., Касимов В.Р., Сивоконь Ю.В., Руднева И.Н. К расчету и проектированию пространственных конструкций стационарных покрытий над трибунами стадионов. Материалы VIII Украинской научно-технической конференции «Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее». Киев, 2004. С. 323–332.

58. Мушанов В.Ф., Руднева И.М., Прядко Ю.М. Экспериментальное исследование блока висячих ферм пространственной стержневой оболочки. Металлические конструкции. 2004. Т. 7, № 1. С. 55–59.

59. Мушанов В.П., Прядко И.Н. (Руднева). Теоретическое исследование закономерностей работы висячей стержневой оболочки с вырезом на эллиптическом плане. Вісник ДонДАБА. 2003. № 3(40). С. 49–51.

60. Мушанов В.П., Прядко И.Н. (Руднева). Уточнение прочностных и деформативных качеств современного светопрозрачного поликарбонатного пластика «Danpolon». Вісник ДонДАБА. 2003. № 2(39). С. 96–100.

61. Прядко И.Н. (Руднева), Пономарева С.В., Мушанов В.П. Сравнительный анализ методик расчета покрытия из жестких нитей с ограждающими конструкциями Danpolon. Вісник ДонДАБА. 2001. № 3(28). С. 28.

62. Прядко М.В., Прядко И.Н. (Руднева). Усиление перекрытия при переоборудовании квартир. Вісник ДонДАБА. 2000. № 4(24). С. 22.

63. Депутатова Л.В., Прядко И.Н. (Руднева). Виды пола (междуэтажных перекрытий), используемые в промышленном и гражданском строительстве. Вісник ДонДАБА. 1999. № 4(18). С. 14.

Навчально-методичні праці

64. Тонкачєєв Г. М., Хохрякова Д. О., Руднєва І. М., Шандра О. Г. Проєктування технології підсилення рам каркасних будівель : метод. вказівки. Київ : КНУБА, 2023. 36 с.

65. Іваненко П. О., Григор'єва Л. О., Жупаненко І. В., Корбаков О. Ф., Кошевий О. П., Левківський Д. В., Руднєва І. М., Тробюк О. М., Сович Ю. В., Янсонс М. О. Збірник задач з опору матеріалів : навч. посіб. / за ред. П. О. Іваненка. Київ : Ліра-К, 2021. 400 с.

66. Прядко М. В., Руднєва І. М., Прядко Ю. М. Обстеження та підсилення будівельних конструкцій промислових будівель : навч. посіб. Київ : КНУБА, 2018. 334 с.

67. Денісов Є. В., Руднєва І. М. Основи теорії споруд. Ч. 2 : конспект лекцій. Макіївка : ДонНАБА, 2013. 57 с.

68. Денісов Є. В., Руднєва І. М. Основи теорії споруд. Ч. 1 : конспект лекцій. Макіївка : ДонНАБА, 2013. 52 с.

69. Мущанов В. П., Касимов В. Р., Руднєва І. М. Основні положення розрахунку будівельних конструкцій методом граничних станів : конспект лекцій. Макіївка : ДонНАБА, 2012. 35 с.

70. Прядко М. В., Руднєва І. М., Прядко Ю. М. Обследование и усиление конструкций промышленных зданий : учеб. пособие. Донецк : Норд-Пресс, 2010. 268 с. ISBN 978-966-380-319-7.

71. Мущанов В. П., Жук М. Р., Руднєва І. М. Розрахунок статично невизначеної ферми : метод. вказівки. Макіївка : ДонНАБА, 2010. 7 с.

72. Мущанов В. П., Касимов В. Р., Руднєва І. М. Основні положення розрахунку будівельних конструкцій методом граничних станів : навч. посіб. Макіївка : ДонНАБА, 2009. 44 с.

73. Мущанов В. П., Жук М. Р., Руднєва І. М. Розрахунок плоскої статично невизначеної рами методом переміщень : метод. вказівки. Макіївка : ДонНАБА, 2007. 10 с.

Авторські свідоцтва, дипломи, патенти.

74. Патент України № 149077 У. Спосіб підсилення висячих металевих конструкцій наскрізного перерізу методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем. Опубл. 13.10.2021, Бюл. № 41.

75. Патент України № 149335 У. Спосіб підсилення металевих конструкцій методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем. Опубл. 10.11.2021, Бюл. № 45.

76. Патент України № 151802 У. Спосіб ремонту та захисту залізобетонних конструкцій з тріщинами герметизуючим розчином шляхом вакуумізації тріщин. Опубл. 14.09.2022, Бюл. № 37.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЇ. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА.....	2
ЗМІСТ.....	35
Експлікація понять (перелік умовних позначень і скорочень).....	39
ВСТУП.....	40
1. НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ПІДСИЛЕННЯ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД	52
1.1. Сучасний стан та передумови вдосконалення конструктивно- технологічних систем відновлення каркасних будівель і споруд	52
1.2. Вплив геометричних та планувальних параметрів існуючих будівель на формування конструктивно-технологічних систем відновлення.....	59
1.3. Аналіз досвіду використання сучасних матеріалів і виробів в конструктивно-технологічних системах підсилення каркасів будівель.....	77
1.4. Аналіз методів і процесів підсилення каркасів будівель.....	116
1.5. Проблеми, цілі і завдання дослідження.....	119
Висновки по першому розділу.....	123
2. МЕТОДОЛОГІЯ ТА ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПІДСИЛЕННЯ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ.....	126
2.1.Методологія забезпечення якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції	126
2.2. Загальні принципи побудови методики дослідження.....	136
2.3. Відбір критеріїв оцінювання якості конструктивно-технологічних рішень підсилення каркасних будівель.....	142
2.4. Етапи дослідження та очікувані результати.....	177
Висновки по другому розділу.....	185
3. МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА НОРМУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПІДСИЛЕННЯ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ.....	188

3.1 Методи і техніка обстеження елементів існуючого каркасу будівлі.....	188
3.2. Методика дослідження норм витрат праці і часу на процеси підсилення.....	210
3.3. Створення нормативної бази норм витрат праці процесів підсилення конструкцій каркасних будівель.....	216
Висновки по третьому розділу.....	223
4. ВИЯВЛЕННЯ ТА ВІДБІР ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ПІДСИЛЕННЯ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД.....	225
4.1. Види дефектів і причини їх виникнення.....	225
4.2. Аналіз і класифікація пошкоджень будівельних конструкцій	232
4.3. Випадки недосконалого застосування матеріалів і виробів для підсилення конструкцій.....	246
4.4 Ефективність підсилення конструкцій гнучкими високоміцними матеріалами.....	252
4.5. Систематизація факторів, що впливають на технічний стан елементів каркасу будівлі.....	270
4.6. Відбір факторів, що впливають на формування конструктивно- технологічної системи забезпечення якості підсилення каркасних будівель.....	279
Висновки по четвертому розділу.....	295
5. ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ФОРМУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПІДСИЛЕННЯ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ	298
5.1. Організація процесів обстеження, проєктування та виконання робіт по підсиленню каркасних будівель.....	298
5.2. Дослідження зовнішніх та внутрішніх просторово-планувальних параметрів каркасних будівель	316
5.3. Виявлення впливу параметрів робочих місць виконавців процесу на якість підсилення конструкцій каркасних будівель	329

5.4. Формування та систематизація моделей конструктивно-технологічних рішень підсилення каркасних конструкцій як основи подальших досліджень....	343
Висновки по п'ятому розділу.....	352
6. ДОСЛІДЖЕННЯ ТРУДОМІСТКОСТІ ПРОЦЕСІВ ПІДСИЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ.....	355
6.1 Моделювання технологічних схем організації та механізації процесів монтажу елементів підсилення конструкцій каркасів.....	355
6.2 Дослідження трудомісткості та тривалості монтажу елементів підсилення конструкцій каркасів.....	366
6.3 Дослідження витрат монтажу елементів підсилення конструкцій каркасів....	381
6.4 Синергія сучасних технологій, як інструмент підвищення ефективності організаційно-технологічного забезпечення реконструкції.....	394
6.5 Систематизація та формалізація вибору конструктивно-технологічних рішень підсилення каркасних будівель за критеріями якості	414
Висновки по шостому розділу.....	427
7. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПІДСИЛЕННЯ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ	431
7.1. Загальні положення конструктивно-технологічної системи.....	431
7.2. Модифікація конструктивно-технологічної системи забезпечення якості підсилення каркасних будівель з застосуванням BIM та Lean-технологій для досягнення сталого розвитку.....	448
7.3. Формування та оптимізація організаційно-технологічних рішень з урахуванням принципів сталого розвитку.....	452
7.4. Результати апробації системи підвищення якості підсилення каркасних будівель.....	457
7.5. Рекомендації по застосуванню конструктивно-технологічної системи забезпечення якості підсилення каркасних будівель	474

Висновки по сьомому розділу.....	477
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	481
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	486
ДОДАТОК А. Матриці норм витрат праці для різних моделей конструктивно-технологічних рішень	515
ДОДАТОК Б. Довідки про впровадження.....	544
ДОДАТОК В. Список публікацій здобувача	546

Експлікація понять (перелік умовних позначень і скорочень)

КТС – конструктивно-технологічна система

КТР – конструктивно-технологічне рішення

ОТР – організаційно-технологічне рішення

МТР – модель технологічних рішень

МКТ – модель конструктивно-технологічного рішення

МОТ – модель організаційно-технологічного рішення

BIM – Building Information Modeling (інформаційне моделювання будівництва)

Lean – концепція ощадливого виробництва

Digital Twin – цифровий двійник

IOP – інтелектуальне обладнання та роботизовані системи

AHP – Analytic Hierarchy Process

LCA – Life Cycle Assessment (оцінка життєвого циклу)

SHM – Structural Health Monitoring (моніторинг технічного стану конструкцій)

ANN – Artificial Neural Networks (штучні нейронні мережі)

ML – Machine Learning (машинне навчання)

FRP – Fiber Reinforced Polymer (фіброармовані полімери)

FRCM – Fiber Reinforced Cementitious Matrix

TRM – Textile Reinforced Mortar

QFD – Quality Function Deployment

CRIST – Комплекс Рішень Ініціації, Стратегії та Технологій

TS – технологічна схема

W_r – робоча операція

TRP – технологічний процес реконструкції (рівні декомпозиції)

TTP – техніко-технологічні параметри процесів

SPOF – соціально-психологічні та організаційні фактори

EF – фактори зовнішнього середовища

PSW – фізіологічний стан працівника

WRL – відходи, ризики та втрати

QA/QC – забезпечення та контроль якості

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні умови експлуатації будівель і споруд, зокрема фізичний і моральний знос конструкцій, зміна функціонального призначення об'єктів, підвищення експлуатаційних навантажень, оновлення нормативних вимог, вплив кліматичних чинників та наслідки бойових дій, зумовлюють необхідність реконструкції та підсилення каркасних будівель. Особливо це стосується промислових і цивільних об'єктів, які становлять значну частину існуючого будівельного фонду України.

Підсилення каркасних конструкцій є невід'ємною складовою реконструкції, оскільки забезпечує відновлення або підвищення несучої здатності, жорсткості, довговічності та експлуатаційної придатності будівель. Разом з тим процес підсилення пов'язаний не лише з вибором окремих технічних рішень, а й з урахуванням просторово-планувальних обмежень, умов виконання робіт, трудомісткості, вартості, ризиків, екологічних та організаційних факторів.

Нормативна та методична база України, положення ДСТУ, ДБН, ISO та європейських регламентів встановлюють високі вимоги до якості, безпеки й довговічності будівельної продукції та процесів. Проте в практиці реконструкції каркасних будівель підходи до вибору рішень підсилення переважно залишаються фрагментарними. Більшість відомих рішень орієнтована на окремі типи елементів або локальні випадки пошкоджень і не забезпечує комплексного врахування технічного стану каркасу, просторово-планувальних параметрів, умов виконання робіт, ризиків, ресурсних обмежень, вимог життєвого циклу та принципів сталого розвитку. Недостатньо дослідженими залишаються питання багатокритеріального оцінювання якості рішень, нормування витрат праці, формалізації вибору конструктивно-технологічних і організаційно-технологічних моделей, а також інтеграції сучасних цифрових інструментів у процес прийняття рішень.

Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах воєнного стану та повоєнного відновлення, коли зростає потреба у швидкому, безпечному та економічно обґрунтованому відновленні пошкоджених будівель. У зв'язку з цим

виникає необхідність розроблення конструктивно-технологічної системи (КТС) забезпечення якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції, яка б поєднувала оцінку технічного стану, багатокритеріальний вибір рішень, моделювання технологічних процесів та інтеграцію сучасних цифрових підходів. У контексті цього **наукова гіпотеза** дослідження базується на припущенні, що розробка єдиної КТС підсилення каркасних будівель, яка ґрунтується на комплексному аналізі технічних, економічних, екологічних і соціальних факторів, дозволить підвищити експлуатаційну надійність конструкцій та ефективність процесів реконструкції. Інтеграція сучасних цифрових підходів, принципів ощадливої організації процесів та ресурсоефективного управління життєвим циклом будівель, що відповідають засадам сталого розвитку, сприятиме оптимізації вибору КТР, зниженню витрат і негативного впливу на довкілля, а також забезпечить довговічність і безпечність будівель.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у межах науково-дослідних робіт, що здійснюються за участі автора на кафедрі будівельних технологій Київського національного університету будівництва і архітектури, а саме: «Технологічні основи виконання будівельних робіт та процесів будівельного виробництва» (ДР № 0119U000544), «Вдосконалення теоретичних основ варіантного проектування технологій будівництва та реконструкції об'єктів промислового та цивільного призначення» (ДР № 0125U002046), «Система аналітичного визначення стандартів часу на виконання будівельних процесів» (ДР № 0225U002391).

Тематика роботи відповідає: Закону України «Про комплексну реконструкцію кварталів (мікрорайонів) застарілого житлового фонду» від 22.12.2006 р. № 525-V; Закону України «Про інноваційну діяльність» від 04.07.2002 р. № 40-IV; розпорядженню КМУ «Про схвалення Концепції Містобудівного кодексу України» від 18.07.2007 р. № 536-р; розпорядженню КМУ «Про схвалення Стратегії розвитку сфери інноваційної діяльності на період до 2030 року» від 10.07.2019 р. № 526-р.

Мета і завдання дослідження. *Мета* дисертаційної роботи полягає у науково обґрунтованій КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції, що базується на інтеграції сучасних цифрових технологій, принципів ощадливої організації процесів, екологічно сталих рішень, методів багатокритеріального прийняття рішень та багатфакторної оптимізації технологічних процесів.

Для реалізації зазначеної мети, необхідно виконати такі *завдання*:

- проаналізувати сучасний стан проблеми підсилення каркасних будівель під час реконструкції, узагальнити та систематизувати причини дефектів і пошкоджень несучих конструкцій, а також існуючі методи і технології їх підсилення з урахуванням умов експлуатації та факторів внутрішнього і зовнішнього середовища;
- розробити та обґрунтувати методологічні основи формування КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель, визначити її структуру, склад підсистем та взаємозв'язки між конструктивно-технологічними (КТР) і організаційно-технологічними (ОТР) рішеннями;
- розробити алгоритм формування та моделювання КТР і ОТР підсилення на основі багатокритеріального підходу з урахуванням критеріїв надійності, ефективності та сталості, а також інтеграції сучасних цифрових технологій (BIM), принципів ощадливого управління процесами та сталого розвитку;
- систематизувати та розробити комплексний підхід до формування технологічних рішень підсилення каркасних будівель, що враховує технічний стан конструкцій, просторово-планувальні параметри об'єкта, ресурсні та виробничі обмеження, екологічні, економічні та соціально-культурні аспекти реконструкції;
- розробити методичні рекомендації щодо практичного застосування КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель, орієнтовані на використання принципів ощадливої організації процесів, цифрового моделювання процесів, оптимізацію управління ресурсами, оцінювання ризиків та підтримку прийняття інженерних рішень;

– виконати апробацію запропонованої методології підсилення каркасних конструкцій на реальних об'єктах реконструкції, провести порівняльне оцінювання ефективності традиційних і інноваційних технологічних рішень, зокрема із застосуванням FRP-матеріалів, принципів ощадливої організації процесів та цифрових інструментів управління реконструкцією.

Об'єкт дослідження – процес підсилення каркасних будівель під час реконструкції.

Предмет дослідження – формування науково обґрунтованої КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель, що базується на багатокритеріальному виборі КТР і ОТР з урахуванням просторових параметрів, умов реалізації реконструкції та критеріїв надійності, ефективності і сталості протягом життєвого циклу будівель.

Методи дослідження. Для обґрунтування актуальності, формування мети та завдань дослідження, аналізу й узагальнення науково-технічної літератури використано методи системно-структурного аналізу і синтезу, узагальнення, класифікації та порівняльного аналізу. При систематизації дефектів і пошкоджень каркасних конструкцій, а також чинників, що впливають на процеси їх підсилення, застосовано методи системного підходу, абстрагування, формалізації та експертних оцінок. Під час дослідження процесів формування КТР і ОТР використано методи структурної декомпозиції будівельних процесів, багатокритеріального аналізу та алгоритмізації прийняття інженерних рішень. Для дослідження технологічних процесів підсилення застосовано методи комбінаторного аналізу технологічних переходів, мережевого подання процесів і ієрархічної декомпозиції будівельних операцій. Під час визначення трудомісткості та тривалості процесів підсилення використано методи натурних хронометражних спостережень, мікроелементного нормування та статистичного аналізу експериментальних даних. Для оцінювання ефективності альтернативних КТР застосовано методи техніко-економічного, функціонально-вартісного та порівняльного аналізу, а також багатокритеріального ранжування рішень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у формуванні наукоємної КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель та у науковому обґрунтуванні багатокритеріального вибору ефективних КТР і ОТР на стадіях обстеження, проектування та реалізації реконструкції.

У результаті проведеного дослідження сформульовано нові наукові положення й висновки, зокрема:

вперше:

- сформульовано наукову концепцію КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель, у якій процес підсилення розглядається як керована багатокритеріальна система перетворень із визначеними вхідними параметрами, обмеженнями, моделями реалізації та цільовими результатами, а вибір рішень здійснюється за інтегрованою системою критеріїв ефективності R_i , експлуатаційної надійності N_i та сталості A_i ;

- запропоновано та обґрунтовано ВІМ-орієнтовану інформаційно-аналітичну підсистему як цифрове ядро КТС з інтегрованим інтелектуальним контуром управління якістю та стратегічного прийняття рішень, що забезпечує формалізований вибір моделей КТР і ОТР у межах єдиного інформаційного середовища;

- вперше систематизовано фактори недосконалого застосування матеріалів як окрему групу впливу на якість КТР, що дозволило формалізувати їх у складі критеріїв оцінювання та врахувати при багатокритеріальному виборі рішень.

- обґрунтовано та запроваджено формалізований механізм узгодження моделей $M_{KT}-M_{OT}$ з інтеграцією факторів ініціювання підсилення у просторі рішень «багато-до-багатьох» на основі логічної матриці відношень і запропонованого комплексу CRIST, що забезпечує перехід від описового вибору рішень до алгоритмізованого попереднього відбору допустимих комбінацій;

- сформовано ієрархічну модель універсальної множини КТР та систему базових моделей підсилення каркасних конструкцій $M_{KT0}-M_{KT12}$, які структуровано не лише за видом матеріалу чи типом елемента, а за характером

втручання в роботу каркасу, просторово-планувальними обмеженнями та умовами організаційно-технологічної реалізації;

- сформовано формалізовану систему показників якості КТР підсилення каркасних будівель на основі інтеграції критеріїв надійності, ефективності та сталості, що охоплює технічні, технологічні, економічні, екологічні та організаційні аспекти протягом життєвого циклу об'єкта;

- сформовано ієрархічну модель універсальної множини організаційно-технологічних рішень (ОТР) підсилення каркасних будівель, представлену у вигляді формалізованої системи взаємопов'язаних підпроцесів ОТР; моделі ОТР структуровано у дві функціональні групи — моделі реалізації КТР та моделі управління, оптимізації й цифрової підтримки процесів, що забезпечує генерування та порівняння альтернативних сценаріїв підсилення залежно від умов реконструкції;

- запропоновано формалізовану операційну модель оптимізації підсилення, у межах якої встановлено функціональний зв'язок між групами технологічних операцій та інтегральною оцінкою якості КТР, що дало змогу кількісно оцінювати внесок окремих етапів процесу в досягнення цільового рівня якості;

- обґрунтовано модифікацію КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель із Lean-ядром, у межах якої BIM і Lean-технології розглядаються не як допоміжні інструменти, а як структурні компоненти системи, що впливають на формування, оцінювання та вибір КТР і ОТР;

- запропоновано алгоритм цифровізації прийняття рішень щодо підсилення каркасних будівель, який поєднує 3D-сканування, BIM-середовище, оцінку технічного стану, життєво-циклові показники, імітаційне моделювання, а також механізми ітераційного коригування моделей M_{KT} – M_{OT} ;

- обґрунтовано і реалізовано імітаційний підхід до оцінювання технологічних моделей підсилення на основі серії прогонів альтернативних сценаріїв організації робіт, що дозволило кількісно визначити вплив Lean-оптимізації, вбудованого контролю якості та застосування FRP-систем на показники якості;

– запропоновано методику порівняльного багатокритеріального оцінювання та ранжування моделей підсилення за показниками трудомісткості, вартості, просторових обмежень, тривалості експлуатації, рівня підвищення несучої здатності та сталості. Оцінювання здійснюється на основі рангово-бальних шкал і агрегування критеріїв із використанням індексу порівняльної доцільності як інтегрального показника вибору раціональних КТР;

– запропоновано підхід до інтеграції принципів сталого розвитку, принципів ощадливої організації процесів, життєво-циклового аналізу та цифрового моделювання в єдину систему підтримки прийняття рішень щодо підсилення будівель, що формує цифрово-орієнтований простір вибору конструктивно-технологічних рішень і забезпечує мінімізацію ресурсних витрат, викидів CO₂, відходів і ризиків протягом життєвого циклу об'єкта.

удосконалено:

– методологічні підходи до оцінювання якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції шляхом переходу від локального аналізу окремих технічних рішень до системного багатокритеріального оцінювання КТР у межах КТС;

– принципи побудови методики дослідження процесів підсилення каркасних будівель на основі поєднання системного, життєво-циклового, багатокритеріального, процесного та ризик-орієнтованого підходів;

– систему критеріїв і показників оцінювання якості КТР шляхом включення до неї показників технологічності, просторово-планувальних обмежень, ризиків виробничого середовища, трудомісткості, тривалості, собівартості, екологічної безпеки та довговічності;

– методичні положення щодо обстеження, аналізу дефектів і пошкоджень каркасних конструкцій шляхом систематизації їх причин, механізмів розвитку та впливу на несучу здатність, жорсткість, довговічність і вибір стратегій підсилення;

– методику дослідження та нормування витрат праці і часу на процеси підсилення каркасних конструкцій на основі багатофакторної системи чинників,

які враховують техніко-технологічні, організаційні, ергономічні, середовищні та виробничі умови виконання робіт;

- модель мікроелементного нормування процесів підсилення за рахунок введення інтегрального коригувального коефіцієнта комбінованого впливу факторів, що дозволяє адаптувати норми часу до реальних умов реконструкції;

- підходи до формування організаційно-технологічних рішень щодо підсилення каркасних будівель шляхом їх поділу на моделі реалізації КТР і моделі управління, оптимізації, цифровізації та контролю якості;

- методичні підходи до врахування просторово-планувальних параметрів існуючих будівель, параметрів робочих місць, доступності зон підсилення, насиченості фронту робіт та виробничих обмежень у процесі вибору КТР і МОТ;

- підходи до вибору сучасних матеріалів і виробів для підсилення каркасів будівель шляхом врахування не лише їх міцнісних характеристик, а й технологічної реалізованості, маси, довговічності, ремонтпридатності, екологічного сліду та впливу на подальшу експлуатацію;

- методичні рекомендації щодо практичного застосування КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель на основі багатокритеріального узгодження КТР і ОТР, використання АНР, ВІМ, принципів ощадливого управління процесами, життєво-циклового управління ресурсами та системного контролю ризиків.

дістали подальшого розвитку:

- теоретичні положення щодо реконструкції каркасних будівель як керованого процесу зміни властивостей несучого каркасу під впливом конструктивних, технологічних, організаційних, економічних та екологічних факторів;

- наукові уявлення про роль просторово-планувальних параметрів існуючих будівель у формуванні КТС відновлення та підсилення каркасів;

- підходи до систематизації дефектів, пошкоджень і факторів технічного стану елементів каркасу будівлі як інформаційної основи для вибору стратегій реконструкції та підсилення;

- положення щодо аналізу досвіду використання сучасних матеріалів і виробів, зокрема FRP-систем, у КТС підсилення каркасів будівель з урахуванням вимог низьковуглецевої реконструкції та сталого розвитку;
- методичні підходи до моделювання технологічних схем організації та механізації монтажу елементів підсилення на основі мікроелементного підходу, комбінаторного аналізу та мережевого подання процесів;
- положення щодо інтеграції BIM, Lean, Digital Twin, SHM, LCA та інтелектуальних методів (ANN, ML) у систему забезпечення якості підсилення каркасних будівель;
- науково-прикладні засади формування операційної системи оптимізації підсилення каркасних конструкцій за критеріями N–R–A, орієнтованої на підтримку прийняття рішень у середовищі реконструкції;
- підходи до апробації та порівняльного оцінювання альтернативних моделей підсилення каркасних будівель, що дозволяють визначати найдоцільніші рішення за інтегральною якістю, продуктивністю, ресурсною ефективністю та рівнем сталості;
- методичні засади переходу від описової класифікації способів підсилення до цифрово підтримуваного, алгоритмізованого та багатокритеріального вибору рішень у межах Construction 4.0-орієнтованої реконструкції.

Практичне значення одержаних результатів полягає у доведенні розробленої КТС, методик і моделей до рівня, придатного для практичного використання при реконструкції цивільних і промислових будівель. Запропоновані науково-методичні положення можуть бути застосовані як основа для обґрунтованого вибору та узгодження конструктивно- і організаційно-технологічних рішень підсилення в умовах реконструкції. Їх використання сприяє підвищенню обґрунтованості проєктних рішень, зниженню трудомісткості, тривалості та вартості робіт, зменшенню виробничих ризиків, а також підвищенню надійності, довговічності та сталості підсилених конструкцій.

Результати дослідження можуть бути використані проєктними, науково-дослідними, експертними та будівельними організаціями при розробленні проєктно-кошторисної документації, нормативно-методичних матеріалів і інвестиційних програм, а також у підготовці фахівців будівельного профілю. Запропоновані підходи формують науково-методичну основу для подальшого створення спеціалізованих інформаційно-аналітичних систем підтримки прийняття рішень у сфері реконструкції будівель, за умови їх окремого алгоритмічного та програмного опрацювання.

Теоретичні та практичні положення дисертаційної роботи використовувались в освітньому процесі під час проведення лекційних і науково-методичних занять, зокрема в межах міжнародної науково-освітньої діяльності в університетах Німеччини, Китайської Народної Республіки та Словенії, що сприяло їх апробації в міжнародному академічному середовищі. За участю автора підготовлено навчально-методичні матеріали, які застосовуються під час проведення практичних занять і виконання курсових робіт здобувачами спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Результати дослідження апробовано при виконанні науково-дослідних і проєктних робіт, зокрема у ТОВ «Укргіпротранс», де автором були виконані дослідження з обстеження, оцінювання технічного стану конструкцій, формування та вибору КТР підсилення, а також багатокритеріального оцінювання альтернатив і нормування трудових витрат (довідка про апробацію від 03.04.2026 р.). Окремі результати апробовано у діяльності ФОП Шутенко В.В., на замовлення якого автором надано рекомендації щодо вибору та обґрунтування КТР підсилення, оцінювання альтернатив і оптимізації організаційно-технологічних процесів, що забезпечило підвищення якості підсилення, зниження трудомісткості та витрат (довідка про апробацію від 04.04.2026 р.).

Ефективність і прикладна цінність результатів підтверджено їх апробацією та використанням у практиці реконструкції будівель.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійною науковою працею, а її результати, теоретичні положення, практичні розробки, висновки та рекомендації належать особисто автору, є його власним теоретичним та практичним внеском у розвиток як теоретичних положень будівельної науки, так і практичної її реалізації. Результати дисертації опубліковано автором самостійно та у співавторстві. Внесок здобувача у роботах, опублікованих у співавторстві, висвітлено у списку опублікованих праць. З наукових публікацій, виданих у співавторстві, у дисертації використано ті матеріали, які становлять особистий внесок автора.

Апробація результатів дослідження. Основні положення дисертації, результати теоретичних та експериментальних досліджень оприлюднено на 19-ти всеукраїнських та міжнародних науково-технічних і науково-практичних конференціях, зокрема на: міжнародній науково-практичній конференції *«Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем – 2026»* (Чернігів, 2026); міжнародному науково-технічному форумі *«Architecture, Construction, Design: Technology, Energy, Management – 2024»* (Київ, 2024); міжнародному науково-технічному форумі *«Архітектура та будівництво: нові тенденції і технології. Теорія та практика»* (Київ, 2022 та 2021); I Міжнародній науково-практичній онлайн-конференції *«Актуальні проблеми, пріоритетні напрямки та стратегії розвитку України»* (Київ, 2021); III науково-практичній конференції *«Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції»* (Київ, 2021); VII міжнародній науково-практичній конференції *«Трансфер інноваційних технологій»* (Київ–Дортмунд–Нур-Султан–Дзянсу, 2021); IV міжнародній науково-практичній конференції *«Інноваційні технології в архітектурі і дизайні»* (Харків, 2021); міжнародній конференції *«EU Principled Pragmatism – Consequences for the Eastern and South-Eastern Europe: political, economic, legal and communication aspects»* (Київ, 2021); I Міжнародній науково-практичній конференції ім. П.М. Ковалю *«Актуальні питання мостового господарства та шляхи його покращення»* (Запоріжжя, 2021); Всеукраїнській науковій конференції *«Сучасна архітектурна освіта»* (Київ, 2021); міжнародній

науково-практичній конференції молодих учених «*Build-Master-Class*» (Київ, 2020, 2016); міжнародному семінарі «*Economics of the cultural heritage, tourism and modern fortifications in EU*» (Венеція, 2016); конференції молодих учених, аспірантів і студентів КНУБА (Київ, 2014); IX міжнародній конференції «*Modern Building Materials, Structure and Techniques*» (Вільнюс, 2007); міжнародній конференції «*Реконструкция-2005*» (Санкт-Петербург, 2005); конференції молодих учених КНУБА (Київ, 2002).

Публікації. Основні етапи, результати та висновки дисертаційної роботи представлено у 48 друкованих працях (зокрема, 19 – без співавторів [1, 5, 8, 10, 11, 19, 22, 25-33, 35, 36, 38, 39], з яких: 7 статей – у міжнародних виданнях і тих, що рецензуються у WoS [1-7]; 17 статей – у вітчизняних фахових виданнях (усі індексуються у міжнародних базах даних) [8-24]; 3 патенти України на корисну модель [74-76]; 2 навчальні посібники [66, 67], 2 з яких – з грифом МОН України [65, 66]; 19 публікацій апробаційного характеру у збірниках матеріалів наукових конференцій та семінарів [25–43].

Структура та обсяг дисертації. Робота складається з анотації, списку праць здобувача, вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 558 сторінок, з них основного тексту – 446. Список використаних джерел налічує 295 найменування та займає 29 сторінок. Робота містить 75 таблиць та 180 рисунків. Додатки (3) розміщено на 44 сторінках.

РОЗДІЛ 1

НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ПІДСИЛЕННЯ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

1.1. Сучасний стан та передумови вдосконалення конструктивно-технологічних систем відновлення каркасних будівель і споруд.

Сучасні умови експлуатації будівель, зокрема зміна функціонального призначення, підвищення навантажень на каркаси, а також наслідки бойових дій, обумовлюють необхідність їх відновлення, підвищення якості та проведення реконструкції.

Будівельна спадщина України включає численні приклади застосування каркасних конструкцій, особливо в промислових та цивільних будівлях і спорудах.

Існуючі каркасні будівлі і споруди в період довгої експлуатації зношуються фізично та морально, потребують переобладнання і доведення до сучасного рівня розвитку науки і техніки. За різних причин при змінах параметрів каркасів та складових конструкцій відбуваються процеси реконструкції. Продуктом реконструкції стають змінені властивості каркасних будівель і споруд.

Процес підсилення окремих конструкцій каркасних будівель завжди присутній при реконструкції. Продукцією процесу підсилення стають змінені властивості конструкцій: геометричні параметри; форма; положення у просторі; несуча здатність; довговічність; вартість тощо.

Сучасна наука і практика виробили систему кількісної оцінки властивостей продукції, що характеризують показники якості, які занесені у державні стандарти України (ДСТУ) [1], Регламент (ЄС) № 305/2011 Європейського Парламенту [2], ISO [3, 4] та технічні умови на продукцію. Важливим є положення про контроль не тільки окремих елементів, а й всієї конструкції, включаючи прогнозування її довговічності в реальних умовах експлуатації, що містять нормативні документи України (ДБН [5, 6], ДСТУ [7, 8]).

Регламент (ЄС) № 305/2011 встановлює гармонізовані умови для реалізації будівельної продукції в ЄС, визначаючи вимоги до її експлуатаційних характеристик і декларації відповідності. Він зобов'язує продукцію підсилення відповідати критеріям механічної міцності, стійкості, безпеки, екологічності та довговічності (ст. 3). Також регламент передбачає систему оцінки та перевірки експлуатаційних характеристик (ст. 28–36) на основі гармонізованих стандартів та європейських технічних оцінок (ЕТА), що включає випробування, інспекції та контроль виробництва. Крім того, будівельна продукція має відповідати задекларованим характеристикам якості відповідно до вимог декларації експлуатаційних характеристик (ст. 4–7).

Для оцінки якості продукції використовуються різні системи показників. Процеси підсилення каркасів будівель мають особливість, яка накладає певні характеристики на показники якості продукції. За результатами аналізу відомих показників якості [4, 9-13] внесені відмінності у систему показників. Наприклад, **показники призначення** для продуктів підсилення характеризують не корисний ефект від використання виробів, а скоріше, функцію підвищення несучої здатності як окремої конструкції, так і каркасу будівлі в цілому.

З показників надійності щодо продуктів підсилення може розглядатися лише довговічність виробу. Надійність розглядається як властивість об'єкта зберігати у часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах експлуатації будівлі.

Одними з ключових показників якості елементів підсилення визначено показники **технологічності**, що характеризують здатність конструктивно-технологічних рішень (КТР) забезпечувати ефективне виконання робіт із мінімальними витратами трудових, матеріальних та часових ресурсів. Технологічність відображає не лише виконуваність процесів підсилення, але й їх раціональність з точки зору організації робіт, просторових обмежень, доступності технологій та рівня механізації. Дотримання високого рівня

технологічності забезпечує збалансований розподіл ресурсів і підвищення продуктивності праці на всіх етапах реалізації робіт.

Важливими є **ергономічні** показники, що характеризують умови взаємодії людини з технологічними засобами підсилення та визначають зручність, безпеку й ефективність виконання робіт. До них належать як фізичні навантаження (зусилля керування інструментами), так і параметри виробничого середовища: освітленість, температура, вологість, запиленість, шум, вібрації та інші впливи.

Оскільки елементи підсилення складають, як правило, з окремих деталей та збірних одиниць (переважно із сталі), в конструктивно-технологічній системі (КТС) забезпечення якості **показники стандартизації та уніфікації** повинні бути присутніми. Чим буде менш оригінальних виробів, тим краще тому, що призводить до зниження витрат праці та до прискорення процесу підсилення.

Показники транспортабельності для процесів підсилення визначають пристосованість відправних марок елементів підсилення до перевезення та до переміщення як вручну, так і за допомогою механізованих пристроїв. До них належать тривалість і вартість підготовки до перевезень, трудомісткість і тривалість вантажно-розвантажувальних робіт, матеріаломісткість упакування.

Процеси підсилення конструкцій, як і всі будівельно-монтажні процеси, характеризуються впливом на зовнішнє середовище. Рівень шкідливих впливів на навколишнє середовище характеризується **екологічними показниками** якості: обмеження надходження в природне середовище викидів; зниження наявності шкідливих речовин в атмосфері, які не перевищують допустимих концентрацій; збереження і раціональне використання біологічних ресурсів тощо.

Економічні показники є обов'язковими показниками КТР, характеризують витрати на розробку проектної документації, виготовлення елементів підсилення, доставку відправних марок; виконання робіт по підсиленню та подальшу експлуатацію. Основні з них: собівартість та трудомісткість процесу.

Обов'язковими є **показники безпеки**, які характеризують умови безпеки людини під час влаштування елементів підсилення.

Тривала експлуатація будівель без своєчасного технічного обслуговування та капітальних ремонтів, недостатня міцність матеріалів, зміна погодних умов та нормативних документів часто призводять до необхідності перерахунку та підсилення несучих конструкцій. Це потребує застосування максимально ефективних методів, які враховують як надійність, так і рентабельність, зокрема в умовах тривалого припинення роботи підприємств або обмежень у використанні прилеглої території.

Важливим аспектом є також вплив методів реконструкції на навколишнє середовище. Крім того, культурна цінність історичних конструкцій, які гарантують функціональність та несучу здатність, обумовлює необхідність збереження їх первісної архітектурної задумки.

Особливо актуальним є впровадження інноваційних організаційних та КТР, які забезпечують продуктивність і функціональність з мінімальним негативним впливом на навколишнє середовище. Такі рішення повинні враховувати економічні, соціальні та культурні аспекти на різних рівнях, зокрема економію енергетичних, матеріальних і трудових ресурсів, підвищення несучої здатності, зниження деформативності та відновлення експлуатаційної придатності конструкцій.

Забезпечення довготривалої та ефективної експлуатації каркасу будівлі є актуальною техніко-економічною проблемою, яка потребує не лише ефективних рішень, але й оцінки ризиків на всіх етапах життєвого циклу. Дослідженнями впливу управління інвестиційними ризиками на вартість проекту займається Дональд Тавей [14], який має понад 30-річний досвід у будівельній галузі. Його праці охоплюють методологію оцінки вартості проекту, комерційне та договірне управління будівельними проектами. Б. Лев, С.Радхакришнан та Д. І. Тонг [15] досліджують взаємозв'язок між ефективністю реалізації проектів, капітальними витратами та ризиками, такими як конкуренція, операційні ризики, руйнівні технології та податкові ризики.

Питання витрат часу також є значним фактором, який впливає на вартість проекту, і йому присвячені дослідження Г.М. Тонкачєєва [16-19], П.Є. Григоровського [20], О.С. Молодіда [18, 21], К. Айlanda [22] та інших.

Недостатньо вивченими залишаються питання оцінки ризиків, ефективності прийняття рішень та оптимізації витрат при реконструкції каркасів будівель.

Організація робочих місць та вибір оптимальних методів реконструкції є важливими аспектами, які впливають на ефективність процесу. Питанням впливу стиснених умов та організації робочих місць на процеси реконструкції присвячені роботи Г.М. Тонкачєєва [23-25], П.Є. Григоровського [20], О.Ф. Осипова [26-27], Савйовського В. В. [28] та інших.

Останні роки значна кількість публікацій [29-31] присвячена реконструкції будівель, але недостатньо вивченими залишаються питання оптимального планування робочого простору, вибору типу підмостей, риштувань, драбин та розміщення спеціального обладнання. Ці фактори впливають на загальну схему організації та технологію виконання робіт, особливо в умовах обмеженого простору та одночасного ведення виробничого процесу.

Аналіз причин обвалення покрівель виробничих будівель [32] виявив критичну необхідність підвищення надійності та забезпечення безпеки будівель. Це зумовлено експлуатацією застарілих об'єктів, які не відповідають сучасним будівельним нормам та міжнародним стандартам безпеки. Особливо це стосується будівель, зведених до 2006 року, коли набули чинності ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи» [33], оскільки вони були спроектовані за старими нормами що не враховували сучасні вимоги до снігових, вітрових та інших навантажень, що суттєво знижує їхню надійність.

У 1988 та 1996 роках згідно з будівельними нормами СНиП 2.01.07-85 для Донецької області встановлювалося навантаження 50 кг/м^2 , а для Києва – 70 кг/м^2 . Однак у 2006 році з ухваленням ДБН В.1.2-2:2006 ці значення суттєво зросли: для Донецької області – до 150 кг/м^2 , а для Києва – до 155 кг/м^2 . Це свідчить про те, що багато споруд, зведених у ХХ столітті, проектувалися за

заниженими нормами, що вимагає перегляду проектних рішень та підсилення конструкцій відповідно до сучасних стандартів.

Наприклад, у Запоріжжі взимку 1986-87 років відбулося обвалення покриття через надмірне снігове навантаження (рис.1.1). Подібні випадки обвалення дахів сталися в інших регіонах України та за кордоном. 4 березня 2018 року в Кривому Розі через снігове навантаження обвалилася покрівля цеху ПАТ «АлселорМіттал». Ці випадки підкреслюють важливість підсилення конструкцій і модернізації будівель для забезпечення їхньої безпеки та відповідності сучасним стандартам.

Прикладом промислової будівлі, де снігове навантаження стало критичним, є цех №11 ТОВ «Горные машины - ДГМ», обстежений у 2012 році. Цех, збудований з 1925 по 1961 рік, мав конструкцію, що сприяла утворенню снігових скупчень у єндовах до 5 метрів. Накопичення снігу у зимовий період призвело до перевантаження кроквяних конструкцій та обвалу покрівлі (рис. 1.2). Після прибудови торцевих прольотів, що створили перешкоди для снігу, розрахункове снігове навантаження зросло з 700 Па до 4500 Па, що у 6,4 рази перевищує початкове значення та спричинило руйнування покриття в зонах єндов.

Оцінка стану будівельних конструкцій має включати не лише контроль за їхнім поточним станом, а й перевірку відповідності стікості та надійності конструкцій каркасу будівлі всім чинним нормативним документам. Це дозволить вчасно виявляти потенційні ризики, які можуть виникнути через вплив граничних навантажень, яке не було передбачено на стадії первісного проектування та будівництва будівлі.

Власники будівель, намагаючись зберегти об'єкти та уникнути дорогого знесення, все частіше віддають перевагу реконструкції, що вимагає усунення наявних невідповідностей і підсилення конструкцій відповідно до актуальних норм і вимог управління якістю будівельних процесів. Забезпечення довготривалої та ефективної експлуатації будівель є важливою техніко-економічною проблемою, що потребує системного підходу та оцінки ризиків на всіх етапах життєвого циклу.



Рис. 1.1. Обвалення покриття у Запоріжжі від навантаження снігом взимку 1986-87 рр.

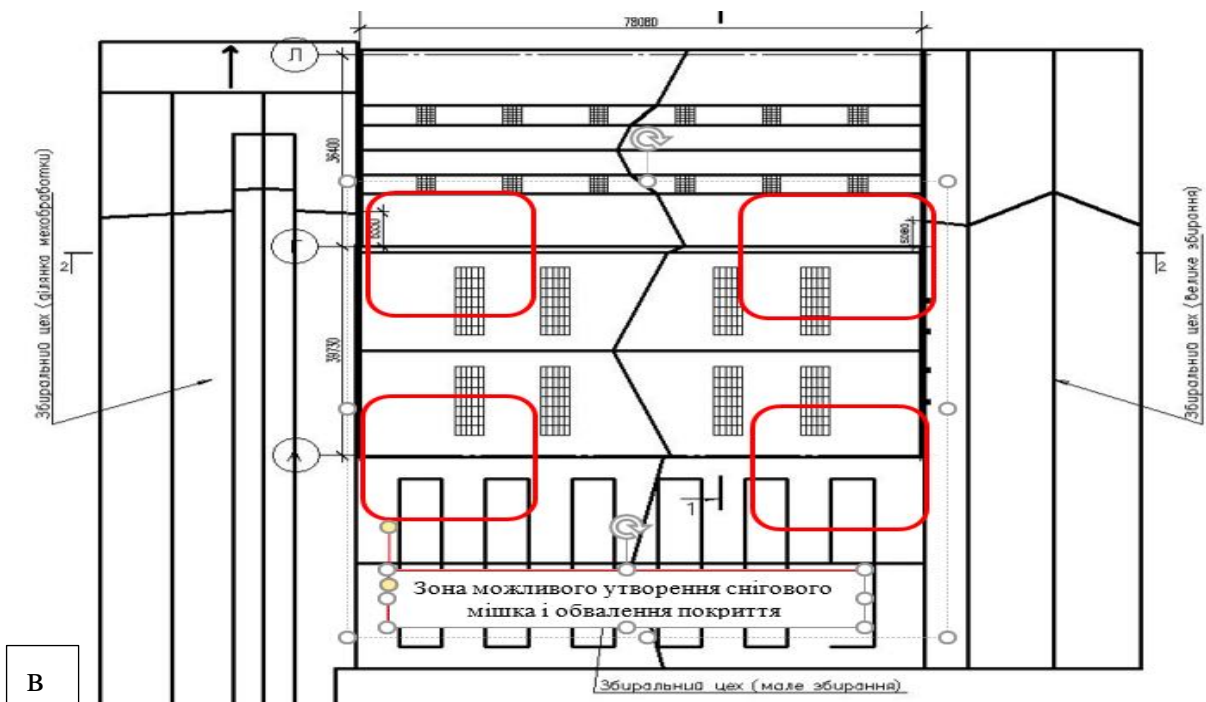


Рис.1.2. Потенційні місця утворення снігових мішків висотою до 5 м і обвалення покрівлі в зимовий час через перевантаження кроквяних конструкцій: а - фото до обвалення, б - фото після обвалення, в - план покрівлі із зазначенням місць обвалення і небезпечних зон.

Вибір оптимальних методів реконструкції значною мірою залежить від організації робочих місць та врахування обмежень у просторі.

У цьому контексті важливу роль відіграє використання інформаційного моделювання будівництва (BIM), що дозволяє оптимізувати процеси реконструкції, підвищити точність планування та мінімізувати витрати. Для забезпечення безпечної експлуатації будівель необхідно не тільки оцінювати їхній поточний стан, а й прогнозувати ризики та проводити своєчасне підсилення конструкцій. Комплексний підхід, що включає сучасні методи діагностики, оцінку відповідності нормативам і застосування новітніх технологій для реконструкції, дозволить знизити ризик аварій і продовжити термін служби будівель.

Комплексне врахування показників якості процесів підсилення раніше не розглядалося, тому відповідна потреба у дослідженні цієї проблеми дозволила сформулювати мету дослідження у створенні КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції.

1.2. Вплив геометричних та планувальних параметрів існуючих будівель на формування конструктивно-технологічних систем відновлення

Процес реконструкції каркасних будівель та споруд, зокрема підсилення їх конструкцій, є важливою частиною забезпечення безпеки, функціональності та довговічності будівель у умовах змінних експлуатаційних навантажень, зокрема через зміни кліматичних умов, збільшення ваги покрівель та функціональних навантажень. Особливо актуальним є підсилення конструкцій каркасних будівель, які вийшли за межі своїх проектних характеристик і потребують адаптації до нових умов експлуатації.

При реконструкції будівель необхідно враховувати їхні об'ємно-планувальні рішення, оскільки вони визначають розподіл навантажень і ефективність конструкцій в процесі підсилення. У більшості випадків, каркасні будівлі мають традиційні планувальні рішення, що передбачають різні типи

каркасів — сталеві, залізобетонні, дерев'яні чи комбіновані, залежно від історичних умов та специфіки використання. Водночас, існуючі будівлі часто мають обмежену площу для розміщення додаткових конструкцій або технічних систем, що ускладнює реалізацію проектів підсилення.

Сучасні вимоги до реконструкції будівель потребують більш точного підходу до об'ємно-планувальних рішень. Вони включають оптимізацію простору для підвищення ефективності використання, розподілу навантажень і збереження конструктивної стійкості під час збільшення навантажень. У багатьох випадках реконструкція передбачає зміну або перепланування функціональних зон у будівлях, що вимагає додаткових розрахунків для визначення можливостей збереження або підсилення існуючих конструкцій.

Розвиток інформаційного моделювання будівництва (BIM) також відіграє важливу роль в оптимізації об'ємно-планувальних рішень при реконструкції. Це дозволяє не тільки планувати процеси реконструкції, а й значно покращити якість виконання робіт, знизити витрати та зменшити кількість помилок на етапі проектування та реалізації.

Об'ємно-планувальні параметри будівель, що підлягають реконструкції, виступають ключовими детермінантами при виборі методів підсилення каркасів. Вони зумовлюють специфіку конструктивних перетворень та накладають технологічні обмеження на процеси відновлення несучої здатності об'єктів.

Вибір методу підсилення та доцільність додавання в'язей жорсткості безпосередньо залежать від системи каркаса, розміщення колон і балок у плані, поверховості будівлі та архітектурно-планувального рішення. Наприклад, при високих будівлях або при переплануванні можуть виникати необхідності в додаткових елементах жорсткості для забезпечення стабільності конструкцій.

Типи каркасів будівель можна класифікувати за конструктивними ознаками: регулярний модуль колон, збільшені прольоти, щільність вертикальних і горизонтальних комунікацій, вільний простір для перепланувань і переоснащень. Для організації каркасів типових будівель характерні такі ознаки, як вільна квадратна або прямокутна форма в плані, базис на 4 колонах,

площинність поверхні перекриття, розрізна в'язева схема, необхідність горизонтального проходження інженерних комунікацій, ортогональні системи 1-4 рівнів конструктивної ієрархії.

Вибір КТР для підсилення компонентів будівлі під час реконструкції залежить від початкової конструкції будівлі, її експлуатаційних вимог і можливостей підсилення без значного втручання у несучі елементи. Реконструкція каркасних будівель є складним завданням, яке потребує врахування особливостей їх конструктивних схем. Каркасні системи поділяються на рамні, зв'язкові, рамно-зв'язкові та безригельні (рис.1.3), а також можуть бути комбінованими (рис.1.4), що включають різні поєднання стін, колон, діафрагм жорсткості та інших елементів.

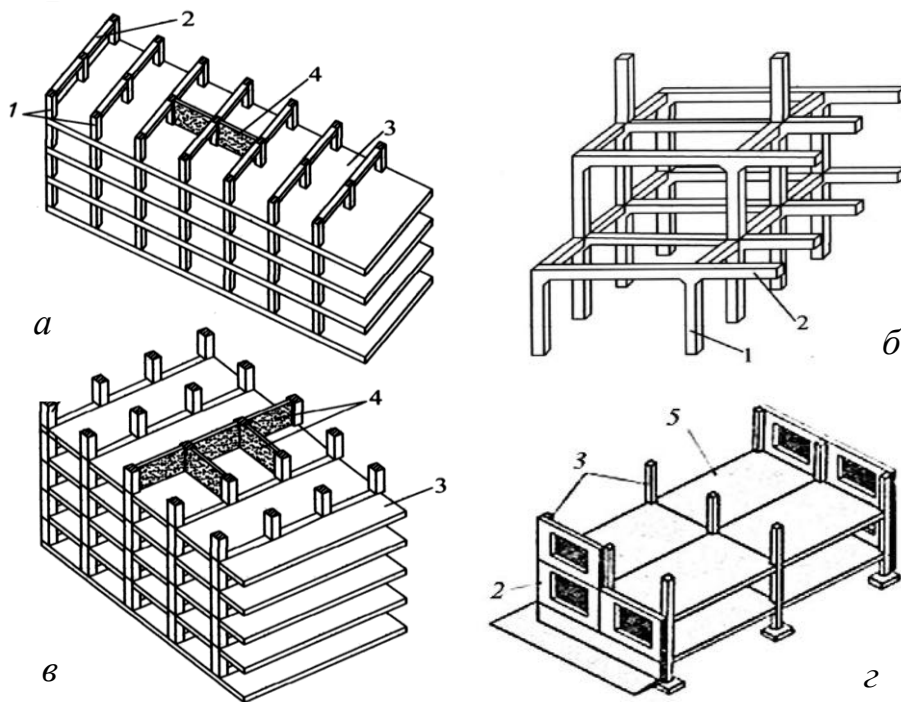


Рис. 1.3. Конструктивні схеми каркасних будівель [53]: *а* – рамно-зв'язкова; *б* – рамна; *в* – зв'язкова; *г* – безригельний каркас

Усі ці характеристики прямо впливають на вибір методів підсилення, оскільки при різних типах каркасів та планувальних рішеннях, необхідно застосовувати різні технології для забезпечення стабільності конструкцій.

Складні архітектурні форми, великі прольоти, а також специфічні параметричні особливості можуть обмежувати або, навпаки, відкривати можливості для використання певних конструктивних і технологічних рішень під час реконструкції.

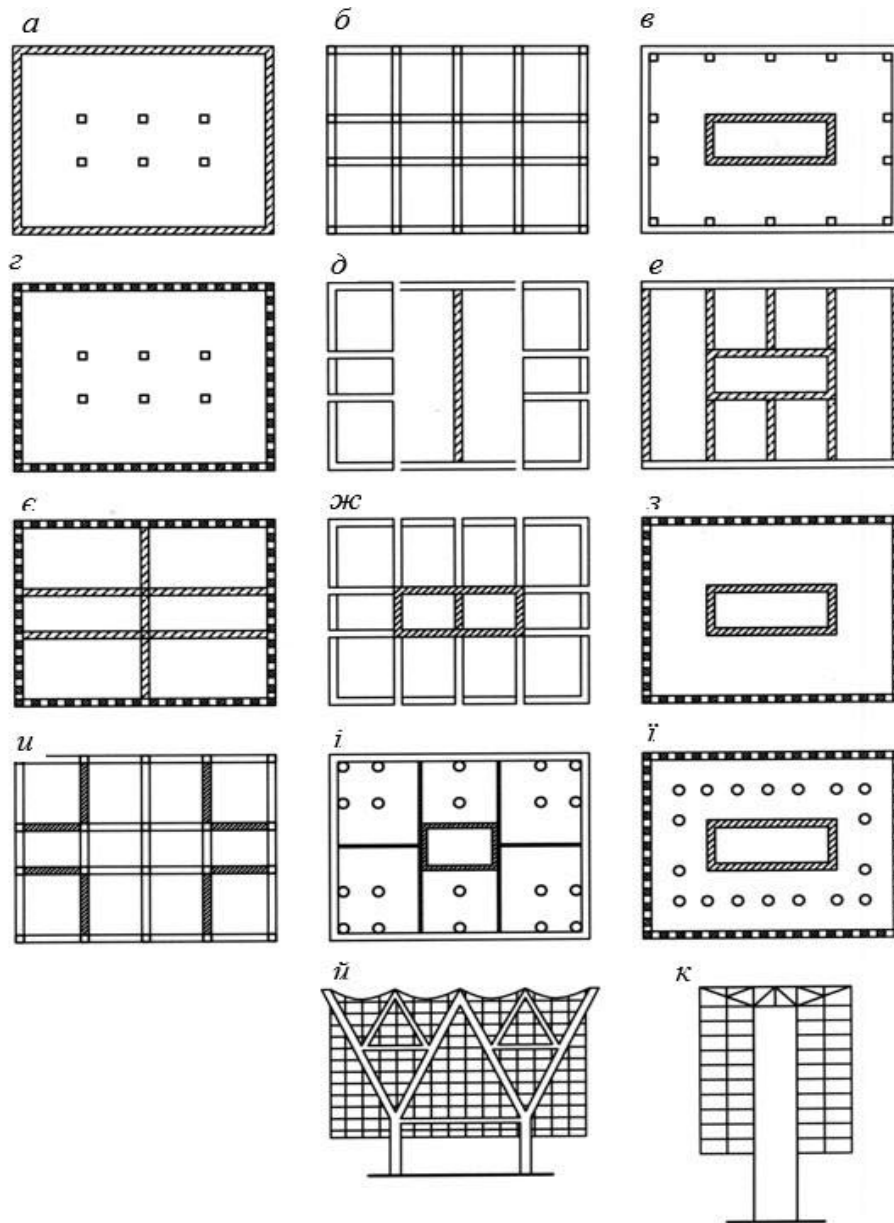


Рис. 1.4. Комбіновані конструктивні системи будівель [53]: а – каркасно-стінова; б – об’ємно-каркасна; в – каркасно-стовбурна; г – каркасно-оболонкова; д – об’ємно-стінова; е – стовбурно-стінова; є – оболонково-діафрагмова; ж – об’ємно-стовбурна; з – стовбурно-оболонкова; и – об’ємно-каркано-діафрагмова; і – каркасно-стовбурно-діафрагмова; ї – каркасно-стовбурно-оболонкова; й – каркасно-підвісна; к – стовбурно-підвісна

Створення систем конструктивних і технологічних рішень підсилення каркасних будівель здійснювалося провідними науково-дослідними інститутами та проєктними організаціями, зокрема ЦНДІСК ім. В.А. Кучеренка, НДІБК, а також окремими науковими школами, у межах яких сформовано методологічні підходи до організаційно-технологічного проєктування реконструкції будівель [27, 28]. Разом із тим більшість відомих рішень орієнтована переважно на типові конструктивні елементи та вузли і не забезпечує формалізованого багатокритеріального вибору КТР з урахуванням життєвого циклу та принципів сталого розвитку [35, 36].

Практичний досвід обстеження каркасних будівель свідчить про масовість реконструкції об'єктів, зведених за типовими серіями. Зокрема, будівля ощадбанку перебувала на стадії незавершеного будівництва та понад десять років не експлуатувалася (рис. 1.5). Консервація об'єкта була виконана неналежним чином, що призвело до протікань покрівлі та інфільтрації атмосферних опадів через конструкції каркаса.

Внутрішній каркас будівлі виконано із збірних залізобетонних елементів за типовою серією 1.020-1/83. Колони першого ярусу прийняті суцільними на три поверхи (3.КД.4.33(28)) з перерізом 40×40 см та прямокутними консолями.

Будівлю ВАТ «Укрнафта» (рис. 1.6) запроєктовано як каркасно-панельну за рамно-зв'язковою схемою. Основна сітка колон становить $6 \times 3 \times 6$ м з кроком 3 та 6 м. Об'єкт має прямокутну форму в плані з габаритними розмірами в осях 30×36 м. Висота перших трьох поверхів становить 4,2 м. Конструктивна схема будівлі — повний збірний залізобетонний каркас із поперечним розташуванням ригелів (переважно за цифровими осями). Просторова жорсткість забезпечується системою колон, ригелів і вертикальних діафрагм жорсткості у поєднанні з диском перекриття з рядових і розпірних плит. Огороджувальні конструкції виконані у вигляді навісних керамзитобетонних панелей.

Конструктивна схема реалізована на основі типових рішень серії ІІІ-04. Проєктом передбачалося корисне навантаження на перекриття типових поверхів у розмірі 400 кг/м^2 , а для приміщень третього поверху — 750 кг/м^2 . Результати

натурних обстежень і розрахунків засвідчили зміну розрахункових параметрів у бік зростання кліматичних впливів (снігового та вітрового навантажень) відповідно до чинних нормативних вимог. Водночас унаслідок зміни функціонального призначення приміщень третього поверху навантаження 750 кг/м^2 втратило актуальність, що створює передумови для коригування розрахункової схеми та перерозподілу зусиль у елементах каркаса.

Для внутрішнього каркасу застосовано збірні залізобетонні конструкції серії ІІІ-04-2-вип. 2. Колони першого ярусу виконані суцільними на два поверхи з перерізом $40 \times 40 \text{ см}$ і прямокутними консолями. На третьому поверсі передбачено одноповерхові колони цієї ж серії, а колони четвертого–п'ятого та шостого–сьомого поверхів прийняті двоповерховими.

Будинок ДПА України (рис. 1.7) має складну об'ємно-планувальну форму у вигляді різаного ромба (рис. 1.8) з габаритами у повздовжньому напрямку $49,98 \times 27,14 \text{ м}$. Метою дослідження було підтвердження несучої здатності 25-поверхової адміністративної будівлі по Львівській площі, 8 у м. Києві в умовах реконструкції та подальшої експлуатації, а також розроблення рекомендацій щодо підвищення її надійності. Висота першого і четвертого поверхів становить $4,20 \text{ м}$, третього, п'ятого і шостого — $3,60 \text{ м}$, решти поверхів — $3,30 \text{ м}$. У центральній частині над 24-м поверхом розміщено два технічні поверхи, над якими розташовано завершальний архітектурний елемент — купол. Загальна висота будівлі становить $+98,800 \text{ м}$ відносно нульової позначки, прийнятої на рівні підлоги першого поверху.

До складних випадків реконструкції каркасних будівель належить відновлення їх несучої здатності після пожежного впливу, зокрема будівлі профспілок у м. Києві (рис. 1.9), яка після реконструкції була введена в експлуатацію з відновленими експлуатаційними характеристиками та зміненими архітектурними рішеннями (рис. 1.10). Виконані роботи передбачали повне відновлення несучих залізобетонних рам, що зумовило підвищені вимоги до обґрунтування та вибору КТР підсилення.



Рис. 1.5 Будівля каркасна залізобетонна
під реконструкцію



Рис. 1.6. Будівля ВАТ «Укрнафта»



Рис. 1.7 Будівля ДПА
України в Києві

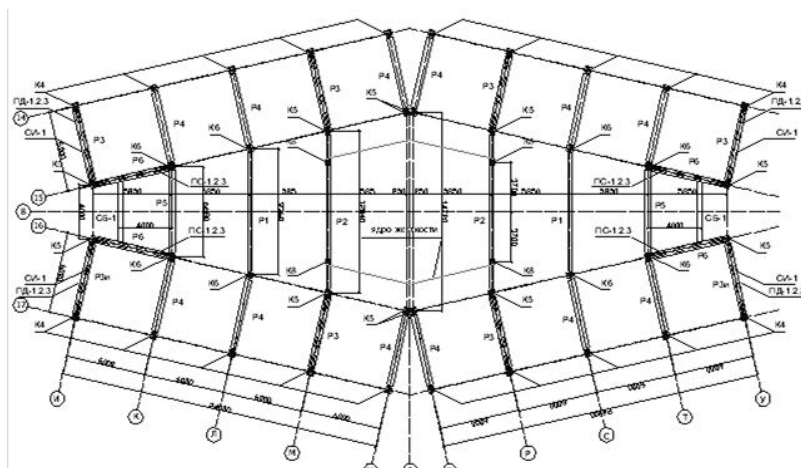


Рис. 1.8 План поверху будівлі ДПА України



Рис. 1.9 Вигляд будинку
профспілок після пожежі



Рис. 1.10 Відновлений будинок
профспілок

Аналіз об'ємно-планувальних рішень каркасних залізобетонних багатоповерхових будівель свідчить про переважне застосування типових серій ИИ-04 та ИИ-20, які широко використовувалися у масовому будівництві громадських і промислових об'єктів у другій половині ХХ століття [40, 41]. Серія ИИ-04 передбачає дво- та трипрогонові каркаси з прогонами 6,0×6,0 м; 6,0×6,0×6,0 м та 6,0×3,0×6,0 м при висоті поверхів 3,3 і 4,2 м [40]. Серія ИИ-20 орієнтована на трипрогонові каркаси з прогонами 6,0 і 9,0 м та характеризується більшою варіативністю висоти поверхів — 3,6; 4,8; 6,0; 7,2 і 10,8 м [41].

З метою уніфікації конструктивних рішень та розширення сфери їх застосування на зміну зазначеним серіям було впроваджено універсальну серію 1.020, призначену для багатоповерхових громадських і промислових будівель [42]. За цією серією протягом понад 30 років зведено значну кількість об'єктів, які нині становлять основний фонд реконструкції із необхідністю підсилення несучих каркасів.

Об'ємно-планувальні рішення серії 1.020 характеризуються прогонами каркасу 3,0; 6,0; 7,2 та 9,0 м, кроками колон 3,0; 6,0; 7,2; 9,0 та 12,0 м, а також висотою поверхів 3,3; 3,6; 4,2; 4,8; 6,0 та 7,2 м. Вертикальні несучі елементи виконуються у вигляді залізобетонних колон перерізом 30×30 см та 40×40 см, ригелі — таврового або прямокутного перерізу висотою 45 см та 60 см. Як перекриття застосовуються багатопустотні та ребристі плити висотою 22 см і 30 см, а також панелі покриття типу 2Т з прогонами 9,0 та 12,0 м і висотою 60 см [43-44].

Окремо слід відзначити систематизовані рішення з підсилення конструкцій промислових одноповерхових будівель, зведених за типовою серією 1.420.2 «Підсилення сталевих конструкцій промислових споруд», у якій вперше здійснено спробу класифікації способів підсилення залежно від функціонального призначення будівель та характеру навантажень [45]. Зокрема, відомі узагальнення досвіду відновлення та підсилення конструкцій будівель легкої промисловості.

Подібні спроби систематизації виконувалися також регіональними науково-дослідними організаціями, зокрема НДІБК та НДІБВ України, однак вони мали локальний характер і не формували цілісної універсальної системи КТР [46-49].

У цілому більшість наявних систем підсилення каркасів будівель ґрунтуються на фрагментарному наборі рішень, об'єднаних за окремими типами несучих елементів, без урахування організаційно-технологічних аспектів реалізації робіт та їх взаємозв'язку в межах єдиного процесу реконструкції.

У даному дослідженні поняття системи КТР розглядається як впорядкована сукупність елементів, що перебувають у визначених структурних і функціональних зв'язках між собою та утворюють цілісну модель за заданими ознаками, рівнями ієрархії та умовами застосування [16, 21]. Такий підхід передбачає узгодженість конструктивних, технологічних і організаційних складових процесу підсилення в межах єдиної системи забезпечення якості реконструкції.

Водночас значна частина відомих рішень з підсилення стосується морально застарілих серій каркасних будівель, доцільність реконструкції яких у сучасних умовах часто є дискусійною з економічної та техніко-експлуатаційної точок зору. У більшості випадків такі рішення не враховують змінені вимоги до функціональності будівель, умов виконання робіт, обмежень виробничого середовища та принципів сталого розвитку.

Актуальність проблеми підсилення каркасних будівель суттєво зросла в умовах воєнного стану в Україні, внаслідок якого значна кількість будівель зазнала пошкоджень і руйнувань. Крім того, протягом останніх 20 років в Україні було зведено велику кількість малоповерхових і багатоповерхових каркасних будівель промислового та цивільного призначення, що потребують реконструкції з різних причин — зміни функціонального призначення, фізичного зносу, підвищення вимог до безпеки та енергоефективності.

Оцінка ефективності реконструкції визначається такими факторами, як гнучкість планування, стійкість до навантажень та можливість підсилення без

значного втручання у структуру. У таблиці 1.2 наведено інформацію щодо різних типів каркасів і їх відповідності цим вимогам.

Аналіз різних каркасних систем у контексті їх реконструкції показує важливість вибору методів підсилення, які оптимально відповідають специфіці кожної системи. Рамні каркасні системи, завдяки своїй гнучкості та можливості адаптації до нових планувальних рішень, можуть бути підсилені за допомогою локального оббетонування, підсилення металевими обоймами та додавання жорстких зв'язків. Для цих конструкцій часто використовують збільшення перерізу несучих елементів шляхом приварювання додаткових металевих елементів або використання композитних матеріалів для зміцнення конструкцій, оскільки такі методи забезпечують необхідну жорсткість вузлів, не обмежуючи внутрішнє планування.

Таблиця 1.2

Аналіз ефективності реконструкції різних типів каркасних конструкцій

Тип каркасу	Переваги	Недоліки
Рамні каркасні конструкції	Гнучке планування, висока несуча здатність, простота інтеграції комунікацій	Висока матеріаломісткість, складність підсилення без зміни геометрії
Зв'язкові каркасні конструкції	Висока стійкість, менші витрати сталі	Обмеження у плануванні, складність зміни функціонального призначення
Рамно-зв'язкові конструкції	Оптимальний баланс жорсткості та гнучкості, ефективність у багатоповерхових будівлях	Складність підсилення вузлів
Безригельні каркасні конструкції	Гнучкість використання простору, зменшене навантаження на фундамент	Потреба у високій жорсткості перекриттів, складність збільшення навантажень
Комбіновані каркасні системи	Висока адаптивність, оптимальний розподіл навантажень	Складність проектування, важкість підсилення окремих елементів

Зв'язкові каркасні системи, що характеризуються високою жорсткістю завдяки наявності зв'язків та діафрагм, вимагають підсилення конструкцій у першу чергу через підсилення металевими обоймами та додавання жорстких зв'язків. Оскільки ці системи мають обмежену гнучкість у планувальних рішеннях, використання композитних матеріалів та збільшення перерізу

елементів може стати важливими заходами для підвищення їх міцності без необхідності значних змін у структурі.

Рамно-зв'язкові системи, які поєднують переваги обох попередніх типів, також потребують комплексного підходу до підсилення. Для таких конструкцій найефективнішими є методи локального оббетонування, використання композитних матеріалів та збільшення перерізу елементів через приварювання металевих елементів, що дозволяє збалансувати міцність і гнучкість.

Безригельні каркасні системи, де ригелі відсутні, а перекриття працюють як плити, потребують ретельного підходу до забезпечення жорсткості перекриттів. Для таких конструкцій найбільш доцільними є методи підсилення, що включають використання композитних матеріалів та додавання жорстких зв'язків, які забезпечують необхідну жорсткість і стійкість конструкцій.

Використання комбінованих систем, які оптимально поєднують різні елементи конструкцій, потребує індивідуального підходу до підсилення, в залежності від характеру навантажень та специфіки реконструкції. Тут важливо застосовувати комплексні методи, такі як підсилення металевими обоймами, локальне оббетонування, використання композитних матеріалів і додавання жорстких зв'язків, що дозволяє досягти необхідної міцності та стійкості конструкцій при мінімальних змінах у планувальних рішеннях.

При визначенні розрахункового терміну експлуатації каркасних будівель слід враховувати різні нормативні підходи. Наприклад, для каркасних будівель термін експлуатації може досягати 100 років за ДБН [5], тоді як за Єврокод [50] цей показник обмежується 50 роками. Врахування цих відмінностей є важливим для оцінки довговічності та вибору методів підсилення конструкцій під час реконструкції. Будівлі поділяють за довговічністю на чотири ступені: I – понад 100 років, II – 50–100 років, III – 20–50 років, IV – 5–20 років. Вони також класифікуються за періодами будівництва, матеріалами конструкцій, конструктивною схемою та технологією зведення, що впливає на склад, обсяги та КТР підсилення конструкцій.

При реконструкції, коли колони вже існують, рішення щодо підсилення каркасних конструкцій та кроку колон стають важливими, оскільки необхідно забезпечити адаптацію конструкцій до нових умов експлуатації. Враховуючи вже наявні колони, при підсиленні враховуються наступні аспекти:

1. Архітектурні вподобання. Якщо реконструкція передбачає перепланування або додавання нових елементів, можливо, буде потрібно підсилити колони або змінити їх розташування для збереження архітектурного вигляду або для задоволення нових потреб.

2. Форма і розміри майданчика. Існуючі колони можуть бути розташовані таким чином, що це обмежує можливості для підсилення або модифікації каркаса. Оцінка простору, доступного для проведення робіт, впливає на вибір способів підсилення або реорганізації колон. Наприклад, якщо планується встановлення нових елементів жорсткості або додаткових конструкцій, це може вимагати зміни відстані між колон, що вимагає визначення відповідних заходів для підсилення наявних конструкцій.

3. Вартість конструкцій і монтажу. Підсилення існуючих колон може бути економічно вигідніше, ніж їх повна заміна, якщо це не порушує стабільність та безпеку будівлі. Вартість матеріалів, складність монтажу та логістика визначають, який метод підсилення буде оптимальним. Наприклад, для додаткового зміцнення колон може бути обрано застосування металевих обойм або армування, що дозволяє зберегти наявні елементи і уникнути дорожчої повної реконструкції.

4. Складність інтеграції із вторинними елементами, огороженням і опорядженням. Оскільки існуючі колони вже інтегровані в структуру будівлі, зміни в розташуванні або підсиленні колон повинні враховувати можливість інтеграції з іншими елементами, такими як огороження, двері, вікна, а також опорядження. Підсилення колон може потребувати додаткових елементів або змін в інтер'єрі, щоб не порушити єдність стилю або функціональності будівлі.

5. Витрати на забезпечення нормативних вимог (антикорозійний захист, пожежна безпека тощо). У разі підсилення колон у реконструйованій

будівлі потрібно враховувати додаткові вимоги, які можуть виникнути через зміни в навантаженнях або через використання нових матеріалів. Наприклад, використання нових металевих об'ємів або армувальних матеріалів може вимагати додаткових антикорозійних заходів, щоб забезпечити довговічність конструкцій. Крім того, при реконструкції потрібно враховувати пожежну безпеку та інші нормативи, що можуть потребувати змін методів підсилення колон або їх обробки.

Об'ємно-планувальні рішення будівлі визначають особливості її реконструкції. Вибір типу підсилення конструкцій залежить від змін просторової структури, функціонального призначення, конструктивних особливостей, технічного стану та вимог до модернізації. Оптимальний метод підсилення враховує характер змін і нові навантаження на каркас будівлі.

На основі загальноприйнятих будівельних норм [5, 50-55] та практичного досвіду автора у сфері реконструкції [56-58] в таблиці 1.3 узагальнено та сформовано основні типи об'ємно-планувальних рішень при реконструкції і відповідні методи підсилення, що забезпечують якість, безпеку та довговічність будівель, що реконструюються.

Пункт 4 таблиці, що стосується прибудови нових об'ємів будівлі, передбачає підсилення конструкцій для забезпечення рівномірного розподілу навантажень між старою та новою частинами будівлі. Це часто вимагає підсилення конструкцій суміжно розташованих прольотів будівлі, таких як колони чи підкранові балки. Прикладом цього є пристройка печного прольоту на підприємстві ООО «Електросталь» у місті Курахово, де було здійснено підсилення колон та підкранових балок для інтеграції нової частини будівлі з існуючою конструкцією. Проект реконструкції був виконаний за участі автора та представлений на рис. 1.12 [57].

Реконструкція передбачає вибір ефективних рішень для підсилення несучих конструкцій, зважаючи на об'ємно-планувальні особливості. Вони визначають складність і доцільність методів підсилення з конструктивної та економічної

точки зору. Різні варіанти реконструкції потребують індивідуального підходу, кожен з яких має свої переваги та недоліки.

Таблиця 1.3

Об'ємно-планувальні рішення та відповідні методи підсилення

№	Об'ємно-планувальне рішення	Типи підсилення
1	Збільшення поверховості будівлі (надбудова поверхів)	- Підсилення фундаментів (розширення основи, підсилення палями). - Підсилення вертикальних несучих елементів (колон, стін) шляхом оббетонування, використання металевих обойм або зовнішнього армування. - Встановлення додаткових діафрагм жорсткості або в'язей міжповерхових перекриттів.
2	Об'єднання або розділення приміщень	- Встановлення додаткових ригелів або підсилення балок при демонтажі несучих перегородок. - Улаштування металевих або залізобетонних перемичок. - Монтаж додаткових колон або підсилення існуючих каркасних елементів.
3	Зміна функціонального призначення будівлі	- Підсилення перекриттів шляхом збільшення їх жорсткості (додавання металевих пластин, композитного армування). - Підсилення колон і стін через збільшене навантаження (залізобетонні та металеві обойми, торкретування). - Підсилення фундаментів у разі значного зростання навантаження.
4	Прибудова нових об'ємів	- Об'єднання існуючої та нової частин через деформаційні шви або додаткові жорсткі рами. - Підсилення фундаментів для рівномірного розподілу навантажень. - Підсилення колон та ригелів при інтеграції нової частини.
5	Зміна покрівлі або покриття будівлі	- Підсилення кроквяної системи (додавання металевих підсилюючих елементів). - Збільшення жорсткості несучих конструкцій перекриттів. - Підсилення вузлів спирання покрівлі на каркас будівлі.
6	Улаштування прорізів у несучих конструкціях	- Встановлення металевих або залізобетонних перемичок. - Підсилення конструкції шляхом обрамлення прорізів металевими обоймами. - Використання композитного армування для розподілу навантаження.
7	Підсилення конструкцій у зв'язку з впливом зовнішніх факторів	- Зміцнення конструкцій каркасу (додавання жорстких зв'язків, анкерування). - Використання карбонових стрічок та композитних матеріалів для покращення сейсмостійкості. - Торкретування залізобетонних конструкцій для підвищення міцності.



Рис. 1.12. Прибудова нових об'ємів будівлі: печний проліт на підприємстві
ООО «Електросталь» у місті Курахово [57]

1. Збільшення поверховості будівлі (надбудова поверхів). Цей варіант зберігає наявний каркас і фундамент, але потребує їхнього підсилення. Існує широкий вибір методів підсилення конструкцій. Надбудова поверхів може вимагати підсилення вертикальних елементів, зокрема колон і ригелів, що здійснюється встановленням металевих обойм або зовнішнім армуванням.

2. Об'єднання або розділення приміщень є досить гнучким і економічним з точки зору підсилення каркасу. Для реалізації змін у плануванні зазвичай необхідне встановлення додаткових ригелів або підсилення існуючих балок. Ці роботи не вимагають значних змін у несучих елементах, що дає можливість вибору між кількома методами, такими як локальне оббетонування або додавання металевих обойм, дозволяючи все виконати без значних затрат.

3. Зміна функціонального призначення будівлі може вимагати підсилення конструкцій для витримування нових навантажень. У таких випадках доцільно застосовувати методи, що мінімально збільшують вагу будівлі, зокрема композитне армування або встановлення металевих обойм. Однак при значному зростанні навантажень може знадобитися масштабніше підсилення, що потребуватиме додаткових інвестицій.

4. Прибудова нових об'ємів дає можливість розширити будівлю без радикальних змін у основній конструкції. Однак інтеграція нових об'ємів із старими може вимагати значних підсилень основних несучих елементів, таких

як колони та ригелі, що ускладнює виконання робіт. У цьому випадку ефективним може бути використання деформаційних швів і додаткових жорстких рам. Це дозволяє уникнути значних навантажень на стару частину будівлі і забезпечити стабільність нової.

5. Зміна покрівлі або покриття будівлі зазвичай не потребує суттєвих змін у каркасі. Підсилюється лише кроквяна система та вузли спірання, що дозволяє уникнути дорогих робіт із підсилення фундаменту. Можливий вибір серед кількох варіантів, зокрема використання легких сучасних матеріалів для покриття та зміцнення окремих конструктивних елементів.

6. Улаштування прорізів у несучих конструкціях здійснюється з використанням металевих обойм, перемичок та композитних матеріалів. Це дозволяє рівномірно розподілити навантаження без значних змін у каркасі, що робить рішення не дорогим і швидким у реалізації. Однак неправильне обрамлення прорізів може спричинити локальні деформації, знижуючи загальну жорсткість будівлі.

7. Підсилення конструкцій під впливом зовнішніх факторів. Використання сучасних матеріалів, зокрема композитних елементів, металевих обойм і додаткових металевих підсилень, дозволяє покращити сейсмостійкість, підвищити несучу здатність конструкцій до атмосферних впливів (наприклад, снігу) та зміцнити загальну міцність будівлі. Такі методи забезпечують довговічність конструкції без суттєвого збільшення її маси. Однак деякі технології, як-от анкерування, можуть створювати додаткове навантаження на окремі елементи, що потребує ретельного аналізу.

8. Параметричний аналіз і підходи до оптимізації підсилення каркасів. Оптимальний вибір рішення залежить від умов реконструкції та параметричних характеристик будівлі, таких як матеріали, геометрія і вплив навантажень. Оптимізація конструктивних і технологічних рішень для підсилення несучих каркасів включає аналіз цих характеристик, що дозволяє визначити найбільш ефективні методи підсилення каркасу будівлі.

Одним із підходів до формалізації вимог та параметричного аналізу конструктивно-технологічних рішень є застосування методології QFD (Quality Function Deployment) [58-59], яка допомагає трансформувати вимоги до надійності та довговічності каркасу в конкретні технічні характеристики підсилюючих елементів. Метод QFD, який спочатку використовувався для управління якістю та розробки продуктів [60–63], набув широкого застосування у сфері будівництва, включаючи проектування та підсилення конструкцій.

У сучасних умовах ефективність рішень визначається не лише відповідністю вимогам замовника, а й їх перевагами порівняно з альтернативними варіантами. Метод QFD дозволяє поєднати вимоги та їх вагомість з урахуванням потреб замовника і порівняльного аналізу рішень [64]. Такий підхід підвищує обґрунтованість вибору КТР та якість прийняття рішень у процесі реконструкції. На основі узагальнення принципів QFD автором сформовано концептуальну схему формалізації вибору КТР підсилення несучих каркасів (рис. 1.13).

Основні етапи QFD у контексті підсилення каркасів будівель:

1. Аналіз експлуатаційних навантажень – виявлення зон максимальних напружень, де можливе перевищення допустимих деформацій.
2. Класифікація параметричних характеристик – визначення впливу таких факторів, як геометрія конструкції, тип матеріалів, наявність вузлових з'єднань.
3. Ранжування критичних ділянок – оцінка пріоритетності підсилення на основі комп'ютерного моделювання, результатів випробувань та аналізу довговічності.

Важливим фактором у процесі підсилення є конкурентний аналіз конструктивних рішень, що дозволяє інтегрувати передові світові підходи в проектування несучих каркасів. Наприклад, у країнах Європи (Швейцарія, Німеччина) сформовано практику інноваційного проектування конструктивних систем, де конкуренція між провідними інженерами сприяє розробці унікальних методів підсилення, таких як використання вуглецевих наноматеріалів, адаптивних гібридних систем та автоматизованого моніторингу стану каркасу.

Таким чином, параметричний аналіз та методи оптимізації підсилення несучих каркасів дозволяють не лише підвищити їхню міцність і довговічність, а й створити інноваційні, енергоефективні та економічно вигідні КТР.

Загалом, структурна форма, що базується на конкуренції, стимулює процес концептуального проектування та сприяє розвитку інноваційних ідей, які можуть сформувати унікальні та якісні технологічні рішення.



Рис. 1.13. Концептуальна схема параметричного вибору КТР підсилення каркасів

1.3. Аналіз досвіду використання сучасних матеріалів і виробів в конструктивно-технологічних системах підсилення каркасів будівель

У результаті комплексного обстеження конструкцій каркасу будівлі, розроблення дефектних схем, виконання перевірочних розрахунків та інших супровідних процедур постає завдання вибору обґрунтованого, доцільного та високоефективного КТР щодо підсилення каркасу будівлі, яке на пряму залежить від якості існуючих систем вибору та оцінювання варіантів підсилення.

В Україні існує низка нормативних документів, що регулюють реконструкцію та підсилення будівельних конструкцій, зокрема [5, 7, 71-72], а також спеціальні рекомендації з реконструкції [35-38, 46-49, 65-69]. Проте ці документи не формують єдиної уніфікованої КТС вибору та реалізації оптимальних методів підсилення.

Регламентовані нормативами розрахункові процедури здійснюються на основі перевірних розрахунків із урахуванням фактичного стану конструкцій, дефектів, корозійного зношення та чинних будівельних вимог. Проте розрізненість методик оцінки та варіантного проектування створила значні труднощі у процесі реконструкції.

Наприклад, А.С. Білик [73] підкреслює необхідність комплексного підходу до проектування несучих конструкцій, враховуючи екологічні та економічні аспекти. У книзі розроблено методику аналізу життєвого циклу несучих каркасів будівель комерційного призначення, що демонструє переваги металевих конструкцій при будівництві. Запропоновано показники для вибору раціональних і оптимальних рішень та наведено приклади їх визначення на різних рівнях будівельних систем.

Крім того, у "Зеленій книзі" "Параметричне нормування у будівництві" [74] обговорюється необхідність переходу від розпорядчого методу нормування до параметричного, що дозволить встановлювати вимоги до об'єктів будівництва на основі їхніх функціональних характеристик. Це сприятиме усуненню розрізненості методик та підходів у проектуванні та реконструкції будівель.

Вибір розрахункової схеми каркаса проводиться з урахуванням особливостей роботи конструкції. У певних випадках уточнення здійснюється на основі експериментальних випробувань. Відсутність інтегрованої методології оцінки варіантів підсилення призводить до ухвалення рішень та залежності результатів від рівня кваліфікації й досвіду інженера. Це, своєю чергою, знижує якість процесу підсилення.

У нормативних документах України передбачено, що процес ухвалення рішень щодо підсилення конструкцій має базуватися на техніко-економічному

порівнянні варіантів. Зокрема, у ДСТУ Б В.3.1-2:2016 [7] зазначено: "Вибір способу ремонту чи підсилення рекомендується робити на основі техніко-економічного порівняння варіантів з урахуванням: необхідного ступеня збільшення (відновлення) несучої здатності; виключення або мінімізації додаткових пошкоджень (ослаблень) конструкції при виконанні підсилення; можливості реалізації прийнятого способу в конкретних виробничих умовах (пожежо- і вибухонебезпека, хімічна агресивність середовища тощо); обмежень, що накладаються виробництвом, яке функціонує."

Відповідно до ДСТУ Б В.3.1-2:2016, методи підсилення будівельних конструкцій поділяються на три основні групи: без зміни розрахункової схеми, зі зміною розрахункової схеми та зі зміною напруженого стану. Попри наявність такої класифікації, нормативні документи не встановлюють стандартизованого алгоритму вибору конкретного методу підсилення залежно від характеру пошкоджень, умов експлуатації та обмежень реконструкції. Це ускладнює процес ухвалення інженерних рішень, підвищує рівень суб'єктивності та залежність результату від кваліфікації виконавця.

В Україні відсутній окремий державний будівельний норматив, який би безпосередньо регламентував повний перелік методів відновлення та підсилення конструкцій після аварійних впливів або пожеж у вигляді завершеної технологічної процедури. Оцінювання технічного стану пошкоджених елементів і обґрунтування рішень щодо їх відновлення здійснюються на основі загальних вимог пожежної безпеки та надійності, визначених у ДБН В.1.1-7:2016 та ДБН В.1.2-14:2018 [5]. Методичну основу вибору способів ремонту й підсилення несучих конструкцій становлять положення ДСТУ-Н Б В.3.1-2:2016, які визначають загальні підходи залежно від характеру пошкоджень і умов експлуатації.

Розрахунок вогнестійкості конструкцій, що є складовою оцінювання пошкодженого стану та вибору технології ремонту, виконується із застосуванням положень Єврокодів, зокрема ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 [54], ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2 [74], ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2 [51] та інших відповідних

нормативних документів. Таким чином, чинна нормативна база формує систему вимог до безпеки, надійності та розрахункового обґрунтування рішень, однак не забезпечує уніфікованого опису технологій відновлення конструкцій після аварій або пожеж, що зумовлює необхідність їх наукового узагальнення та систематизації в межах конструктивно-технологічного підходу.

Оцінювання дефектів і пошкоджень будівельних конструкцій перед їх відновленням або підсиленням здійснюється відповідно до загальних вимог надійності та безпеки, установлених у ДБН В.1.2-14:2018, а також методичних положень ДСТУ-Н Б В.3.1-2:2016. Водночас чинна нормативна база не містить достатньо формалізованої класифікації ступенів пошкодження конструкцій, що ускладнює обґрунтування вибору між частковим відновленням, підсиленням або повним демонтажем елементів у разі значних ушкоджень. Зазначена проблема набуває особливої актуальності при реконструкції будівель, пошкоджених унаслідок аварійних впливів або бойових дій, де помилка у виборі КТР може призвести до суттєвих технічних і економічних втрат.

Методи підсилення сталевих конструкцій включають установлення додаткових ребер, діафрагм і розпірок, збільшення перерізу елементів, підсилення з'єднань, підведення нових конструкцій і зміну конструктивної схеми, а також збільшення просторової жорсткості. Ці методи описані в нормативних документах, таких як ДСТУ Б В.3.1-2:2016 та ДБН В.2.6-162:2010, проте відсутність єдиної стандартизованої методики для вибору найефективнішого методу підсилення, а також відсутність чіткої методології оцінки ризиків і довготривалих наслідків підсилення, ускладнюють прийняття рішень щодо їх застосування.

Застосування зварних або болтових з'єднань для підсилення конструкцій регулюється низкою нормативних документів, таких як ДСТУ Б В.3.1-2:2016, ДБН В.2.6-162:2010, які містять загальні положення щодо підсилення конструкцій, але не передбачають уніфікованої методики для аналізу довговічності з'єднань.

ДСТУ Б В.3.1-2:2016 [7] містить детальний опис методів ремонту та підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій. У документі розглядається розподіл конструкцій за матеріалами, включаючи залізобетонні, металеві, дерев'яні та кам'яні конструкції. Для кожного типу передбачені відповідні технологічні рішення щодо підсилення та відновлення. Наприклад, для сталевих конструкцій окремий розділ містить класифікацію способів ремонту та підсилення, вимоги до проектування, розрахунку та виконання робіт. Водночас, залізобетонні конструкції мають свої особливості посилення, зокрема, у підкранових балках, вузлах обпирання та інших критичних елементах.

Стандартизація згідно ДСТУ Б В.3.1-2:2016 також передбачає розподіл конструктивних елементів каркасу будівель. Особливу увагу приділено балковим конструкціям, таким як підкранові балки, які часто підсилюються за рахунок нарощування перерізу, застосування металевих або залізобетонних обойм. Колони розглядаються окремо, для них можливе застосування додаткових опорних елементів, а також обойм із залізобетону для покращення несучої здатності. Ригелі, як невід'ємна частина каркасу, також передбачають методи підсилення залежно від умов експлуатації та рівня зносу.

КТР для підсилення конструкцій у ДСТУ [7] поділяються відповідно до матеріалу конструкції. Для залізобетонних елементів застосовують методи нарощування перерізу, додаткове армування, використання залізобетонних сорочок. У випадку сталевих конструкцій широко використовується встановлення підсилюючих металевих елементів, застосування обойм та болтових з'єднань. Для фундаментів передбачено низку технологій підсилення, серед яких буронабивні палі, цементаційне підсилення та інші способи, що забезпечують підвищення несучої здатності основи будівлі.

Важливим аспектом у підсиленні будівель згідно ДСТУ [7] є система прийняття КТР. Вона включає кілька послідовних етапів: проведення комплексного обстеження для визначення технічного стану конструкцій, аналіз ступеня зношеності та вибір відповідного методу підсилення залежно від матеріалу та особливостей об'єкта. Після цього виконується розрахунок та

проектування підсилюючих елементів відповідно до вимог нормативних документів. Завершальним етапом є контроль якості виконаних робіт та приймання об'єкта в експлуатацію, які здійснюється відповідно до ДСТУ EN 1090-2:2019 [8] та ДСТУ EN 1090-1:2014 [76].

ДСТУ Б В.3.1-2:2016, хоча і містить детальні технічні вимоги до ремонту та підсилення несучих конструкцій, має певні обмеження, які не повною мірою враховують сучасні підходи до реконструкції та комплексний аналіз технічних, економічних, екологічних та соціальних факторів, що дозволяє наразі лише оцінити стан конструкцій, а не прогнозувати довгострокову ефективність вибраних рішень. ДСТУ не передбачає багатокритеріальний аналіз можливих методів підсилення, що є важливим для сучасної реконструкції, орієнтованої на сталий розвиток.

Основний акцент у стандарті зроблено на традиційні методи ремонту та підсилення окремих конструктивних елементів без урахування комплексного підходу до організації реконструкційних процесів. Відсутні як чіткі алгоритми декомпозиції каркасу будівлі та системного аналізу причин дефектів, що ускладнює вибір оптимальної стратегії підсилення, так і аналіз технологічності конструктивних рішень по підсиленню.

Розробці систем прийняття КТР щодо підсилення каркасів будівель і споруд, спрямованих на підвищення ефективності, зниження витрат та скорочення термінів виконання робіт, присвячено чимало наукових праць як вітчизняних, так і зарубіжних дослідників. Значний внесок у цю сферу зробили О.С. Молодід [21], Г.М. Тонкачєєв [16, 77, 81], В.В. Савйовський [28, 78], Тугай [79], І.М. Балук [80], Лівінський [81], Яо Сін [82], Д.О. Хохрякова [83], а також зарубіжні науковці, серед яких G. Boscato [84], S.I. Bhuiyan [31], Haeyeon Ryu [30], M. Riley [29] та інші.

У міжнародній практиці напрацьовано ряд сучасних рекомендацій і технічних стандартів, що враховують новітні методи підсилення та спрямовані на забезпечення надійності, довговічності та технологічної доцільності при реконструкції будівельних об'єктів [54, 88-96].

Попри наявні досягнення у сфері розробки систем підсилення, значна кількість проєктів реконструкції демонструє відсутність комплексного підходу до прийняття рішень. Здебільшого, технологічність конструкцій не оцінюється на ранніх стадіях проєктування. Рішення про конфігурацію підсилення приймаються конструкторами без попереднього аналізу трудомісткості, матеріаломісткості та екологічного впливу запропонованих рішень. Як наслідок, уже на етапі реалізації виникає необхідність кардинальної зміни конструктивних рішень, що значно ускладнює реалізацію та підвищує витрати.

Особливої уваги заслуговує той факт, що в існуючих практиках проєктування підсилення не враховується потреба зменшення негативного впливу на довкілля. Залишається актуальним використання методів, що супроводжуються інтенсивними нагрівками, наприклад, газовим зварюванням чи наплавленням, які спричиняють викиди шкідливих речовин і значні енергетичні витрати. У ряді випадків велика кількість зварних з'єднань не тільки ускладнює технологію монтажу, а й знижує надійність підсилених вузлів конструкції.

Зменшення кількості операцій зварювання, у тому числі шляхом оптимізації об'ємів монтажних швів, переходу до альтернативних методів кріплення (механічне з'єднання, болтові з'єднання тощо) або використання матеріалів, які не передбачають застосування зварювальних робіт, повинно розглядатися як один із ключових напрямків підвищення технологічності систем підсилення. Це не лише знижує трудомісткість та вартість монтажу, але й суттєво зменшує енергоспоживання та викиди CO₂ під час виконання робіт, що є критично важливим у контексті сталого розвитку [70, 141].

Попри обов'язкову процедуру оцінки впливу на довкілля (ОВД) для об'єктів зі значними наслідками ССЗ (та її відсутність для об'єктів СС1 і СС2, реновацій без зміни функції будівлі), на практиці такий аналіз часто фрагментарний і не охоплює моделювання енергоспоживання та викидів парникових газів. Проєктування зазвичай не враховує повний життєвий цикл будівлі — від виробництва матеріалів і монтажу до експлуатації, обслуговування та демонтажу. При виборі КТР, зокрема методів з'єднання, організації монтажу,

типів устаткування, питання декарбонізації лишаються поза увагою. Особливо недооцінюється їхній вплив на подальше обслуговування: доступність інженерних систем, частота заміни обладнання, складність ремонтів. Усе це напряму впливає на енерговитрати та обсяги викидів парникових газів у процесі експлуатації.

Таким чином, відсутність цілісного підходу до аналізу вуглецевого сліду на етапі проектування зумовлює неможливість оптимізації екологічних параметрів об'єкта в довгостроковій перспективі. Інтеграція методології оцінки життєвого циклу (LCA — Life Cycle Assessment) у процеси ОВД могла б забезпечити комплексне бачення екологічного впливу проєктів реконструкції та сприяти прийняттю більш сталих рішень [220, 223].

У зв'язку з цим під час планування реконструкції важливо враховувати показники, що охоплюють не лише надійність та технічну доцільність, а й економічну ефективність, екологічну стійкість і соціальну значущість проєкту. Ігнорування таких критеріїв може призвести до нераціонального використання ресурсів, підвищеного навантаження на довкілля та зниження довготривалої ефективності реалізованих рішень.

У цьому контексті впровадження принципів системного проєктування, має передбачати раннє залучення технологів, спеціалістів із монтажу, а також постачальників будівельних ріштувань, допоміжного обладнання та матеріалів. Це дозволяє уникати ситуацій, коли запропоноване конструктором рішення виявляється складним або взагалі неможливим до реалізації без модифікації.

Крім того, сучасна методологія проєктування повинна передбачати розробку повного комплексу документації, включно зі збірними кресленнями, відправочними марками та технологічними картами, що наразі часто ігнорується. Відсутність подібної деталізації спричиняє помилки на етапі виготовлення та монтажу.

З врахуванням вищезазначених проблем, створення ефективної КТС підсилення неможливе без інтегрованого підходу, який передбачає врахування показників технологічності, екологічної безпеки, енерговитратності, а також

ранню координацію між усіма учасниками процесу — від проектувальників до постачальників. Формування таких підходів є основою для створення систем, що не лише забезпечують надійність конструкцій, а й відповідають викликам сталого розвитку.

Залежно від ступеня ушкодження елементів каркасу, металевих чи залізобетонних, необхідно приймати доцільні КТР для їх підсилення. При цьому розрахункову схему каркасу слід визначати з урахуванням особливостей його роботи, а в разі потреби — уточнювати її за результатами випробувань. Перевірні розрахунки проводять з урахуванням виявлених дефектів, корозійного зношення й ушкоджень. Метою підсилення є забезпечення несучої здатності конструкцій та їх нормальної експлуатації в нових умовах, що іноді досягається навіть без підсилення, шляхом зменшення навантаження. Вибір технічного рішення здійснюється на основі порівняння варіантів. Підсилення конструкцій виконується або під навантаженням, або з попереднім розвантаженням, при цьому перший варіант менш трудомісткий і можливий за умови, що напруга не перевищує $0,8R$. Конструктивні схеми підсилення поділяють на збільшення перетину елементів та зміну конструктивної схеми, або поєднання обох підходів. Методи відновлення та підсилення конструкцій обирають з огляду на характер ушкоджень, що класифікуються як слабкі, середні, сильні або повне руйнування [56]. При незначних ушкодженнях застосовують методи локального ремонту, а за середніх та сильних — підсилення або заміну конструкцій.

Усі КТР для підсилення будівельних конструкцій доцільно класифікувати за певними ознаками, зокрема за типом елементів каркасу та матеріалом, з якого вони виготовлені. Такий підхід дозволяє систематизувати наявні методи підсилення та обрати найбільш ефективний варіант для конкретного випадку.

Відома класифікація вертикальних (як колон та вертикальних зв'язків) та горизонтальних (як балок, ферм, прогонів, зв'язків у покритті) елементів каркасів будівель за найпоширенішим типом використовуваного матеріалу із узагальненням типових способів підсилення для кожного виду матеріалу [56]

показує, що характеристика способів за різними ознаками не відповідає принципам побудови структури системи і потребує удосконалення (рис. 1.14).

На основі аналізу технічних звітів з обстежень будівель, проєктів підсилення конструкцій, технічної літератури, а також опитування профільних фахівців та практиків встановлено, що найбільш поширеним способом підсилення металевих конструкцій є встановлення додаткових ребер жорсткості, діафрагм та розпірок [21, 56]. Для залізобетонних конструкцій найчастіше застосовуються методи збільшення перетинів шляхом одно - або двобічного нарощування залізобетоном, а також влаштування розвантажувальних елементів (розподільних плит, балок, ферм тощо).

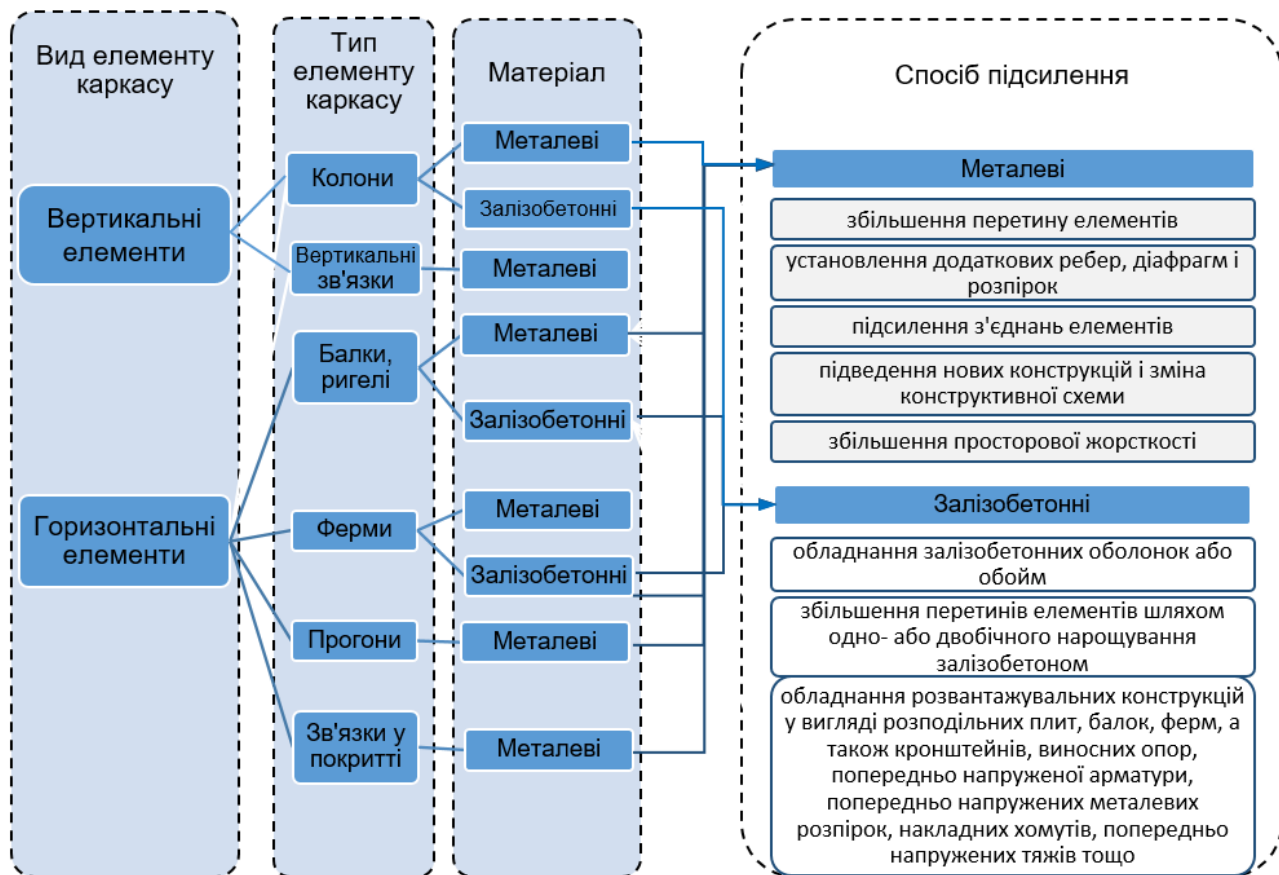


Рис. 1.14. Класифікація вертикальних і горизонтальних елементів каркасів будівель за матеріалом (метал, залізобетон) з узагальненням типових способів підсилення для кожного з них.

Аналіз наявних нормативних документів [5, 7, 52, 69], практики проектування та реалізованих заходів з підсилення конструкцій показує, що ефективними є ті методи, які спрямовані на підвищення несучої здатності, жорсткості та довговічності конструктивних елементів [32, 55, 56, 97-99].

Розподіл частоти застосування основних способів підсилення металевих та залізобетонних конструкцій подано на рисунках 1.15 та 1.16 відповідно.

Найчастіше виявляється необхідність підсилення балок (ригелів) та колон у каркасних системах будівель [21].

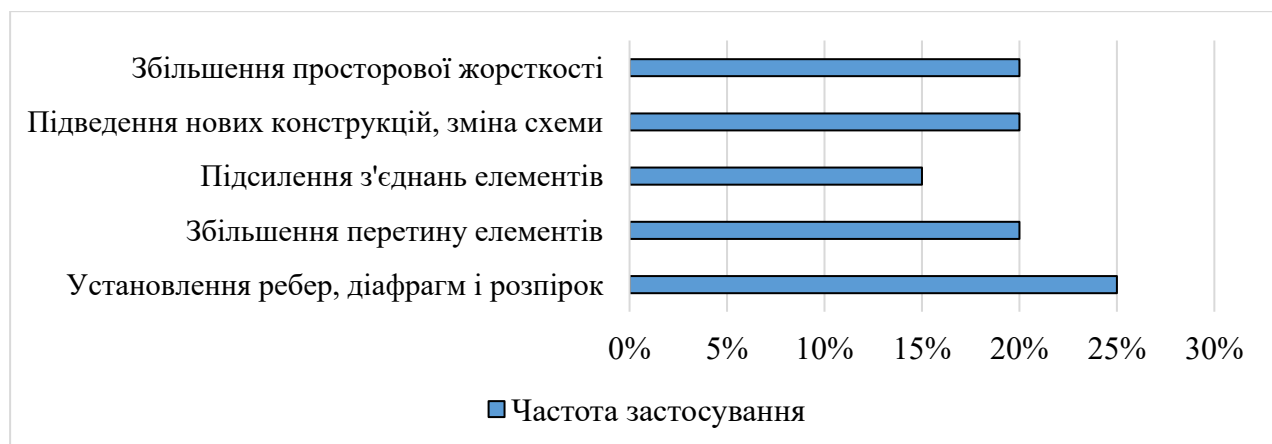


Рис. 1.15. Частота застосування основних способів підсилення металевих конструкцій

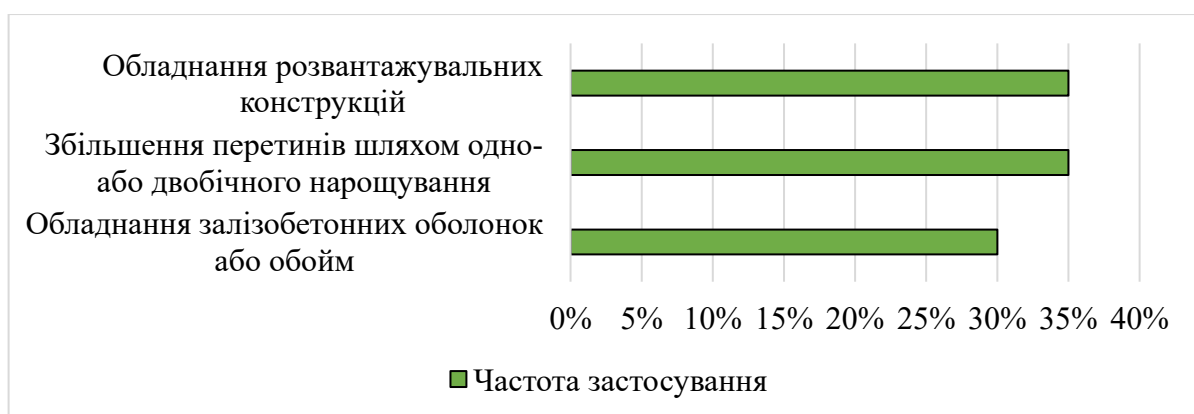


Рис. 1.16. Частота застосування способів підсилення залізобетонних конструкцій.

Підсилення балок та прогонів є важливою частиною ремонту конструкцій, що піддаються додатковим навантаженням або ушкодженням. Основні КТР для

підсилення горизонтальних елементів, викладені в роботах таких вчених, як Топчий В.Д. [35-36], Голышев А.Б. [64], Тонкачєєв Г.М. [38], Мальгамов А.И. [100], а також нормативних документах та стандартах [69, 43, 49, 46, 47].

Для підсилення залізобетонних балок використовують кілька основних методів, зокрема нарощування перерізу та застосування арматурних східців. Один з найпоширеніших способів – це нарощування залізобетонних конструкцій зверху або знизу, або влаштування «сорочок» для стиснених зон (рис. 1.17).

Такі методи дозволяють збільшити несучу здатність балки за рахунок додаткового бетону та арматури.

У разі пошкодження стінки металевої балки можна встановити додаткові ребра жорсткості, що обрамляються поздовжніми ребрами (рис. 1.18). Таке підсилення допомагає збільшити стійкість балки до деформацій за рахунок посилення її геометричних характеристик.

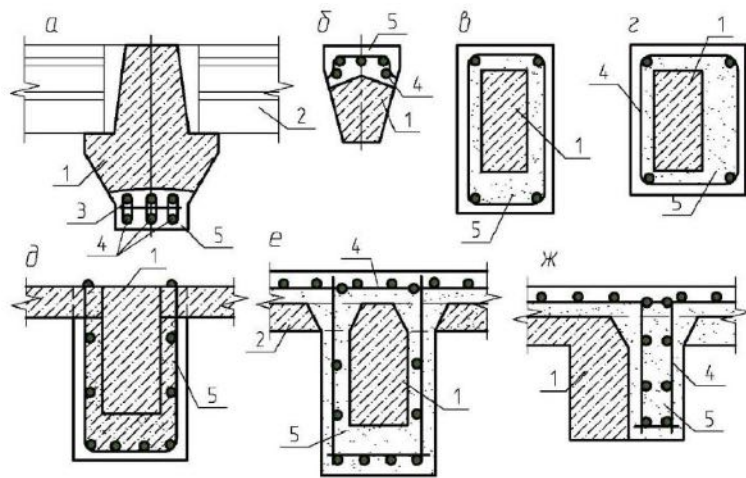


Рис. 1.17. Схеми перетинів балок, посиленних залізобетоном [56]:

а – нарощуванням знизу; б – нарощуванням зверху; в, г – обоймою; д – «сорочкою»; е – «сорочкою» з додатковою плитою (обойма); ж – нарощуванням збоку з плитою поверху; 1 – балка; 2 – плита; 3 – наявна арматура; 4 – арматура підсилення; 5 – бетон підсилення

Металеві балки також потребують підсилення в разі ушкоджень або необхідності збільшення їх несучої здатності. Один із методів підсилення –

нарощування перерізу металевими елементами. Це може бути застосування зварених металевих накладок або ребер жорсткості, що прикріплюються до стінки балки (рис. 1.11). Такі накладки можуть бути виконані з різних металів, що дозволяє підлаштовувати їх під конкретні вимоги до міцності конструкції.

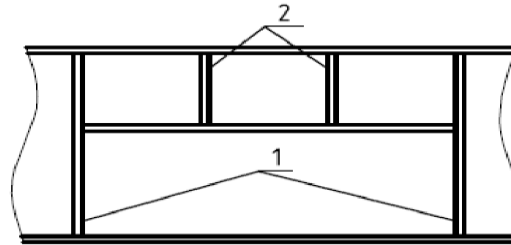


Рис. 1.18. Підсилення стінки балки додатковими ребрами [56]: 1 – наявні ребра жорсткості; 2 – додаткові короткі ребра жорсткості, що обрамлені поздовжнім ребром

Якщо конструкція зазнала скручування або погнутості, ці дефекти можна виправити шляхом застосування металевих пластин або додаткових зв'язків із тяжів та розпірок, які знижують вигини (рис. 1.19, а). Підсилення таких конструкцій забезпечує стабільність і зменшує подальші деформації.

Слід враховувати, що найбільш раціональним є таке підсилення, за якого при однаковій площі додаткового матеріалу забезпечується більше значення моменту опору W_x . Це дозволяє досягти максимального ефекту при мінімальних витратах матеріалу. Зменшення маси балки можливе шляхом зміни розмірів її перерізу по довжині відповідно до зміни величини згинального моменту (рис. 1.19, б). Оскільки епюра згинального моменту в загальному випадку має криволінійний обрис, теоретично раціональний переріз повинен змінюватися безперервно. Проте з технологічних міркувань безперервну зміну замінюють ступеневим нарощуванням товщини або висоти шляхом приварювання чи приклепування додаткових горизонтальних листів у зонах максимальних моментів. При цьому формується так звана епюра матеріалу, ординати якої дорівнюють добутку моменту опору поперечного перерізу на допустиме напруження.

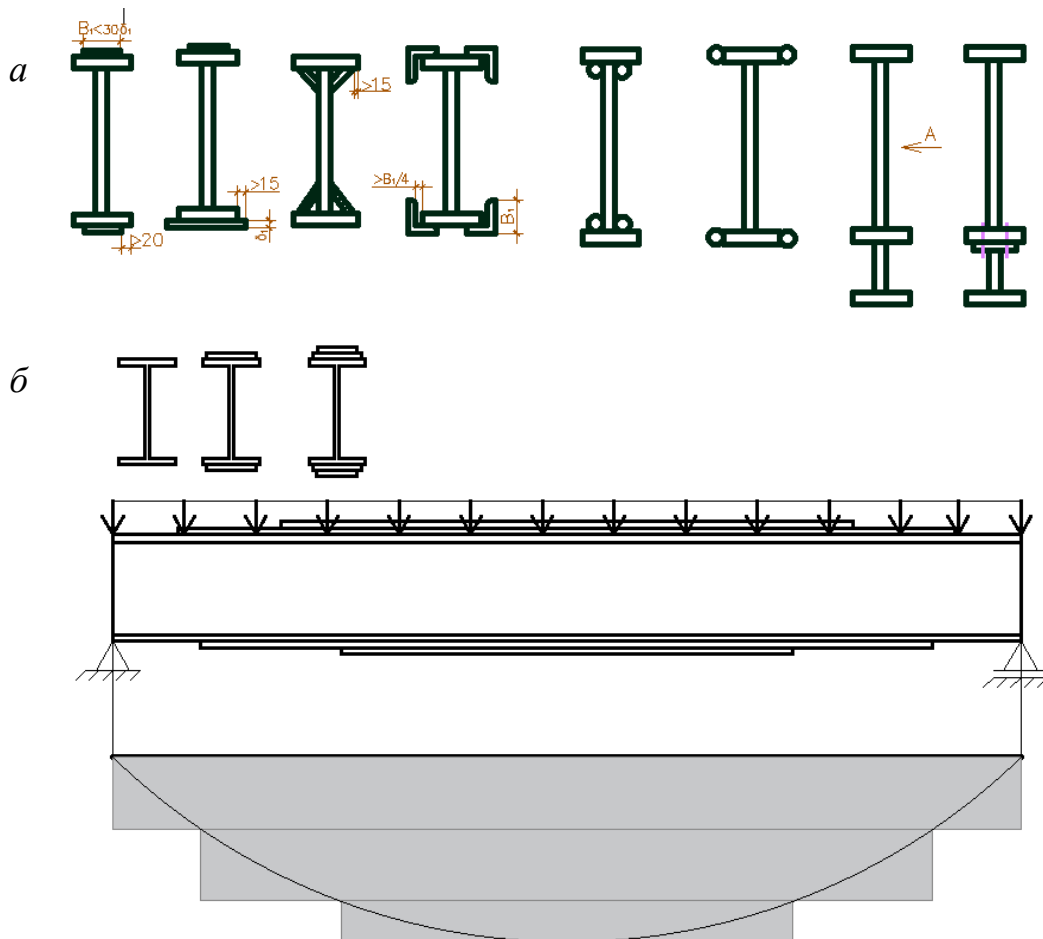


Рис. 1.19. Раціоналізація підсилення згинальних елементів: а – типові конструктивні рішення ступеневого нарощування перерізу; б – раціональна зміна перерізу балки по довжині відповідно до епюри згинального моменту

Особливу увагу приділяють підсиленню стиснутих зон балок, де виникають максимальні нормальні напруження та існує небезпека втрати стійкості. Як правило, це реалізується шляхом улаштування обойм або встановлення додаткових металевих елементів у зонах найбільших напружень, що забезпечує підвищення жорсткості та запобігає локальному руйнуванню (рис. 1.20).

Окрему увагу приділяють підсиленню опорних ділянок балок, де виникають максимальні значення поперечної сили. У цих зонах підсилення спрямоване на запобігання розвитку похилих тріщин, зминанню стінки та втраті місцевої стійкості. Ефективним рішенням є влаштування хомутів або стяжних систем, що охоплюють переріз балки та забезпечують обмеження деформацій у приопорних зонах (рис. 1.21). Підсилення може виконуватися із затягуванням гайками або зі

стягуванням гілок попарно, що дозволяє регулювати ступінь обтиснення та забезпечувати сумісну роботу підсилюючих елементів з існуючою конструкцією. Такі рішення підвищують несучу здатність елемента за поперечною силою, покращують тріщиностійкість та забезпечують стабільну роботу балки в приопорних зонах.

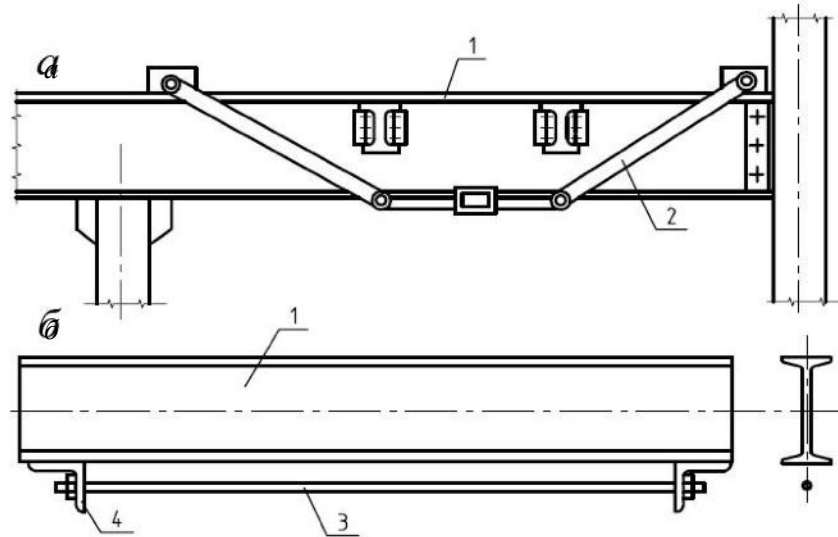


Рис. 1.20. Приклади підсилення балок [56]: *а* – влаштуванням шпренгеля, розташованого у межах висоти балки; *б* – підведенням попередньо напруженої зтяжки; 1 – двотавр; 2 – шпренгель; 3 – зтяжка; 4 – опорні кутики

У розтягнутих зонах підсилення має на меті підвищення несучої здатності шляхом збільшення ефективної площі розтягнутої частини перерізу або введення додаткових елементів, що сприймають розтяг.

Для металевих балок застосовують накладки, додаткові листи, високоміцні болтові з'єднання або зварні елементи (рис. 1.19).

Для залізобетонних конструкцій ефективними є встановлення попередньо напружених стержнів, підведення зтяжок або використання зовнішнього армування, що забезпечує зменшення прогинів і перерозподіл зусиль (рис. 1.20). Підсилення розтягнутих зон залізобетонних балок також може здійснюватися шляхом нарощування перерізу або встановлення додаткових металевих елементів (рис. 1.22, рис. 1.23).

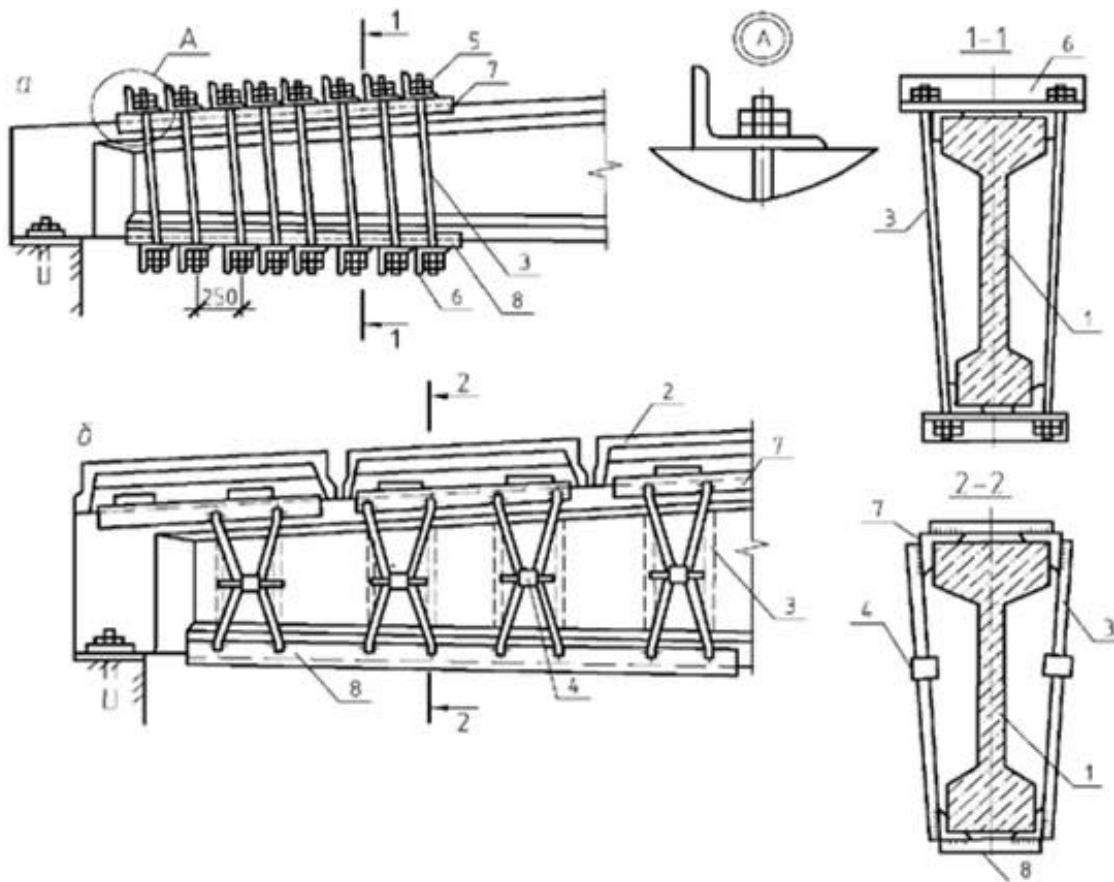


Рис. 1.21. Підсилення опорних ділянок балок хомутами [56]: *a* – із затягуванням гайками; *б* – зі стягуванням гілок попарно; 1 – балка; 2 – плити; 3 – хомути; 4 – стяжні пристрої; 5 – гайка; 6 – опорні кутики; 7, 8 – поздовжні підкладні кутики зі стяжками

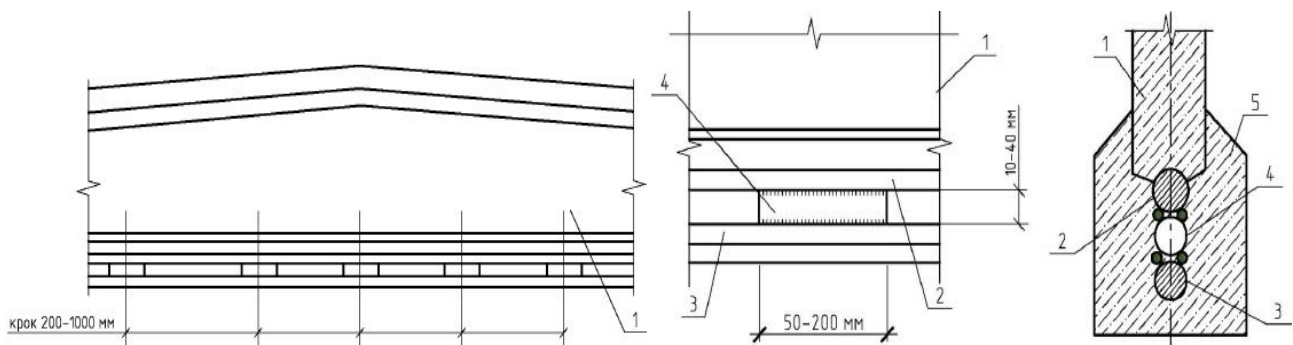


Рис. 1.22. Підсилення розтягнутої балки приварюванням додаткової арматури через коротуни [56]: 1 – балка; 2 – арматура підсилюваної балки; 3 – додаткова арматура; 4 – коротун зі смугової або круглої сталі; 5 – бетонування

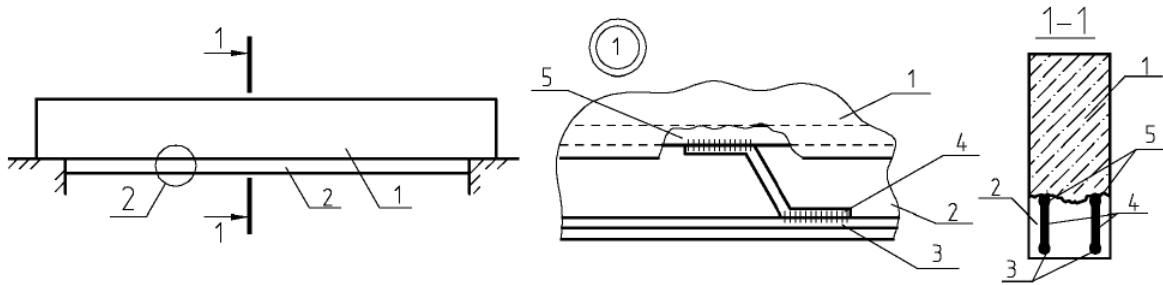


Рис. 1.23. Підсилення балок нарощуванням знизу за значного збільшення їх несучої здатності [56]: 1 – балка, яку підсилюють; 2 – залізобетонне нарощування; 3 – поздовжня арматура підсилення; 4 – арматурні відгини; 5 – оголена арматура балки (ділянки з кроком через 1,0 м)

У випадках, коли зварювання або безпосереднє нарощування перерізу є неможливим, застосовують підкосні системи або підвіски, що дозволяють зменшити згинальні зусилля та частково розвантажити балку. При значних ушкодженнях або деформаціях, зокрема скручуванні чи наявності тріщин, використовують накладки або зварювання. За необхідності балку можуть розрізати для виправлення геометрії з подальшим відновленням цілісності (рис. 1.24). Важливо забезпечити правильну послідовність виконання робіт, попереднє розвантаження елементів та врахування технологічних обмежень, зокрема під час виконання зварювання у стельовому положенні. Конструктивні рішення повинні гарантувати сумісну роботу існуючих і підсилених елементів та їхню довготривалу експлуатаційну надійність [82].

Для виправлення тріщин у стиснених зонах застосовують підсилення за допомогою накладок або підбірки арматурних стержнів, приварених до конструкції. Крім того, для ремонту тріщин в бетоні та залізобетонних конструкціях широко використовується технологія ін'єктування тріщин. Цей метод полягає в тому, що спеціальні полімерні або цементні суміші вводяться в тріщини під тиском, що дозволяє відновити цілісність конструкції та запобігти подальшому поширенню тріщин. Ін'єктування може бути використане як для дрібних тріщин, так і для більших ушкоджень, забезпечуючи герметизацію та підвищення міцності матеріалу.

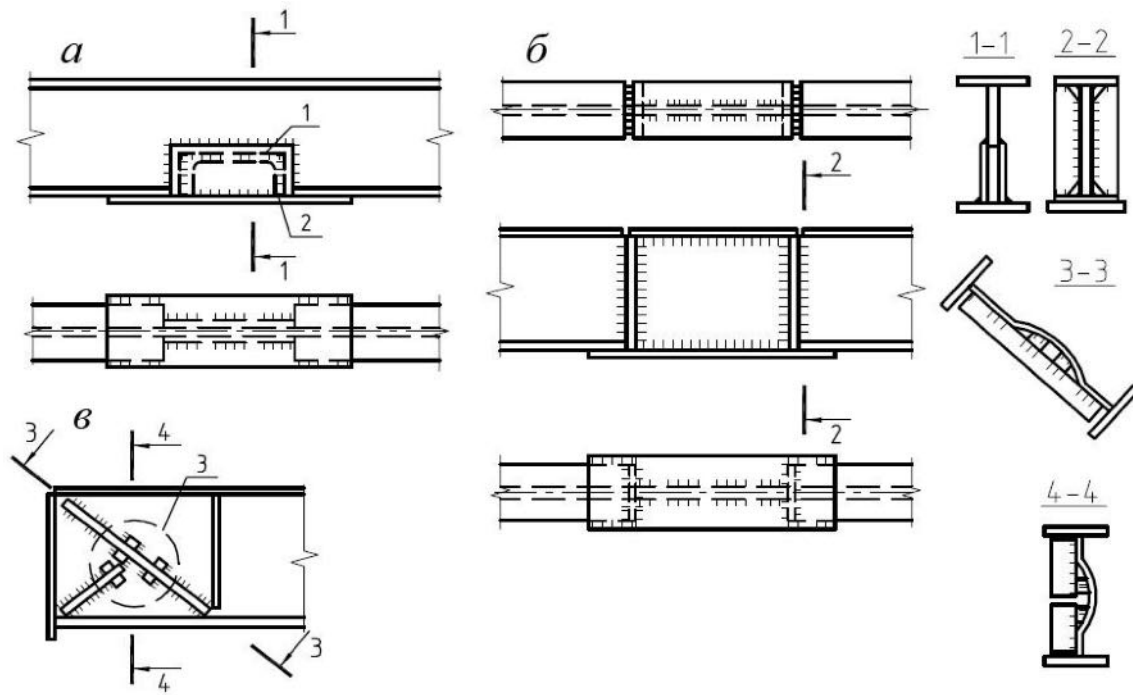


Рис. 1.24. Виправлення пошкоджень зварних балок [56]: *а* – розрив нижнього пояса і пробоїни в стінці; *б* – заміна пошкодженої ділянки балки; *в* – підсилення вм'ятини в стінці біля опори; *1* – лінія обрізу; *2* – лінія обриву; *3* – контур вм'ятини

Якщо ушкодження балок неможливо виправити, використовують заміну пошкоджених ділянок або підсилення шляхом підсилення зовнішніми металевими конструкціями (обоймами чи хомутами), що працюють разом з основною балкою (рис. 1.21).

У випадках, коли потрібно значно підсилити балку, застосовуються додаткові конструкції, такі як шпренгелі або двоконсольні балки, підведенням металевих підтримувальних балок або ферм (рис. 1.25, 1.26), що можуть забезпечити додаткову підтримку і допомогти у зменшенні прогину та збільшенні несучої здатності (рис. 1.27, рис. 1.28). Ці конструкції дозволяють рівномірно розподілити навантаження, що діє на балку.

Попередньої напруги шпренгелів можна досягти стяжними муфтами (фаркопфами), електротермічним нагріванням з контролем подовжень із загвинчуванням упорних і опорних гайок або стягуванням між собою парних гілок (за способом Н.М. Онуфрієва з контролем кута перегину гілок (див. рис.

1.28)). При цьому величини необхідної деформації слід призначати з урахуванням втрат напруги від обминання у зчленуваннях: по 1 мм у зчленуванні металу з металом і по 3 – 5 мм у зчленуванні металевих деталей з бетоном. Перевіряти напруги попереднього натягу під час монтажу рекомендують за допомогою вимірювання деформацій подовження гілок шпренгеля прогиноміром або індикатором на базі 1000 мм (подовженню 1 мм відповідає напруга $19,62 \text{ кН/см}^2$, його можна виміряти штангенциркулем з точністю 0,1 мм, тобто контролювати напругу з точністю $1,96 \text{ кН/см}^2$, а індикатором з точністю 0,01 мм – відповідно, $0,2 \text{ кН/см}^2$).

Підсилення ферм і зв'язків здійснюється шляхом додавання нових елементів, зміни конструктивної схеми або збільшення перерізів існуючих деталей. Основними способами є встановлення додаткових стержнів у ґратах, підкосів для зменшення розрахункової довжини стиснених елементів, шпренгелів і підвісок для зменшення місцевого вигину поясів, а також обладнання додаткових опор чи включення вантових і висячих систем (рис. 1.29). Для збільшення жорсткості вузлів використовують косинки, коротуни або стикові накладки. Ефективним є підсилення за допомогою попередньо напружених затягувань (рис. 1.30).



Рис. 1.25. Підсилення залізобетонної підкранової балки підведенням металевих коробчастих елементів. ВАТ «Донецькгірмаш» [56]



Рис. 1.26. Підсилення труби газоходу сталеплавильного цеху ТОВ «Електросталь» через корозію металу й утворення тріщин методом підведення несучих ферм під конструкцію труби [56]

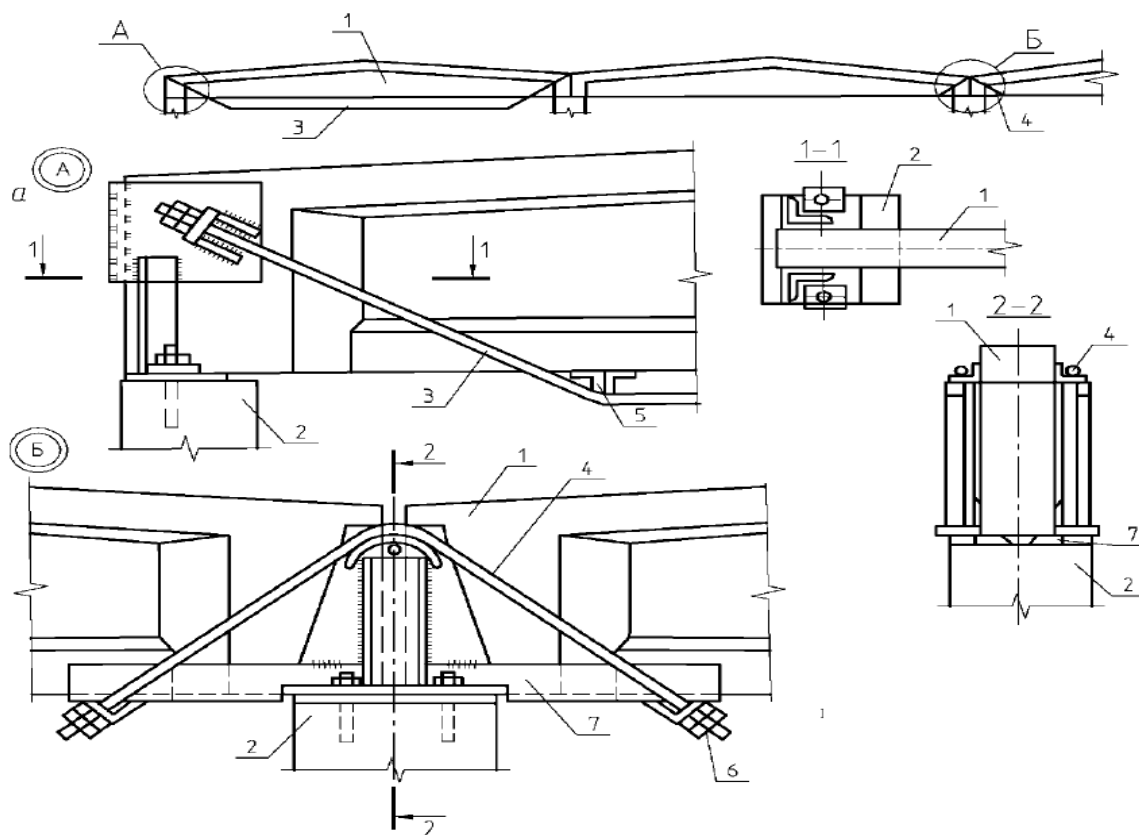


Рис. 1.27. Підсилення балок покриттів підпружними системами [56]: *а* – шпренгелем; *б* – двоконсольною фермою; *1* – балка; *2* – опора; *3* – шпренгель (тяги); *4* – двоконсольна ферма; *5, 6* – упори; *7* – кутик

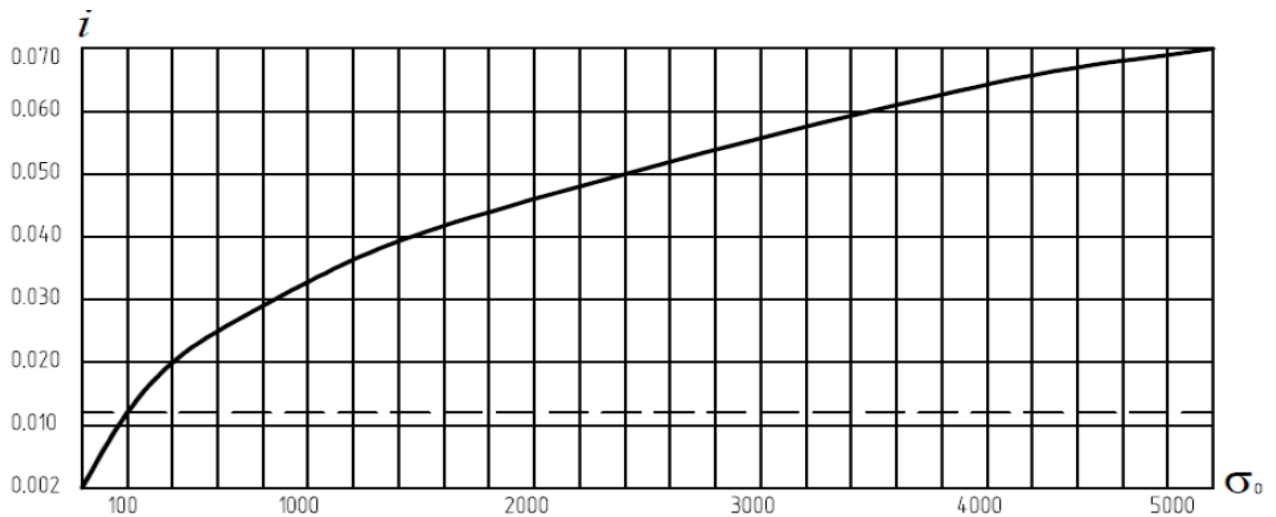


Рис. 1.28. Графік залежності напружень від кута нахилу гілок сталевих розпірок (під час їх випрямлення) або зтягувань (під час їх відтягування від прямолінійної форми) (пунктиром вказано нульову лінію у нехтуванні зростанням напруги від $i = 0$ до $i = 0,01$) [56]

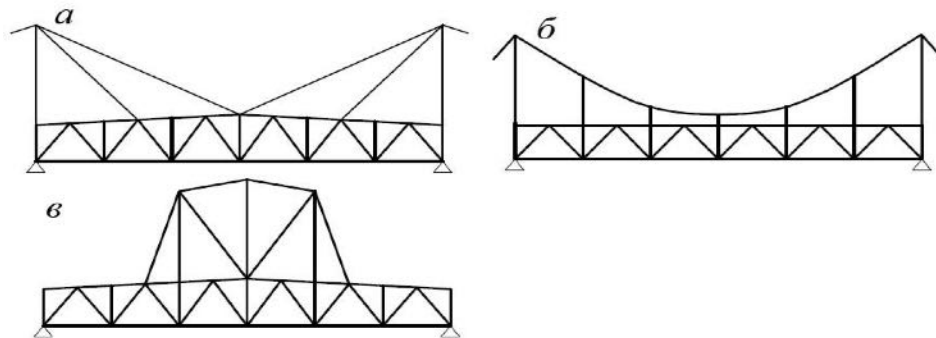


Рис. 1.29. Схеми підсилення ферм [56]: *a* – влаштуванням додаткової вантової системи; *б* – влаштуванням додаткової висячої системи; *в* – включенням ліхтаря в загальну роботу ферми

У разі пошкодження елементів ферм (викривлення, тріщини, прогини, розриви) перед підсиленням обов'язково знімають навантаження. Відновлення виконується шляхом виправлення, заміни ушкоджених частин або підсилення додатковими деталями (рис. 1.31). Якщо деформації значні, застосовують вставки або замінюють частини елементів, зберігаючи загальну геометричну схему. Підсилення центрально-стиснених і розтягнутих елементів виконується з

урахуванням положення центра ваги та правил зварювання для забезпечення надійності конструкції.

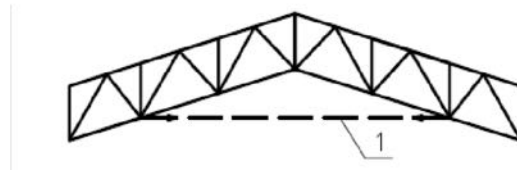


Рис. 1.30. Підсилення ферми додатковою затяжкою [56]: 1 – підсилювальна попередньо напружена затяжка

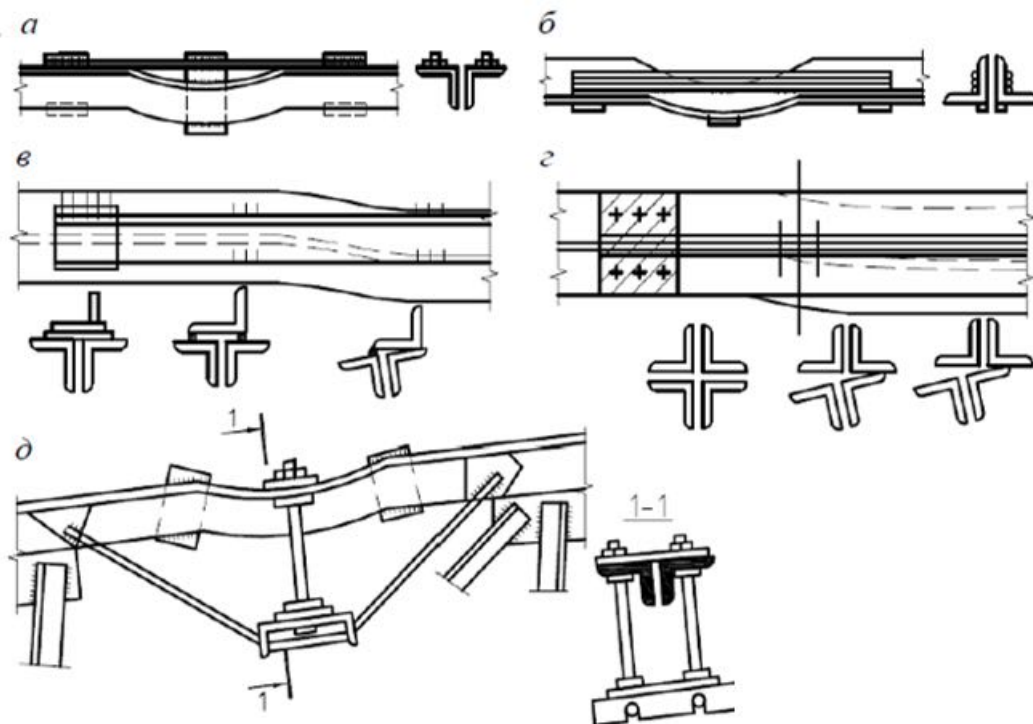


Рис. 1.31. Підсилення скривлених сталевих елементів [56]: а – у вертикальній площині; б – у горизонтальній площині; в – зігнутих у горизонтальній площині; г – зігнутих у вертикальній площині; д – підсилення шпренгелем

На рис. 1.32 наведено варіант підсилення стійки ферми, що втратила стійкість від перевантаження снігом.

Підсилення залізобетонних колон здійснюється шляхом улаштування обойм, які можуть бути виконані у вигляді залізобетонних конструкцій із поздовжньою та поперечною арматурою або зі спіральною обмоткою (рис.1.33). Товщина обойм визначається розрахунками залежно від необхідного ступеня

підсилення і становить 50–300 мм. Арматура добирається згідно з розрахунковими навантаженнями: діаметр поздовжніх стержнів — не менше ніж 16 мм (для стислих зон), поперечних — не менше 6 мм з кроком, що не перевищує 200 мм. Для забезпечення надійного зчеплення обійми з колоною поверхню останньої готують шляхом насічки та промивання.



Рис. 1.32. Стійки ферми, перевантажені снігом, підсилені додатковим елементом. Цех № 24 ВАТ «Донецькгірмаш» [56]

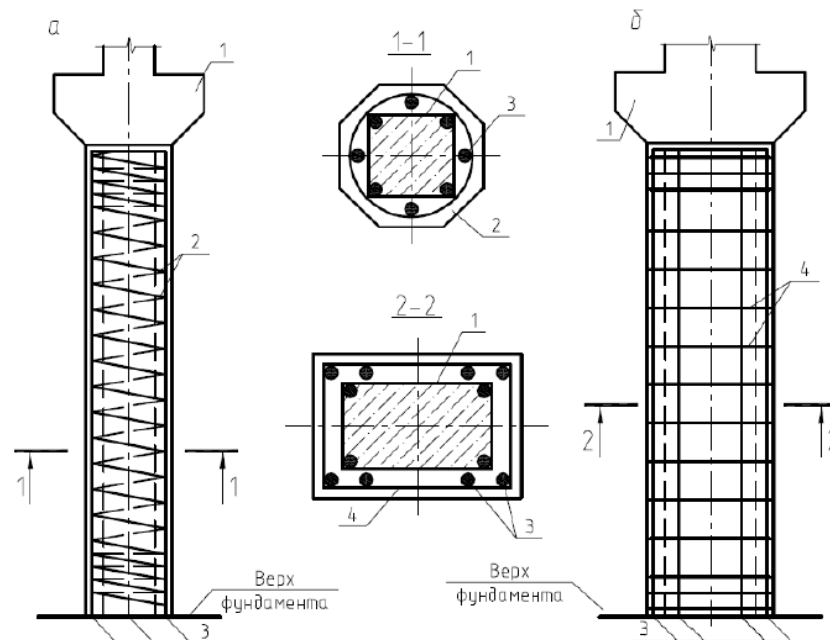


Рис. 1.33. Підсилення колон залізобетонними обіймами [56]: а – армування спіраллю; б – звичайними хомутами; 1 – колона; 2 – спіраль; 3 – поздовжня арматура; 4 – хомути.

У випадках значних навантажень або пошкоджень застосовують попередньо напружені металеві розпірки (рис.1.34), які встановлюються з зовнішнього боку колони. Розпірки складаються з куточків і з'єднувальних планок, що передають зусилля через монтажні болти на опорні елементи. Для забезпечення сумісної роботи старої та нової арматури використовують приварювання через спеціальні деталі з інтервалом 500–1000 мм. Такі методи підсилення дозволяють значно підвищити несучу здатність колон і забезпечити їхню надійну роботу в експлуатації.

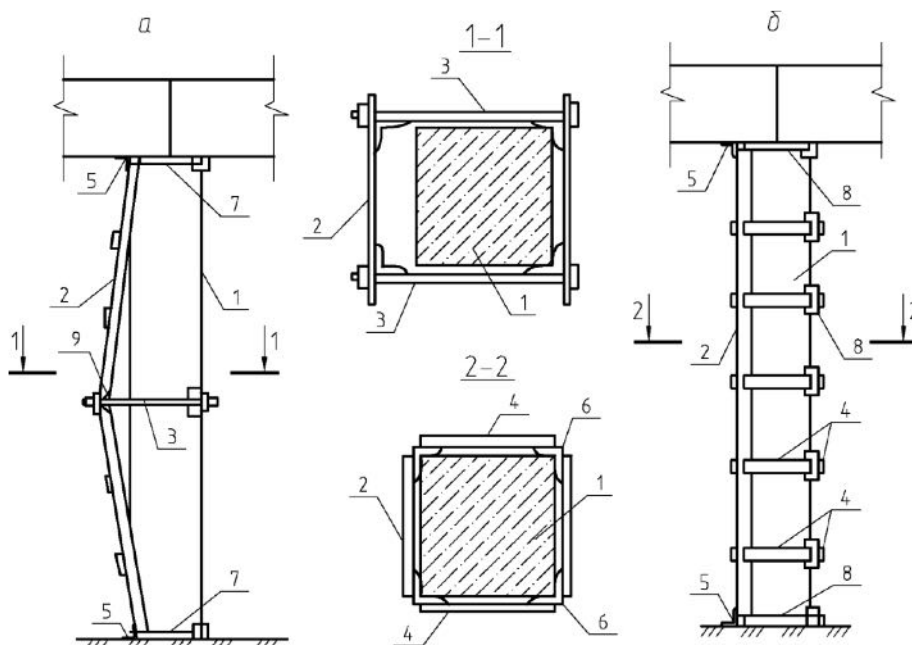


Рис. 1.34. Установка однобóчных распóрок [56]: *а* – період монтажу, *б* – проектне положення; 1 – колона, яку підсилюють; 2 – розпірка з кутикових планок; 3 – натяжні монтажні болти; 4 – з'єднувальні планки, які приварюють після установлення розпірки; 5 – опорні кутики; 6 – кріпильні кутики; 7 – кріпильні монтажні болти; 8 – кріпильні стержні, які встановлюють замість монтажних болтів; 9 – виріз у бічній полиці кутика в місці його прогину під час монтажу (після установлення в проектне положення заварено накладкою)

Підсилення сталевих стиснених стержнів (стійок, колон) здійснюється шляхом збільшення перетину в таких випадках: коли тимчасове навантаження становить не менше 40% від повного і може бути відсутнім під час підсилення,

або якщо неможливо застосувати попередньо напружені елементи. Рекомендовані схеми підсилення центрально-стиснених стійок наведено на рис. 1.35. Під час вибору схеми підсилення максимально збільшують радіуси інерції перетину.

Для позацентрово стиснених стержнів рекомендується використовувати несиметричну схему підсилення зі зсувом центру ваги перетину у бік початкового ексцентриситету (рис. 1.35, *г*).

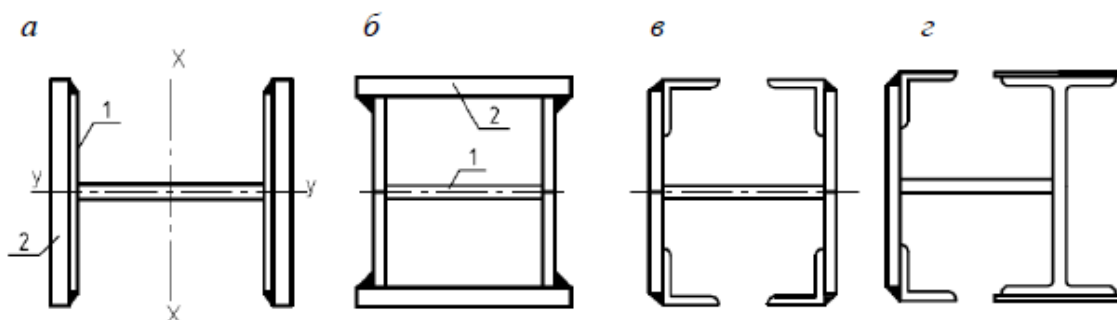


Рис. 1.35. Підсилення колон суцільного перетину [56]: *1* – старий перетин;
2 – підсилювальні елементи

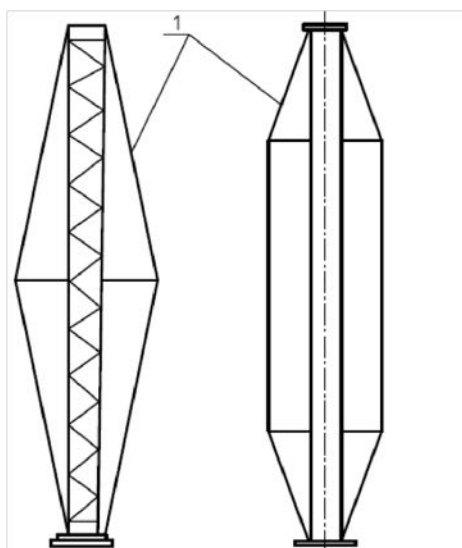


Рис. 1.36. Підсилення стійок попередньо напруженими шпренгелями [56]:
1 – попередньо напружені шпренгелі

Для підсилення колон можуть використовуватись попередньо напружені шпренгели (рис. 1.36), додаткові стійки (рис. 1.37, *а*), відтяжки (рис. 1.37, *б, в*), а

також тверді горизонтальні зв'язувальні диски (рис. 1.37, *г*). У випадку пошкодження колон, можливе відновлення за допомогою бетонування внутрішнього простору колон (рис. 1.38) або встановлення дерев'яних елементів підсилення для збільшення жорсткості (рис. 1.39).

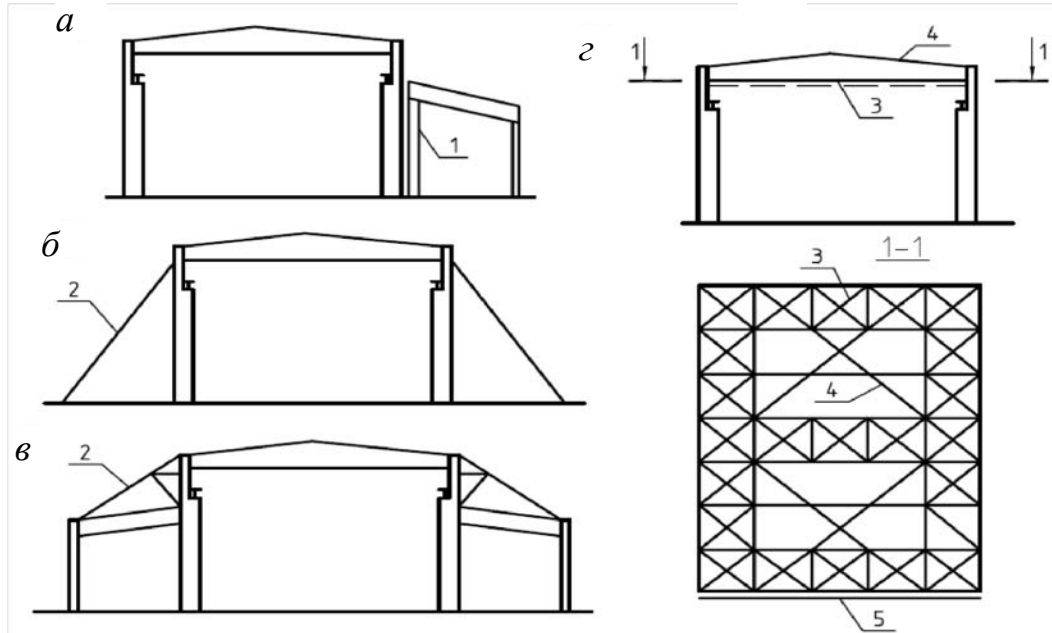


Рис. 1.37. Схеми підсилення колон каркаса зміною статичної схеми [56]: *а* – встановленням додаткових стійок; *б, в* – влаштуванням відтяжок; *г* – створенням по нижніх поясах ферми жорсткого зв'язувального диска; 1 – стійка підсилення; 2 – відтяжка; 3 – наявні горизонтальні зв'язки по нижніх поясах ферм; 4 – горизонтальні в'язі підсилення; 5 – торцевий фахверк

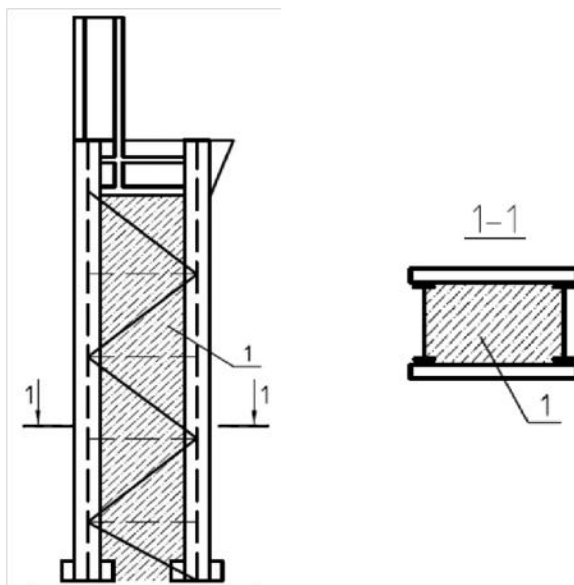


Рис. 1.38. Підсилення колон бетонуванням за викривлення гілок [56]: 1 – бетон

Підсилення з'єднань елементів здійснюється шляхом зварювання та наплавлення нових шарів, це, призводить до збільшення енергетичних витрат і екологічного впливу через високі температури зварювання та додаткові сировину й матеріали (зварювальний дріт, електроди, більше металу, допоміжні матеріали). Ці процеси вимагають великих енергетичних ресурсів на транспортування та обробку цих матеріалів., що часто пов'язано з викидами CO₂, особливо коли енергетичні джерела не є відновлювальними.

Особливо важливо враховувати вплив підсилення на подальше технічне обслуговування: ускладнений доступ до з'єднань ускладнює майбутні ремонти з обслуговування, часта заміна обладнання чи складні ремонти можуть призводити до підвищеного енергоспоживання та зростання викидів під час експлуатації. Відсутність цілісного підходу до оцінки таких рішень з позиції декарбонізації та сталого розвитку обмежує можливості для оптимізації екологічних характеристик будівлі. Наприклад, використання високоміцних болтів для з'єднань може знизити потребу в зварювальних роботах і зменшити енергоспоживання, оскільки болти встановлюються без нагріву і забезпечують триваліший термін служби конструкцій.

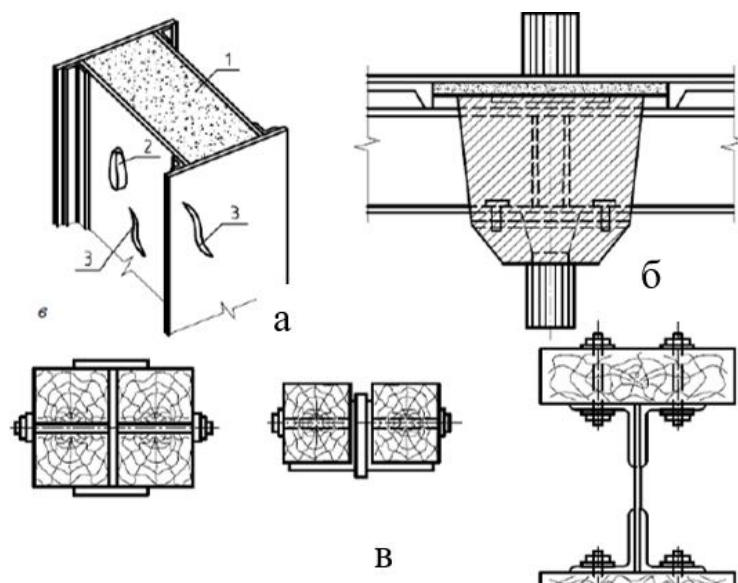


Рис. 1.39. Підсилення пошкоджених сталевих колон [56]: *а* – заповненням порожнини колони бетоном; *б* – влаштуванням залізобетонної капітелі; *в* – прикріпленням дерев'яних брусів; *1* – бетон; *2* – пробоїна; *3* – тріщина

Інтеграція аналізу вуглецевого сліду технологічних рішень при створенні КТС під час реконструкції є необхідною умовою для переходу до низьковуглецевої реконструкції та забезпечення якості підсилення каркасних будівель.

Одним із найперспективніших напрямів у сфері підсилення будівельних конструкцій є застосування технології зовнішнього армування композитними матеріалами. Цей метод дає змогу суттєво підвищити несучу здатність залізобетонних, металевих, кам'яних і дерев'яних конструкцій, водночас покращуючи їхню довговічність, корозійну стійкість і загальну надійність [97-98].

Практика реконструкції та ревіталізації будівель демонструє зростаючу актуальність цих процесів, оскільки вони дозволяють продовжити експлуатаційний термін споруд, зокрема у разі зміни їхнього функціонального призначення [84]. Окрім економічної доцільності, важливою залишається також культурна складова — збереження історичних архітектурних пам'яток і створення комфортних умов для проживання та роботи.

У контексті екологічної безпеки та сталого розвитку особливої уваги при реконструкції заслуговує використання сучасних матеріалів, таких як FRP (волоконно-армовані полімери), які стають гідною альтернативою традиційним сталевим конструкціям. Їхні переваги — висока міцність при значно меншій вазі, стійкість до корозії, низький рівень технічного обслуговування та можливість вторинної переробки. FRP також мають менший екологічний слід у виробництві завдяки пултрузійним технологіям, що потребують менше енергії та генерують менше викидів порівняно з металами. Особливо ефективними ці матеріали виявляються в ущільнених умовах міського середовища, де важливо зменшити габарити конструкцій та мінімізувати монтажний простір. Їхня легкість дозволяє суттєво спростити транспортування та збирання елементів на об'єкті.

Водночас в Україні досі переважають традиційні, трудомісткі методи підсилення, які збільшують вагу конструкцій і можуть вимагати тимчасового відселення мешканців або призупинення виробництва. Натомість використання

композитних матеріалів забезпечує не лише надійність і довговічність, а й є економічно обґрунтованим рішенням.

Композитні матеріали повністю відповідають сучасним трендам розвитку будівельних технологій, сприяючи підвищенню співвідношення міцності до ваги конструкцій, зменшенню загальної маси споруд та покращенню їх стійкості до динамічних навантажень.

Традиційні методи підсилення актуальні, але не завжди підходять для історичних будівель, де важливо зберегти архітектурний вигляд. У таких випадках композитні матеріали відкривають можливості для зміцнення конструкцій без значного втручання в їх зовнішній вигляд [55].

Система підсилення на основі композитних матеріалів включає спеціальні стрічки або листи з вуглецевих, арамідних, базальтових і скловолокон, які приклеюються до конструктивних елементів за допомогою високоефективних клеїв. Для забезпечення надійності з'єднання також застосовують ремонтні суміші, що усувають дефекти основної конструкції. Зовнішнє армування композитами ефективно для підсилення колон, опор мостів, естакад, консолей, ферм, плит та оболонок. Фіброармовані системи (ФАС) можуть використовуватися для поздовжнього й поперечного армування стержневих елементів, а також створення підсилювальних оболонок.

Максимальна робоча температура ФАС не повинна перевищувати температуру склування полімерної матриці та клею (60–150 °C). Оптимальний рівень підсилення конструкцій за допомогою ФАС становить 10–60% від їхньої початкової несучої здатності. При цьому система підсилення може застосовуватися для конструкцій із бетону, міцність на стискання яких становить не менше ніж 15 МПа. Це обмеження не стосується стиснених і позацентрово стиснених елементів, де головну роль відіграє механічний зв'язок обійми з конструкцією.

Армований волокном полімер FRP (Fibre-reinforced polymer) – це композитний матеріал, виготовлений з полімерної матриці, армованої волокнами (рис.1.40). Волокна, як правило, скляні, вуглецеві, базальтові або арамідні, хоча

іноді використовуються й інші волокна, такі як папір, дерево або азбест. Властивості різних волокон та типової сталі наведені на рис.1.40.

Необхідність використання FRP для підсилення будівельних конструкцій зумовлена механічними властивостями матеріалу, такими як високе відношення міцності до ваги, корозійна стійкість тощо (табл. 1.4).



Рис.1.40. Зображення армованого волокном полімеру FRP

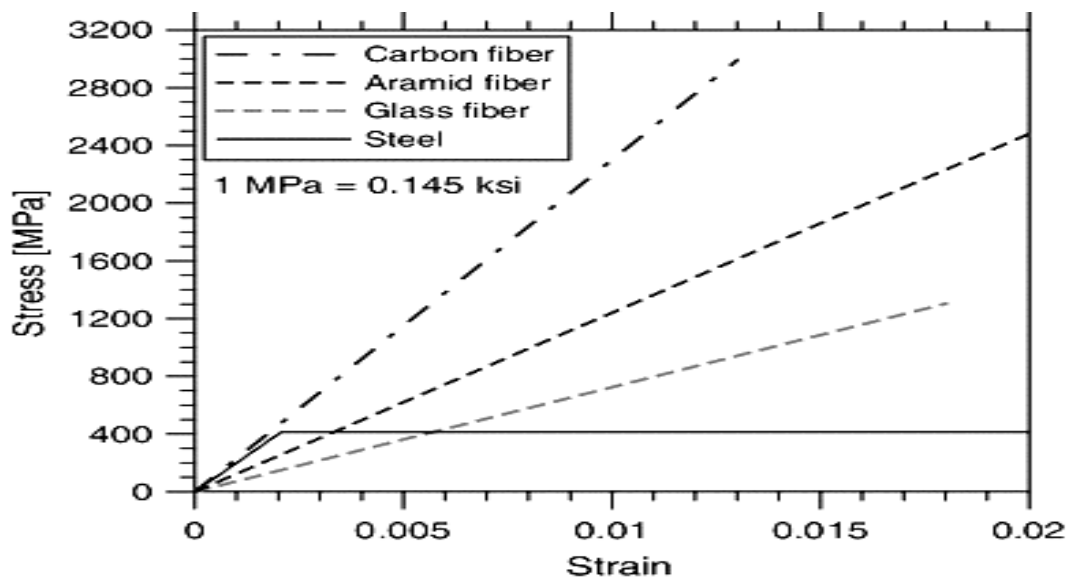


Рис.1.41. Властивості різних волокон і типової сталі [98]

Підсилення будівельних конструкцій елементами зовнішнього армування з високоміцних волокон застосовується в Європі більше 45 років, але для України, на жаль, це матеріал, який наразі немає широкого застосування. Його основні переваги наступні:

- сумісна робота елемента зовнішнього армування з підсилюваною конструкцією, на всіх етапах її навантаження (така робота забезпечується надійним клейовим з'єднанням);
- висока довговічність і стійкість до корозії;
- високі механічні характеристики (міцність і модуль пружності) матеріалів (таблиця 1.4), що становлять систему підсилення;
- простота монтажу і мала власна вага тощо.

Таблиця 1.4

Механічні властивості різних типів волокон і типової сталі

Волокна	E_{axial} / E_{radial} [ГПа]	σ_{max} [МПа]	ϵ_{max} [%]	ν	ρ [г / см ³]	Ціна [€ / kg]
Вуглець з високим модулем пружності (HM carbon)	380/12	2400	2.6	0.2	1.95	20-60
Вуглець високої міцності (HS carbon)	230/12	3400	1.1	0.2	1.75	20-60
Скло	76/76	2000	2.6	0.22	2.6	1.5-3
Арамід	130/10	3000	2.3	0.35	1.45	20-35
Базальт	89/NA	4800	3.15	NA	2.75	NA
Сталь	200-220	400			7.9	5-10

Арамідні волокна мають гарну витривалість і жорсткість, а також низьку електро- і теплопровідність. Вуглецеві волокна виготовляються з різних вихідних матеріалів. Механічні властивості волокон значною мірою залежать від умов карбонізації. Що стосується вибору волокна, то вуглецеве найчастіше є найбільш придатним через те, що воно має вище значення модуля пружності Юнга, ніж у сталі. Що не може бути сказано ні про скловолокна, ні про арамідні волокна. Зразки композитних матеріалів італійської фірми FIBERBUILT [101] представлені на рис. 1.42.

У композитних матеріалах на основі скловолокна використовується кварцове скло. Перевагами склопластику є відносно низька вартість. Арамідні волокна використовуються з 70-х років минулого століття. За хімічною будовою подібні до найлонових арамідів. Ці волокна анізотропні за своєю структурою і порівняно зі склом мають вищу міцність і модуль пружності. Вони більш пластичні під дією розтягуючих навантажень, але при стисненні залишаються

пружними до руйнування. Важливими властивостями зміцнюючого матеріалу є жорсткість, міцність і маса.

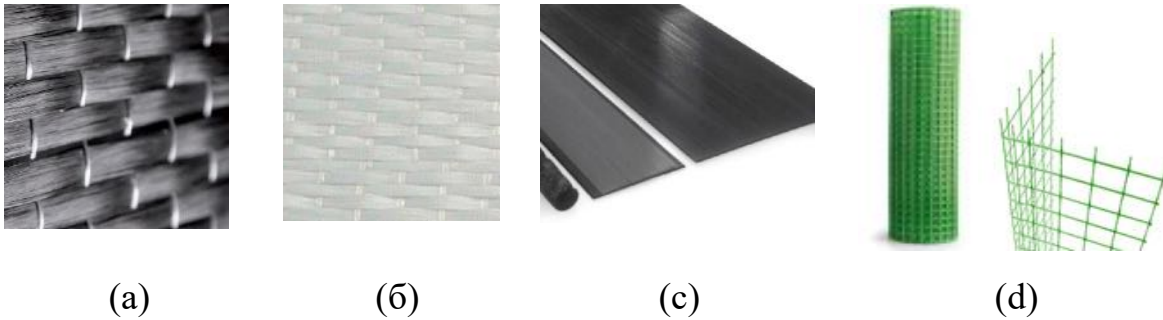


Рис. 1.42. Зображення композитних матеріалів FIBERBUILT: (а) Полімер, армований вуглецевим волокном CFRP; (б) армований скловолокном полімер CFRP; (с) La tecnologia FRP ; (д) Вид композитної сітки в рулоні скловолокна GFRP (полімер, армований скловолокном)

Тим не менш, недоліки, пов'язані з крихким руйнуванням, тривалою довговічністю, чутливістю до ударів і високою вартістю обмежили їх широке використання. Після розповсюдження армованих волокнами полімерів (FRP) нещодавно були розроблені композити на основі розчину, які використовують високоефективний текстиль (суцільні сухі волокна, розташовані у формі відкритої сітки або тканини), зовні скріплені цементним або вапняним розчином. Ці системи відомі як TRM (армовані текстильними розчинами) або FRCM (армовані волокнами цементні матриці). Незважаючи на те, що в деяких випадках їх міцність на адгезію може бути нижчою, ніж у FRP, вони пропонують важливі переваги з точки зору вогнестійкості, паропроникності, можливості видалення, а також простоти, часу та вартості встановлення завдяки використанню неорганічних матриць замість смол.

З точки зору вогнестійкості та безпеки робіт використання в якості клею мікроцементу з додаванням полімерних смол є більш ефективним, на відміну від епоксидного клею. При зміцненні конструкцій сітками для закріплення їх на поверхні використовують клейовий розчин на цементній основі [98]. Новий

армуючий матеріал: FRCM Components Поліпарафенілен Бензобіс Оксазоло (PBO), цементний клей FRCM, C-FRCM і C-FRP представлені на Рис. 1.43.

В Європі та Америці композитні матеріали FRP активно використовуються для існуючих конструкцій підсилення каркасних будівель під час реконструкції. Однак в Україні подібні практики ще не набули широкого поширення. Технології з'єднання композитних матеріалів з конструкцією варіюються і можуть включати мокре укладання, попереднє напруження або приклеювання пултрузійних пластин.

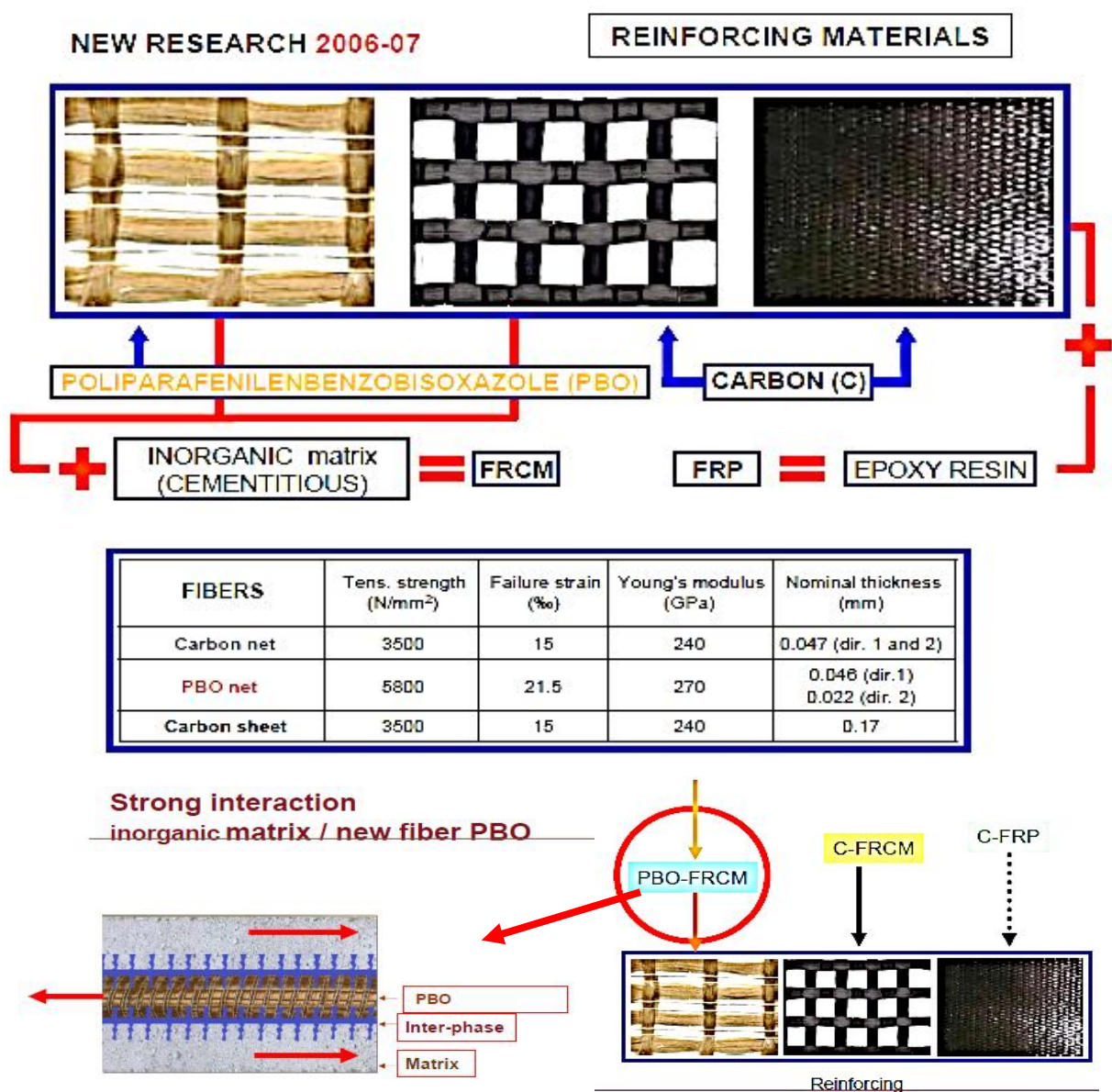


Рис. 1.43. Вид та властивості нового армуючий матеріал FRCM

Композитні матеріали також широко використовуються для підсилення історичних будівель металевих конструкцій, зокрема для збільшення їх сейсмічної стійкості або в умовах підвищених навантажень. Використання склопластикових або вуглецевих матеріалів дозволяє значно покращити характеристики каркасів, зберігаючи при цьому їхню легкість і стійкість до корозії. Це робить технології FRP ідеальними для підсилення каркасних будівель в умовах агресивного навколишнього середовища та для реконструкції історичних споруд, де важливо зберегти оригінальний вигляд конструкцій.

Прикладами підсилення металевих конструкцій є історичні об'єкти, наприклад, міст Слаттокса у Великобританії (рис. 1.44), де для підсилення балок використано вуглецеві пластини CFRP, що дозволило збільшити їхню несучу здатність на 135%. Також на Тікфордському мосту застосовано технологію «wet-lay-up» для підсилення чавунної арки за допомогою вугле волокна (рис. 1.45) [102].



Рис.1.44. Підсилення існуючих балок двома пластинами з вуглецевого волокна. Транспортний міст Слаттокса, Англія [102].

Незважаючи на численні успішні приклади для металевих мостів, застосування композитних матеріалів FRP для підсилення металевих каркасів будівель поки що є рідкісним і не має достатньо прикладів для широкого впровадження в Україні. Тим не менш, використання композитних матеріалів FRP дозволяє не тільки відновлювати несучі властивості старих конструкцій, але й зберігати їх історичну цінність, адже технології підсилення можуть бути непомітними для ока і не змінюють зовнішній вигляд об'єкта.



Рис.1.45. Тікфордскій чавунний арочний міст в Великобританії [102]

На рис. 1.46–1.48 показано приклади підсилення залізобетонних будівельних конструкцій армуванням композитними матеріалами на основі вуглеволокон.

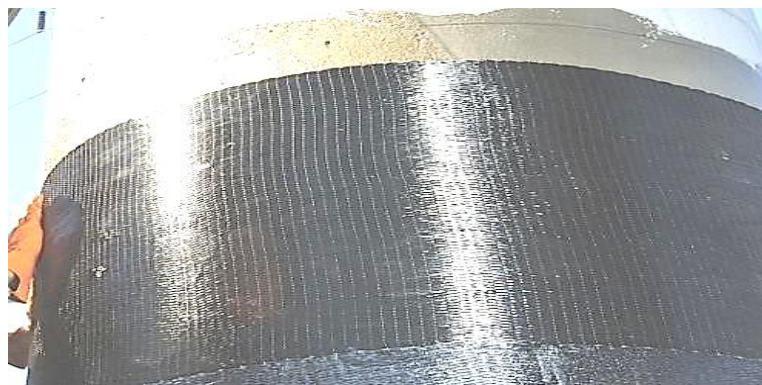


Рис. 1.46. Підсилення залізобетонної колони зовнішнім армуванням композитним матеріалом на основі вуглецевих волокон



Рис. 1.47. Підсилення залізобетонних монолітних балок і плити зовнішнім армуванням композитним матеріалом на основі вуглецевих волокон

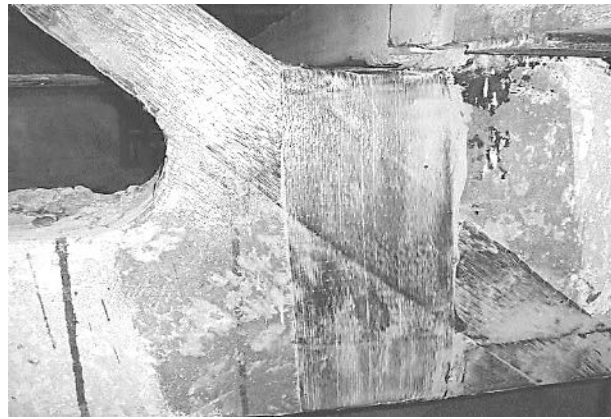


Рис. 1.48. Підсилення опорного вузла залізобетонної ферми армуванням композитним матеріалом на основі вуглецевих волокон

Важливою перевагою застосування високоміцних фіброармованих систем є можливість підсилення або заміни існуючих елементів каркасу на нові композитні конструкції без необхідності посилення фундаменту. Завдяки малій власній масі FRP-матеріалів, додаткове навантаження на фундамент та інші несучі елементи залишається мінімальним, що дозволяє уникнути складних та затратних робіт із посилення основи будівлі. На рис. 1.49–1.52 показані повністю композитні конструкції, що використовують пултрузійні GFRP-елементи та інші технології армування, які можуть бути ефективними при реконструкції існуючих каркасів будівель [84]. Легкість FRP-матеріалів значно знижує навантаження на опорні конструкції, що є особливо важливим під час реконструкції старих каркасних споруд, оскільки дозволяє оптимізувати параметри фундаментів і каркасних елементів.

Цей підхід особливо актуальний для України, де значна частина будівель та споруд зазнала руйнувань унаслідок бойових дій. У багатьох випадках фундамент залишається неушкодженим, тоді як каркасні конструкції потребують відновлення або заміни. Використання композитних матеріалів у таких умовах дозволяє швидко й ефективно відновити будівлі, забезпечуючи їхню експлуатаційну придатність без надмірних фінансових та технічних витрат.

Використання високоміцних фіброармованих систем у підсиленні конструкцій або заміни ними окремих аварійних елементів каркасних будівель, є ефективним напрямком розвитку конструктивно-технологічного забезпечення,

що сприяє підвищенню якості, довговічності, сталості та економічній ефективності реконструкції.



Рис.1.49. Суд Пескари, Пескара, Італія, 2006 р. Дах двотаврових склопластикових профілів (пултрузія) та сендвіч-панелей на FRP-основі з пінополіуретаном.



Рис.1.50. Рис. Експо, Лісабон, Португалія, 1998 р. Несуча система з пултрузійних склопластикових профілів наскрізного перерізу; з'єднання — сталеві болти.

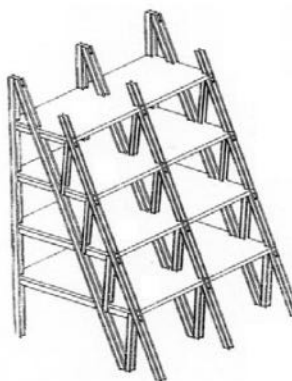


Рис.1.51. Euycatcher, Базель, Швейцарія, 1999 р. 5-поверхова будівля зі склопластиковими балками та колонами, з'єднання — болтові.



Рис.1.52. Допоміжний поверх, Верона, Італія (2006). Подвійна рама з GFRP-профілями та сталевими тросами, настил зі склопластикових двотаврових профілів

На основі проведеного аналізу було систематизовано найпоширеніші КТР, що застосовуються для підсилення горизонтальних та вертикальних елементів каркасів будівель. Частота використання окремих рішень узагальнена у вигляді відсоткового співвідношення на рис. 1.53 та 1.54 відповідно.

Систематизований підхід до підсилення передбачає:

- аналіз напружено-деформованого стану елементів;
- визначення домінуючої зони роботи (стисненої або розтягнутої);

- раціоналізацію перерізу і забезпечення максимального ефекту за мінімальних витрат матеріалу;
- узгодження КТР з технологічними умовами реконструкції;
- забезпечення сумісної роботи підсилених і існуючих елементів.

Узагальнення досвіду використання сучасних матеріалів і конструктивно-технологічних рішень показує, що наявні КТР і матеріали формують широкий інструментарій підсилення, однак ефективність його застосування визначається якістю системи вибору. На практиці розрив між результатами обстеження, перевірними розрахунками та організаційно-технологічною реалізацією найчастіше призводить до переробок, зростання вартості та погіршення експлуатаційних характеристик.

Окрім базових вимог до забезпечення надійності та економічної доцільності, в багатьох випадках необхідно враховувати додаткові фактори: швидкість виконання робіт (наприклад, під час відновлення пошкоджених або зруйнованих споруд), зменшення ваги конструкцій, екологічну безпечність технологій та відповідність специфічним умовам експлуатації. Усі ці аспекти суттєво впливають на вибір матеріалів, параметрів підсилювальних елементів, технологій виконання та конструктивних рішень, формуючи оптимальну стратегію підсилення каркасних будівель у процесі реконструкції.

Тому підсилення доцільно розглядати як керований багатоваріантний процес, у якому кожне рішення має бути узгоджене за трьома рівнями: (1) конструктивна доцільність, (2) технологічна реалізованість у конкретних умовах реконструкції, (3) довгострокові експлуатаційні наслідки. У цьому контексті виникає необхідність переходу від описової класифікації способів підсилення до інтегрованої системи підтримки прийняття рішень, що формалізує вибір КТР з урахуванням типу елемента, характеру дефектів, дії згинальних і поперечних зусиль, умов виконання робіт та порівняння альтернатив за критеріями ефективності, надійності та сталості.

Балки, ригелі	• Підсилення нарощуванням перетину, 20 % • Підсилення високоміцними FRP-матеріалами, 10 % • Введення додаткових ненапружених елементів, 10 % • Введення додаткових напружених елементів, 5 % • Замонолічування, 5 % • Введення додаткових підкосів, стяжок, шпренгелів, 10 % • Замикання шарнірних вузлів (створення нерозрізної системи), 5% • Підведення додаткових розвантажувальних конструкцій, 10 % • Встановлення горизонтальних в'язей у рівні верхнього поясу балки, 5 % • Приварювання накладок, 5 % • Встановлення ребер жорсткості, 10 % • Заміна елемента, 5 % • Інші локальні заходи (рихтування, регулювання, зменшення навантажень), 5 %
Ферми	• Зміна схеми роботи (обладнання третього поясу), 1% • Включення ліхтаря у спільну роботу ферми, 0.5% • Розвантаження ферми (тимчасові заходи), 0.5% • Заміна пошкоджених ферм / частин конструкції, 2% • Влаштування додаткової вантової або висячої системи, 3% • Підсилення FRP-матеріалами, 3% • Відновлення кріплень (болти, прокладки), 4% • Рихтування ферми з додатковими ребрами, опорами, 5% • Введення нових елементів у решітку ферми, 6% • Підведення нових конструкцій / додаткових опор, 7% • Установка додаткових зв'язків, косинок, коротунів, 8% • Засвердлення, заварювання тріщин, оброблення швів, 10% • Нарощування перерізу металевими елементами, 15% • Підсилення шпренгелем, 15% • Відновлення перерізу пошкодженого елемента накладками, 20%
Прогони	• Встановлення додаткових прогонів, 25% • Підсилення шляхом нарощування, 20% • Підсилення за допомогою встановлення шпренгеля, 15% • Відновлення перерізу пошкодженого елемента, 15% • Встановлення шпренгеля під місце обпирання прогону, 10% • Встановлення та затягування відсутніх болтів кріплення, 10% • Інші локальні заходи, 5%
Зв'язки у покритті	• Монтаж або заміна відсутніх елементів зв'язків, 20% • Встановлення або заміна накладок, 15% • Підсилення шпренгелем, 18% • Встановлення додаткових елементів, 12% • Рихтування місцевих деформацій (для металу), 5% • Підсилення центрально-стиснених елементів ферм шляхом зменшення розрахункової довжини, 15% • Збільшення перетину нарощуванням, 10 % • Обладнання третього поясу ферми, 5%

Рис. 1.53. Систематизація КТР для підсилення металевих горизонтальних елементів, з частотою використання у відсотках

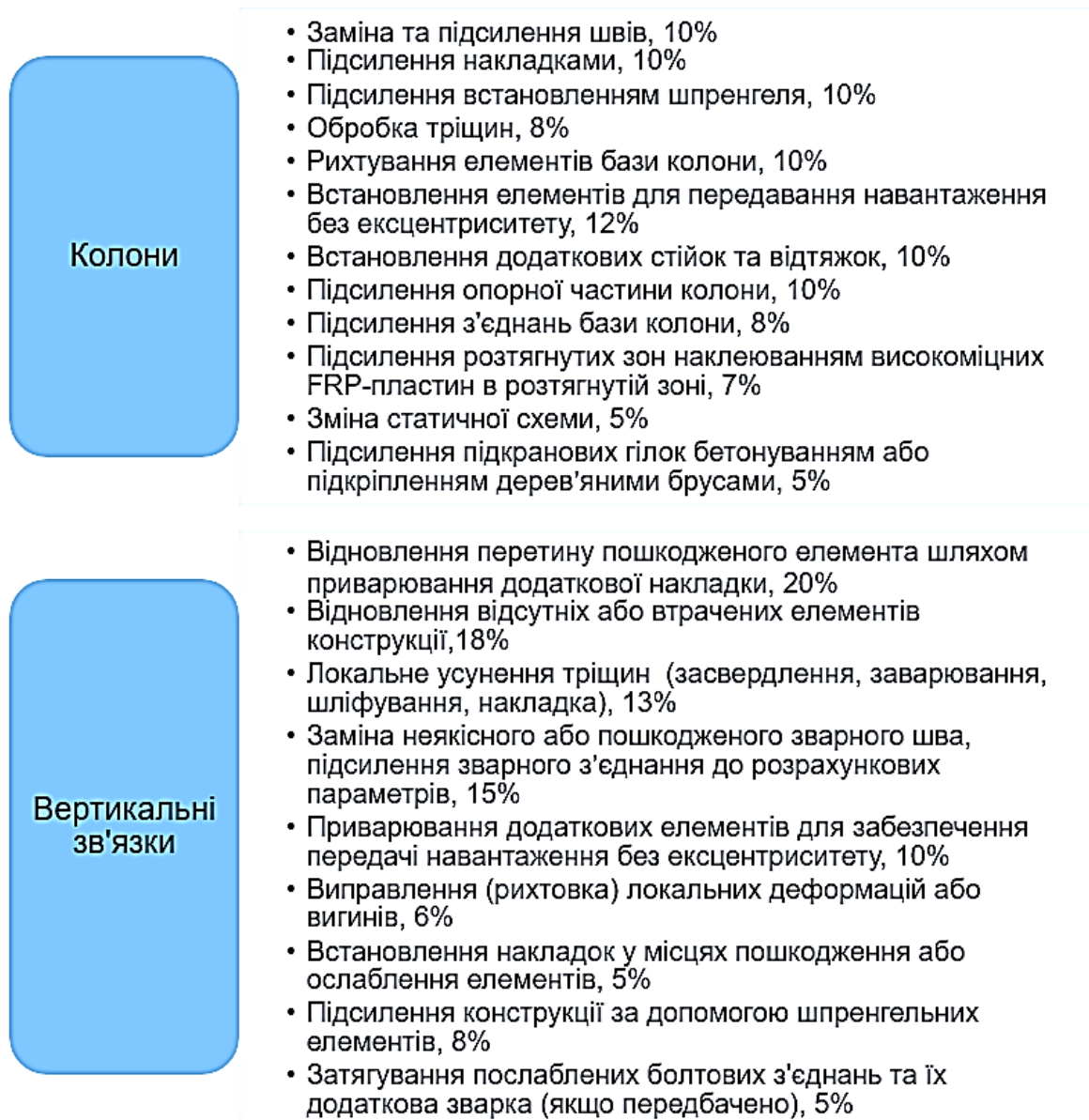


Рис. 1.54. Систематизація КТР для підсилення металевих вертикальних елементів, з частотою використання у відсотках

1.4. Аналіз методів і процесів підсилення каркасів будівель.

Для продовження життєвого циклу будівель і споруд методом реконструкції необхідно комплексно враховувати технічні, економічні, екологічні та організаційні аспекти, застосовуючи сучасні цифрові технології та методи підсилення конструкцій. Важливим етапом у процесах реконструкції та модернізації старих споруд є підсилення каркасів будівель, особливо коли необхідно збільшити їхню несучу здатність або продовжити термін експлуатації.

Технологія підсилення передбачає використання різних матеріалів і конструктивних рішень, зокрема композитних матеріалів, сталевих елементів, обойм та інших інноваційних підходів, кожен із яких має свої особливості та переваги залежно від умов будівлі, вимог до міцності та бюджету.

Дослідженням системного підходу до технології та організації підсилення каркасів будівель займалися різні науковці. Зокрема, Григоровський [20] зосередився на організаційно-технічних аспектах інструментальних вимірювань у процесі підсилення, досліджуючи вплив різних факторів на точність спостережень за пошкодженнями будівель, такими як просідання, вібрації, підтоплення та зсуви. Оптимізація параметрів вимірювань і тривалості робіт сприяє підвищенню безпеки та ефективності будівельних процесів. Крім того, Григоровський розробив методику прогнозування ефективності вимірювань та моделювання діагностики технічного стану будівель за допомогою інтелектуальних систем, що значно покращує процес підсилення конструкцій.

Молодід О. С. [21], у свою чергу, розробив систему КТР для відновлення експлуатаційної придатності залізобетонних конструкцій. Його підхід базується на аналізі залежностей між трудомісткістю, тривалістю та вартістю ремонтних процесів, а також на оцінці впливу зовнішніх і внутрішніх чинників. Особливу увагу він приділив ефективності підсилення за допомогою зовнішнього армування, зокрема використання високоміцних тканин і ламелей, що дозволяє суттєво підвищити несучу здатність конструкцій. У результаті досліджень були вдосконалені методики експериментальних випробувань і розроблені нові технології підсилення.

Дисертація Тонкачєєва Г.М. [16] присвячена розробці та обґрунтуванню ефективної системи організації допоміжного оснащення для будівництва на основі уніфікованих функціональних модулів. У роботі запропоновано підхід до формування комплектів оснастки, що дозволяє гнучко адаптуватися до умов будівельного процесу, підвищити продуктивність, знизити витрати та скоротити терміни виконання робіт. Зв'язок із вибором КТР полягає в тому, що функціонально-модульна система передбачає оцінку та порівняння

альтернативних варіантів оснастки залежно від типу конструкцій, технології виконання робіт і умов будівництва, що є важливою складовою процесу прийняття ефективних КТ-рішень, зокрема при реконструкції та нестандартних об'єктах.

Крім того, Савйовський В. В. [28] запропонував методологічні принципи організаційно-технологічного проектування реконструкції цивільних будівель.

Наступні сучасні цифрові технології відіграють важливу роль у забезпеченні якості конструктивно-технологічного забезпечення при реконструкції [120-125]:

- Цифрові паспорти ресурсів (Concular Digital Resource Passports) дозволяють каталогізувати матеріали будівель та їх характеристики, що сприяє ефективному вибору підсилюючих елементів та оптимізації матеріалів під час реконструкції.

- Автоматизовані рішення для будівництва (Kewazo Smart Robotics for Scaffolding) забезпечують точність монтажу конструкцій та ефективне використання ресурсів, що особливо важливо під час укріплення каркасів і зменшення похибок людського фактору.

- Цифрові системи для кругового будівництва (Züblin Circular Construction & Recycling Hub) допомагають організувати процеси повторного використання матеріалів без втрати їхніх характеристик, що є критично важливим для реконструкції каркасних будівель.

- Модульні фасади з цифровою підтримкою (Schüco modular building facades) дозволяють інтегрувати сучасні підсилювальні рішення в існуючі каркасні структури без суттєвого демонтажу.

- Цифрова опалубка (PERI Digital Formwork) застосовує RFID-мітки та IoT-датчики для відстеження життєвого циклу матеріалів. Це дозволяє скоротити відходи, підвищити повторне використання опалубки та оптимізувати планування будівельних процесів.

Однак, всі вищенаведені дослідження та розробки повністю не вирішують задачу розробки єдиної КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції, що дає автору змогу зосередитися на вирішенні цієї задачі.

1.5. Проблеми, цілі і задачі досліджень

Постановка наукової проблеми та формування завдань дослідження ґрунтуються на теоретичних і практичних положеннях наукових праць у галузі технології та організації будівництва, реконструкції та підсилення будівель і споруд. Дослідження базується на працях вітчизняних та закордонних учених, зокрема: Ю.І. Белякова, А.І. Білоконя, А.М. Березюка, В.І. Большакова, П.Є. Григоровського, О.С. Молодіда, В.К. Черненко, О.М. Галінського, В.О. Галушка, О.Ф. Осипова, Д.Ф. Гончаренка, А.Д. Єсипенка, В.Д. Жвана, М.Ю. Ізбаша, Т.С. Кравчуновської, М.І. Котляра, С.М. Леоновича, І.Я. Лучковського, О.І. Менейлюка, В.В. Савйовського, Г.М. Тонкачєєва, В.І. Торкатюка, Є.П. Уварова, Г.Г. Фаренюка, С.Л. Фоміна, О.Л. Шагіна, С.В. Шатова, І.В. Шумакова, А.К. Шрейбера, а також провідних закордонних дослідників: Hayder Lateef Al-Khafaji, Muhammad Yaqub, Gian Piero Lignola, Veysel Yazici, Ailland, Karin, Gerhard Berg, Gerhard Grimscheid, Christian Hofstadler, Thomas Krause, Bernd Ulke, Gerhard Künstler, Andreas Roquette, Markus Viering, Stefan Leupatz та інших.

Крім того, автором виконано або проаналізовано близько двохсот науково-технічних звітів щодо обстеження будівель і споруд, а також робіт з підсилення конструкцій під час реконструкції.

Аналіз існуючих технологій реконструкції каркасних будівель засвідчив, що на сьогодні відсутня єдина КТС, яка забезпечує ефективність та якість підсилення конструкцій. Розрізненість підходів, відсутність інтегрованої методології оцінки та вибору оптимальних рішень, недосконалість моделей управління процесами реконструкції створюють значні виклики для будівельної галузі. Зокрема, виникає необхідність системного підходу до аналізу технічних, економічних, екологічних та соціальних факторів, що впливають на

довговічність, безпечність та стійкість каркасних конструкцій під час реконструкції.

Отже, необхідна розробка єдиної КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції. У цьому контексті особливого значення набуває визначення основних факторів впливу, як зовнішніх, так і внутрішніх, що впливають на зміну елементів каркасу будівлі. Необхідно розглянути всі можливі конструктивно-технологічні та організаційно-технологічні моделі рішень з подальшим їхнім аналізом. При цьому важливо враховувати пріоритетність впливу найвагоміших факторів на каркас будівлі, а також вплив підсиленого каркасу на навколишнє середовище, естетичний вигляд об'єкта та інтереси всіх зацікавлених сторін.

Наукова проблема полягає в необхідності моделювання технологічних рішень та організації процесів із врахуванням множини взаємопов'язаних факторів, включаючи технічні, економічні, екологічні та соціальні аспекти. Водночас існуючі підходи до підсилення не забезпечують належної системності, часто не відповідають вимогам сталого розвитку та потребують удосконалення в контексті застосування цифрових технологій і Lean-принципів.

Основними проблемами, що потребують розв'язання, є:

- Відсутність комплексного підходу до підсилення каркасних будівель із урахуванням нормативних вимог, варіантного проєктування та моделювання технологічного процесу підсилення конструкцій каркасів.
- Недостатня система оцінки якості та ефективності підсилення конструкцій за критеріями надійності, економічної доцільності та екологічної сталості.
- Відсутність систематизованих критеріїв вибору конструктивно-технологічних рішень для реконструкції з урахуванням життєвого циклу будівель, просторових параметрів зовнішнього і внутрішнього середовища в зоні об'єкту підсилення, тощо.
- Недостатня ефективність застосовуваних методів підсилення, зокрема потреба в оцінці доцільності використання FRP-матеріалів.

- Відсутність науково обґрунтованих методик аналізу дефектів конструкцій та їхнього впливу на вибір КТР.
- Недостатня апробація сучасних технологій при підсиленні, зокрема застосування Lean-принципів, BIM-моделювання, впровадження принципів циркулярної економіки та сталого підходу.

При моделюванні системи технологічних рішень передбачається використання сучасних цифрових технологій, зокрема BIM і Lean-технологій, запровадження принципів циркулярної економіки, що зменшує потребу у первинних ресурсах, а також застосування сталого підходу до реконструкції, що забезпечить мінімізацію впливу на довкілля.

Мета дослідження – розроблення науково обґрунтованої конструктивно-технологічної системи (КТС) забезпечення якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції, що базується на інтеграції сучасних цифрових технологій, Lean-принципів, екологічно сталих рішень, методів багатокритеріального прийняття рішень та багатофакторної оптимізації технологічних процесів.

Завдання дослідження:

- проаналізувати сучасний стан проблеми підсилення каркасних будівель під час реконструкції, узагальнити та систематизувати причини дефектів і пошкоджень несучих конструкцій, а також існуючі методи і технології їх підсилення з урахуванням умов експлуатації та факторів внутрішнього і зовнішнього середовища;
- розробити та обґрунтувати методологічні основи формування конструктивно-технологічної системи (КТС) забезпечення якості підсилення каркасних будівель, визначити її структуру, склад підсистем та взаємозв'язки між конструктивно-технологічними (КТР) і організаційно-технологічними (ОТР) рішеннями;
- розробити алгоритм формування та моделювання конструктивно-технологічних і організаційно-технологічних рішень підсилення на основі багатокритеріального підходу з урахуванням критеріїв надійності, ефективності

та сталості, а також інтеграції сучасних цифрових технологій (BIM), Lean-інструментів управління процесами та принципів сталого розвитку;

- систематизувати та розробити комплексний підхід до формування технологічних рішень підсилення каркасних будівель, що враховує технічний стан конструкцій, просторово-планувальні параметри об'єкта, ресурсні та виробничі обмеження, екологічні, економічні та соціально-культурні аспекти реконструкції;

- розробити методичні рекомендації щодо практичного застосування конструктивно-технологічної системи забезпечення якості підсилення каркасних будівель, орієнтовані на використання Lean-технологій, цифрового моделювання процесів, оптимізацію управління ресурсами, оцінювання ризиків та підтримку прийняття інженерних рішень;

- виконати апробацію запропонованої методології підсилення каркасних конструкцій на реальних об'єктах реконструкції, провести порівняльне оцінювання ефективності традиційних і інноваційних технологічних рішень, зокрема із застосуванням FRP-матеріалів, Lean-принципів та цифрових інструментів управління реконструкцією.

Об'єкт дослідження – процес підсилення каркасних будівель під час реконструкції.

Предмет дослідження – формування науково обґрунтованої конструктивно-технологічної системи забезпечення якості підсилення каркасних будівель, що базується на багатокритеріальному виборі конструктивно-технологічних і організаційно-технологічних рішень з урахуванням просторових параметрів, умов реалізації реконструкції та критеріїв надійності, ефективності і сталості протягом життєвого циклу будівель.

Наукова гіпотеза базується на припущенні, що розробка єдиної КТС підсилення каркасних будівель, яка спирається на комплексний аналіз технічних, економічних, екологічних і соціальних факторів, дозволить підвищити експлуатаційну надійність конструкцій та ефективність процесів реконструкції. Інтеграція BIM-технологій, Lean-принципів та методів циркулярної економіки

сприятиме оптимізації вибору конструктивно-технологічних рішень, зменшенню витрат та негативного впливу на довкілля, а також забезпечить довговічність і безпечність будівель.

Висновки по першому розділу

1. Встановлено, що продовження життєвого циклу каркасних будівель шляхом реконструкції є об'єктивною необхідністю, зумовленою фізичним і моральним зносом, зростанням експлуатаційних навантажень, змінами нормативної бази, кліматичними впливами та наслідками бойових дій, при цьому особливої уваги потребують об'єкти, зведені до 2006 року за застарілими нормами навантажень. Обґрунтовано, що забезпечення безпечної та ефективної експлуатації вимагає переходу від локального підсилення окремих елементів до системного управління якістю на рівні всієї конструкції відповідно до вимог ДСТУ/ДБН, ISO та Регламенту (ЄС) №305/2011 із прогнозуванням довговічності, оцінкою ризиків на всіх етапах життєвого циклу та керованою зміною експлуатаційних властивостей (несуча здатність, технологічність, вартість). Уточнено, що для продуктів підсилення визначальними є показники технологічності, надійності, економічності, екологічності, безпеки та раціональної організації робочого простору, які безпосередньо впливають на ефективність КТР в умовах реконструкції. Виявлено недостатню формалізацію процедур оцінки ризиків і оптимізації ОТР, що зумовлює необхідність створення цілісної КТС забезпечення якості підсилення із застосуванням сучасних методів, BIM та цифрового моніторингу протягом життєвого циклу будівлі.

2. Встановлено, що геометричні та об'ємно-планувальні параметри існуючих каркасних будівель (сітка колон і прольотів, поверховість і висоти поверхів, тип просторової схеми — рамна/зв'язкова/рамно-зв'язкова/безригельна/комбінована, наявність діафрагм і в'язей, щільність інженерних комунікацій, можливість перепланувань і доступність фронту робіт) є визначальними чинниками формування КТС відновлення та безпосередньо задають допустимі множини КТР і технологічні обмеження підсилення.

Узагальнено типові серійні каркаси, що формують основний фонд реконструкції, і показано потребу їх адаптації до актуальних навантажень та змін функції об'єкта. Розроблено відповідність «об'ємно-планувальне рішення → типи підсилення», що дозволяє системно пов'язати планувальні трансформації з конструктивними заходами і зменшити невизначеність вибору рішень. Обґрунтовано необхідність переходу від фрагментарних рішень до цілісної КТС, де ВІМ і параметричні методи (QFD) забезпечують формалізований синтез та оптимізацію КТР з урахуванням геометрії й умов виконання робіт.

3. Встановлено, що сучасна практика підсилення не формує єдиної уніфікованої КТС вибору матеріалів і КТР, через що рішення часто залишаються варіантними та залежними від досвіду інженера. Обґрунтовано, що чинні задають вимоги до розрахункового підтвердження та безпеки, але практично не містять формалізованого алгоритму багатокритеріального вибору способу підсилення з урахуванням технологічності, довговічності з'єднань, екологічних наслідків і життєвого циклу. Узагальнено досвід застосування традиційних рішень для сталі й залізобетону, показано їх ефективність за умовами, але також і типові обмеження. Встановлено перспективність сучасних матеріалів FRP та виявлено, що для практичного впровадження таких матеріалів бракує систематизованої класифікації “дефект/умови/обмеження → матеріал → технологія → КТР” і стандартизованої процедури вибору, що зумовлює необхідність інтегрованої системи підтримки рішень із критеріями надійності–ефективності–сталості та раннім залученням технологічного аналізу (організація робіт, мінімізація зварювання, LCA/вуглецевий слід, вимоги експлуатації).

4. Встановлено, що сучасні методи і процеси підсилення каркасів будівель базуються на поєднанні конструктивних рішень з організаційно-технологічними заходами, спрямованими на підвищення несучої здатності, довговічності та адаптації об'єктів до нових умов експлуатації. Проаналізовано наукові підходи до організації та технології підсилення, які охоплюють інструментальну діагностику й прогнозування технічного стану, оптимізацію трудомісткості та

вартості робіт, формування комплектів допоміжного оснащення й модульних систем організації реконструкції.

5. Визначено, що впровадження сучасних цифрових технологій (BIM, цифрові паспорти ресурсів, роботизовані й модульні системи, інструменти кругового будівництва) розширює можливості контролю якості, планування ресурсів і зниження матеріальних та екологічних витрат у процесах підсилення. Водночас встановлено фрагментарність існуючих підходів, які не забезпечують комплексної інтеграції технічних, організаційних, економічних та екологічних чинників. Це зумовлює необхідність формування цілісної КТС забезпечення якості підсилення каркасів будівель із інтегрованою діагностикою, обґрунтованим вибором КТР та оцінюванням ефективності рішень протягом життєвого циклу реконструкції.

6. Основні результати розділу викладені роботах [32, 55, 56, 98, 99, 120, 177, 216, 249, 275].

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ ТА ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПІДСИЛЕННЯ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ

2.1. Методологія забезпечення якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції

Забезпечення якості підсилення каркасних будівель у процесі реконструкції є одним із ключових науково-практичних завдань сучасного будівництва, оскільки безпосередньо впливає на надійність, довговічність, експлуатаційну придатність та безпеку будівельних об'єктів. Якість підсилення формується в умовах обмеженого ресурсу, наявності дефектів і пошкоджень, дії експлуатаційних та технологічних ризиків, що зумовлює необхідність її розгляду як комплексної, багатofакторної характеристики.

У науковому розумінні якість підсилення каркасних будівель доцільно трактувати як інтегральну властивість конструктивно-технологічних рішень (КТР), що відображає ступінь відповідності результатів реконструкції вимогам надійності, довговічності, технологічності, економічної доцільності, екологічної безпеки та соціальної прийнятності протягом усього життєвого циклу об'єкта.

Сучасна нормативно-методична база забезпечує основу для побудови системи управління якістю підсилення. Так, національні [5, 7, 8, 13, 126, 127] та міжнародні [3, 4, 12, 50, 88, 92-94, 96, 129, 130-136] стандарти визначають вимоги щодо надійності та довговічності конструкцій, а також враховують життєвий цикл об'єкта як єдине середовище прийняття технічних і організаційних рішень.

У цьому контексті важливим є врахування вимог ДСТУ ISO 15686-5:2020, який окреслює методологічні засади оцінки економічної ефективності проєктів з урахуванням повного життєвого циклу об'єкта. Він передбачає визначення вартості життєвого циклу (Life Cycle Costing), яка охоплює не лише початкові витрати на проєктування та будівництво, але й наступні витрати на експлуатацію, технічне обслуговування, ремонт і утилізацію.

Комплексне бачення якості реконструкції відображене також у ISO 15686-1:2021 [137], який формує нову парадигму управління строком служби, базуючись на принципах сталого розвитку. У цьому стандарті підкреслюється важливість поєднання технічної ефективності, екологічної безпеки та соціальної доцільності. Це створює основу для інтеграції стратегічного планування, підсилення і подальшого технічного обслуговування як єдиного безперервного процесу.

Водночас положення ДБН В.1.2-14-2018 [5] встановлюють вимоги щодо надійності та конструктивної безпеки, наголошуючи на забезпеченні функціональної придатності будівель протягом усього строку служби. В аспекті підсилення це означає необхідність у виборі оптимальних рішень щодо матеріалів, типів з'єднань, методів монтажу, а також засобів контролю якості виконання робіт. Таким чином, надійність каркасної системи повинна розглядатися як здатність витримувати нормативні навантаження, зберігати функціональність, бути стійкою до пошкоджень і відповідати очікуваному ресурсу експлуатації.

Інтеграція принципів управління життєвим циклом у процес оцінювання якості дозволяє перейти від традиційної орієнтації на виконання окремих нормативів до системного виваженого підходу, який враховує як технічні показники, так і економічні й екологічні наслідки обраних рішень.

Одним із визначальних чинників, що знижують якість підсилення, є наявність дефектів і пошкоджень несучих елементів, спричинених тривалою експлуатацією, агресивним впливом середовища, проєктними або технологічними помилками. Ці фактори призводять до зменшення несучої здатності, зростання деформативності, підвищення експлуатаційних ризиків і втрат. У зв'язку з цим обов'язковим етапом забезпечення якості є технічний аудит, який включає комплексне обстеження каркасу, матеріалів та з'єднань з метою формування обґрунтованих рішень щодо необхідності, обсягів і методів підсилення.

Відповідно до вимог ДБН В.1.2-12-2008 [138], у процесі реконструкції каркасних будівель доцільно здійснювати поділ робіт за ступенем втручання у виробничий або експлуатаційний процес, що дозволяє мінімізувати соціальні та організаційні ризики, а також забезпечити безпеку персоналу і навколишнього середовища відповідно до положень законодавства України, зокрема закону «Про об'єкти підвищеної небезпеки». Таким чином, якість підсилення охоплює не лише конструктивні параметри, а й організаційно-технологічні рішення.

Першим етапом забезпечення якості є технічний аудит, який включає діагностику стану несучого каркасу, оцінку матеріалів та функціональних систем. Це дозволяє сформулювати обґрунтовані висновки щодо необхідності підсилення окремих елементів та масштабу втручань.

Наступним етапом є розроблення технічно і організаційно виваженого плану реконструкції, що включає: вибір адекватних методів підсилення (наприклад, фіброармовані системи або класичні технології); формування бюджету та графіка робіт; залучення підрядників з відповідною кваліфікацією; урахування ризиків, пов'язаних з виконанням робіт у діючих умовах.

Особливу увагу слід приділяти безпеці на всіх етапах реконструкції — від демонтажу та посилення до відновлення експлуатації. Це охоплює розроблення плану безпеки, моніторинг якості виконання робіт та запровадження механізмів оперативного реагування.

Для забезпечення тривалої експлуатаційної придатності після реконструкції важливим є впровадження системи моніторингу технічного стану. Такі системи дають змогу виявляти пошкодження на ранніх стадіях, визначати потреби в обслуговуванні та коригувати стратегії технічного догляду.

Методологія оцінювання строку експлуатації повинна включати не тільки застосування відповідних ДБН [5], ДСТУ-Н [139], Національного додатку до ДСТУ-Н, які гармонізовані з Єврокод EN 1990:2002, але й враховувати рекомендації ISO 15686-1:2021 [137]. Усі ці нормативи та рекомендації слід інтегрувати в єдину систему, що дозволить не тільки оцінити стан будівлі, але й

оптимізувати процес реконструкції з урахуванням довгострокових потреб і ризиків.

Якість підсилення повинна розглядатись як результат комплексного, багатофакторного підходу, що охоплює не лише технічні, а й економічні, екологічні та соціальні аспекти. Такий підхід забезпечує прийняття збалансованих КТР, спрямованих на довготривалу ефективність, надійність та безпечність каркасних будівель після реконструкції.

Дослідження методик підсилення конструкцій каркасних будівель у процесі реконструкції повинно ґрунтуватися на сучасних принципах сталого розвитку, раціонального використання ресурсів та оптимізації технологічних рішень. Введення в дію Закону України про вдосконалення будівельних норм [140] акцентує увагу на параметричному нормуванні, яке забезпечує гнучкий та адаптивний вибір конструктивних рішень відповідно до різноманітних нормативних вимог.

Принцип варіантного проєктування сприяє вибору оптимальних технологічних рішень із врахуванням ресурсозбереження та довговічності будівельних матеріалів [140]. Одним із ключових аспектів сталого підходу є можливість повторного використання та переробки матеріалів після знесення конструкцій, що зменшує негативний вплив на довкілля і підвищує ефективність використання ресурсів [73].

Національні стандарти, зокрема ДСТУ 9171:2025 [141], а також міжнародний стандарт ISO 15392:2019 [130], підкреслюють пріоритетність реконструкції над новим будівництвом як важливого кроку для збереження ресурсів і зниження екологічного навантаження. Комплексний підхід до реконструкції передбачає узгоджену взаємодію усіх учасників проєкту — від замовників і проєктантів до виконавців — задля підвищення надійності, ефективності та довговічності конструкцій на основі принципів кругової економіки.

Забезпечення якості реконструкції каркасних будівель вимагає дотримання нормативних вимог, оперативного виявлення та усунення дефектів, а також

застосування обґрунтованих методологій для підсилення конструкцій. Це сприяє підвищенню довговічності, безпеки будівель, а також покращенню економічних і соціальних показників з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Методика дослідження має враховувати аналіз впливу кліматичних факторів [130], підбір відповідних матеріалів і застосування енергозберігаючих технологій [108]. Такий підхід дозволяє ефективно підсилювати конструкції, забезпечуючи відповідність екологічним і соціальним стандартам.

Реконструкція існуючих будівель є складним і багатогранним процесом, що передбачає ретельну оцінку технічного та естетичного стану об'єкта. Важливо враховувати обмеження, пов'язані з адаптацією конструктивних рішень до сучасних вимог, що вимагає додаткових часу та ресурсів [144]. Етап попереднього проєктування включає техніко-економічне обґрунтування, що допомагає визначити доцільність та ефективність підсилення каркасів. Особливої уваги потребує координація дій численних зацікавлених сторін — власників, орендарів, підрядників, що працюють у діючих будівлях, що створює додаткові складнощі [109].

Методика підсилення має бути комплексною, охоплюючи технічні, соціально-економічні та екологічні аспекти. Часто в реконструкції обмежені можливості просторових трансформацій через специфіку початкових конструкцій і технічних рішень, призначених для первісних умов експлуатації. Також слід враховувати підвищені фінансові ризики, пов'язані з непередбаченими технічними проблемами, які можуть потребувати швидких рішень [144].

У контексті забезпечення стійкості будівель, важливо не лише зменшувати енергоспоживання, а й активно використовувати можливості повторного застосування матеріалів і компонентів, що підвищує екологічну ефективність реконструкції [108]. Згідно з ISO 15686-2 [146], для забезпечення довговічності слід детально аналізувати чинники деградації, зокрема вплив температурних коливань, вологості та сольового туману.

Аналіз численних наукових джерел [16, 20, 21, 26, 27, 28, 30, 34, 102, 147-167, 193, 195] показав, що наразі відсутні комплексні теоретичні та методологічні підходи до сталого забезпечення якості підсилення каркасних будівель із урахуванням життєвого циклу в аспектах технології, конструкцій, матеріалів, економіки, менеджменту, екології та соціальної культури. Особливо актуальним є впровадження інноваційних організаційних та конструктивно-технологічних рішень, які забезпечують необхідний рівень надійності при мінімальному екологічному впливі та поліпшенні економічних і соціальних показників [130]. Це включає підвищення несучої здатності та зниження деформативності конструкцій під час реконструкції або відновлення їх експлуатаційної придатності.

Основні принципи забезпечення якості включають наступне:

1. Оцінка стану будівлі — комплексне обстеження конструкцій, фундаменту, матеріалів та інших компонентів для виявлення дефектів і пошкоджень. Результати обстеження визначають обсяг і характер робіт.
2. Розробка проекту реконструкції — на основі оцінки створюється проект, який передбачає заходи з підсилення, модернізації і відновлення, з особливим акцентом на збереження несучої здатності та зниження деформативності.
3. Використання сучасних технологій і матеріалів — застосування інноваційних матеріалів і технологій, таких як композитні матеріали, високоміцний бетон, антикорозійні покриття, що підвищують довговічність та стійкість конструкцій.
4. Моніторинг та технічне обслуговування — після реконструкції впровадження систем постійного контролю за станом будівлі для своєчасного виявлення дефектів та проведення обслуговування.
5. Дотримання будівельних стандартів — виконання робіт відповідно до діючих нормативів (ДБН, ДСТУ), що гарантують безпеку і надійність конструкцій. Підготовка звітів про технічний стан для забезпечення подальшої експлуатації [5, 52].

6. Кваліфікований персонал — залучення сертифікованих спеціалістів із досвідом у сфері реконструкції каркасних будівель.

7. Інструменти підтримки прийняття рішень — застосування методів порівняння варіантів реконструкції з урахуванням багатьох факторів (вартість, час, екологія, енергозбереження). Використання моделей життєвого циклу для зниження ризиків та балансування витрат і надійності.

У процесі реалізації реконструкційних проєктів важливо розбивати складні завдання на етапи, що відповідають фазам інвестиційного циклу: передінвестиційній, інвестиційній та операційній. На рис. 2.1 наведено дерево рішень, розроблене автором на базі моделі продуктивності Джонса К. та Шарпа М. [168], яке ілюструє типові технічні проблеми, пов'язані зі станом каркасу будівлі. Передінвестиційна фаза включає два ключові етапи, що визначають подальший хід і вартість проєкту.

На початковому етапі реконструкції, у період передінвестиційної фази, визначаються основні потреби та проблеми, що потребують вирішення. Для цього здійснюється аналіз наявних документів, проводяться діагностика, опитування та анкетування. Типові проблеми можуть включати високе енергоспоживання, зміни функціонального призначення будівлі чи збільшення навантаження на каркас.

Наступним кроком є збір інформації про пріоритети, цінності, бюджет і ресурси проєкту, а також визначення основних причин проблем. Враховуються фактори тривалої експлуатації без технічного обслуговування, зниження міцності конструкцій, зміни нормативних вимог або необхідність адаптації до нових функцій.

Далі проводиться детальний аналіз технічного стану каркасу будівлі, оцінка потреб у підсиленні конструкцій та пошук максимально ефективних методів реалізації заходів із мінімізацією перерв у роботі об'єкта.



Рис. 2.1. Модель життєвого циклу інвестиційно-будівельного проекту забезпечення якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції [168]

Паралельно визначаються очікування та потреби усіх зацікавлених сторін: власників, мешканців, місцевої влади, інвесторів. Через багатосторонні переговори формується єдине бачення проекту, що враховує вплив будівлі на навколишнє середовище, очікувану тривалість реалізації та бюджетні обмеження.

На основі зібраних даних проводиться аудит причин проблем, пов'язаних із технічним станом, плануванням та іншими аспектами будівлі. Цей процес носить циклічний характер, оскільки дані уточнюються на кожному етапі.

Для забезпечення якості конструктивно-технологічної системи підсилення каркасу необхідно прийняти рішення, що забезпечить ефективне підсилення конструкції. Вибір рішення базується на ключових показниках ефективності (KPI), які враховують соціальні, економічні, екологічні та контекстні фактори галузі.

KPI організуються у ієрархічну модель у вигляді дерева, де мета стоїть на вершині, а критерії і підкритерії формують гілки. Для формування матриці порівняння кількісні KPI (наприклад, мінімізація капітальних та експлуатаційних витрат, енергоспоживання, скорочення викидів CO₂) масштабуються через моделювання вартості та енергії, що дозволяє оцінити економічну ефективність.

Якісні KPI (наприклад, підвищення надійності конструкцій, збільшення життєвого циклу, вогнестійкість) оцінюються за допомогою критеріїв надійності. Для поєднання якісних і кількісних KPI застосовують різні методи багатокритеріального аналізу, такі як аналітична ієрархія (АНР), мережевий процес (ANP) та інші [116, 117].

KPI можуть мати різні одиниці вимірювання: відсотки, кількість, час, вартість тощо. Визначення ключового показника ефективності залежить від технологічної моделі M_i , що враховує співвідношення кількісних і якісних критеріїв.

Основні критерії оцінки рішень при реконструкції будівель включають:

- Стійкість та безпека будівлі – відповідність стандартам безпеки, захист користувачів.
- Вартість реконструкції – врахування матеріальних, трудових, технічних витрат.
- Якість виконання робіт – відповідність технічним нормам і проектним рішенням.
- Функціональність та ергономіка – відповідність потребам користувачів.
- Екологічність – мінімізація негативного впливу на навколишнє середовище.

Далі здійснюється оцінка ризиків прийнятих рішень, визначаються невизначеності, після чого виконується багатофакторна оптимізація.

Порівняння вартості реконструкції та повної заміни каркасу, включаючи капітальні і експлуатаційні витрати, дозволяє визначити доцільність заходів. Враховуються такі фактори, як вік будівлі, її стан, плановане використання, ризики для оточуючих об'єктів, наявність дозволів та фінансові можливості.

Для визначення економічної ефективності застосовують коефіцієнт вигоди-витрат (Benefit/Cost Ratio, BCR), що включає витрати на податки, обслуговування, страхування та інші витрати. За результатами оцінки може бути обрана стратегія часткового або повного відновлення, або прийнято рішення про знесення будівлі [88].

Введення об'єкта в експлуатацію супроводжується оцінкою його функціонування та відповідності очікуванням інвесторів, що дає змогу планувати подальші ремонти.

На основі узагальнення всіх даних, зокрема щодо вартості реконструкції чи заміни, приймається остаточне рішення і розробляється проект реконструкції.

Таким чином, представлена на рисунку 2.10 модель життєвого циклу інвестиційно-будівельного проєкту реконструкції із підсиленням каркасних будівель охоплює повний спектр етапів прийняття рішень — від ідентифікації проблем до аналізу альтернатив та остаточного вибору оптимального рішення.

Ключову роль у забезпеченні якості підсилення конструкцій відіграє застосування системи ключових показників якості, які дозволяють здійснити комплексну багатокритеріальну оцінку з урахуванням технічних, економічних, екологічних та соціальних факторів.

Формування ієрархічної структури критеріїв, оцінка ризиків та порівняльний аналіз варіантів реконструкції створюють підґрунтя для обґрунтованого вибору технологічних рішень. У цьому контексті актуальним є визначення переліку ключових критеріїв, які будуть використані для подальшої оцінки якості КТР підсилення каркасних будівель. Це стане предметом розгляду в наступному підрозділі.

2.2. Загальні принципи побудови методики дослідження.

У процесі тривалої експлуатації каркасні конструкції будівель зазнають безперервних фізико-механічних, корозійних та експлуатаційних змін, що призводить до накопичення пошкоджень, зниження несучої здатності, жорсткості та експлуатаційної надійності. За умов реконструкції такі процеси ускладнюються обмеженістю ресурсів, необхідністю поетапного виконання робіт, впливом існуючої забудови та вимогами безперервної експлуатації об'єкта.

У зв'язку з цим актуальною науково-прикладною проблемою є підвищення якості та надійності підсилення каркасних будівель шляхом обґрунтованого вибору конструктивно-технологічних рішень, що враховують реальний технічний стан об'єкта, технологічні ризики, економічні обмеження та соціально-екологічні вимоги.

Розв'язання цієї проблеми потребує розроблення узагальненої науково обґрунтованої методики дослідження, заснованої на системному підході до формування КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель протягом усього життєвого циклу об'єкта.

Метою дослідження є формування системного підходу до розробки методології підвищення якості підсилення каркасних будівель у процесі реконструкції, що інтегрує технічні, технологічні, організаційні, економічні, соціальні та екологічні чинники, що відповідає зокрема сучасним критеріям сталого будівництва.. Для досягнення поставленої мети в межах методики передбачається вирішення таких основних завдань:

- забезпечення надійності, безпеки та довговічності підсилених каркасних конструкцій;
- оптимізація трудомісткості, тривалості та собівартості будівельно-монтажних процесів;
- урахування технологічних ризиків і втрат на етапах проектування та виконання робіт;
- інтеграція соціальних і екологічних обмежень у процес прийняття рішень;
- впровадження ефективного управління ресурсами на всіх етапах життєвого циклу будівлі;
- відновлення та підвищення експлуатаційної придатності каркасних конструкцій.

При розробленні загальних принципів методики дослідження проаналізовано праці провідних вітчизняних і зарубіжних науковців, зокрема: Г.М. Тонкачєєва [16-19], П.Є. Григоровського [20], О.С. Молодіда [21], О.А. Тугая [79], В.В. Савйовського [28], С.С. Атаєва [150], А.І. Білоконя [149], Д.Ф. Гончаренка [151-153], А.Д. Єсипенка [154], Т.С. Кравчуновської [155], О.І. Менеїлюка [156], В.Р. Млодецького [46], О.Ф. Осипова [26-27], Ф. Пенья-Мора, М. Голпарвар-Фард [103-104], С. Маффіні [105], Рю [30], Вехвіляйнен і Ванханен [86], Аттаянезе [87], Кронхьорт і Ле Ру [108], Міллер і Бойс [109], Бхуян та ін. [31], Багасі [111], Ф.Зарєян і Г.Кравінклер [112], Д. Парк, Хьон Лі та Инсу Чхве [113], А. Г'юз з колегами [114], П.Морато та Х.Андріотіс [115], Ч. Юн [117], Лян Су і Хай Цзянь Хе [118], Х.Хароглу [119], А.В. Радкевича [170], В.К. Черненко

[35, 48, 171], Ю.В. Крючкова [147], М.В. Прядко [56], а також О.І. Неровецького, О.В. Федосової, М.С. Буднікова, О.О. Літвінова, Ю.І. Белякова та ін.

Їхні наукові підходи ґрунтуються на використанні широкого спектра методів: експериментальних, структурного аналізу, функціонального системного підходу, математичного та імітаційного моделювання, ймовірно-статистичного дослідження, автоматизованого моніторингу, оптимізаційних процедур, узагальнення, вирішення багатофакторних задач, методів прогнозування, пріоритезації, нормування та формалізації алгоритмів прийняття рішень у складних інженерних умовах.

У таблиці 2.1 узагальнено основні підходи, інструментальні засоби та обмеження існуючих методологій, що застосовуються при формуванні моделей технологічних рішень (МТР) при реконструкції та підсиленні каркасних будівель. Основні обмеження подано з позицій повноти охоплення життєвого циклу, рівня конструктивно-технологічної інтеграції та можливості практичної реалізації рішень.

Проведений аналіз засвідчує фрагментарність існуючих методологічних підходів, які, як правило, зосереджуються на окремих стадіях життєвого циклу об'єкта, мають вузьку предметну спрямованість (наприклад, орієнтацію виключно на енергоефективність, сейсмостійкість або економічну доцільність) та не забезпечують інтегрованого врахування конструктивних, технологічних, організаційних і ресурсних обмежень, а також пов'язаних ризиків у межах єдиної організаційно-технологічної моделі, орієнтованої на повний життєвий цикл каркасної будівлі.

У зв'язку з цим виникає об'єктивна необхідність розроблення нової методології формування МТР, яка:

- поєднує міждисциплінарні підходи (інженерні, економічні, соціальні та інформаційні);
- забезпечує системне управління якістю підсилення каркасних будівель в умовах реконструкції;

Таблиця 2.1

Узагальнена характеристика науково-практичних підходів до формування
МТР при реконструкції каркасних будівель

№	Основний підхід / Концепція	Інструменти / Методи	Основні обмеження
1	Функціонально-структурний аналіз, нормування	Експеримент, алгоритмізація, моделювання	Орієнтованість на нормативне проектування, недостатня адаптивність
2	Цифрове управління реконструкцією	Візуалізація, моніторинг, BIM, Інтернет речей (IoT)	Не охоплює стадії експлуатації та адаптації
3	Інтеграція енергоефективності та спадщини	Сценарне моделювання, LCA	Обмежений конструктивно-технологічний аналіз
4	Соціо-гуманітарне проектування	Орієнтація на людину, ергономіка, соціальні дослідження	Відсутність інженерної інтеграції
5	Сталість у реконструкції	Сталий фреймворк (LEED / BREEAM), KPI сталості	Обмежена адаптивність до стану об'єкта
6	AI-асистований концептуальний та варіантний дизайн	LLM, генеративний дизайн, BIM-моделювання будівель	Орієнтація на концептуальну стадію без подальшої верифікації
7	Сейсмостійке проектування	Система підтримки прийняття рішень (DSS), проектування за заданими показниками ефективності	Не враховує повний життєвий цикл
8	Мінімізація сейсмічного ризику	Ризик-модель, витрати/втрати	Лише конструктивний ризик, без орг.-соц. факторів
9	Моніторинг ризику	Байєсівські мережі (Bayesian), імовірнісне оцінювання ризиків (PRA)	Методологічно не інтегрований у системи прийняття рішень
10	Моделювання динаміки зносу конструкцій	Навчання з підкріпленням (RL), Bayesian	Технічна складність, обмежене масштабування
11	DSS в будівництві	Багатокритеріальний аналіз рішень, ML, Fuzzy, Bayesian	Фокус на передпроектний та проектний стадіях
12	Вибір матеріалів	АНР, LCA, економіка	Відсутність технологічних рішень
13	Діагностика пошкоджень	Дерева рішень, сейсмічні карти	Обмежено прогностичним аналізом
14	Інтегрований підхід «Design-Build»	Інтерв'ю, мультистейкхолдер	Менеджерський контекст без технічної деталізації
15	Сталий підхід до модернізації	Матеріально-технічна інтеграція	Без врахування структурної адаптації
16	Архітектурна енергоефективність	Екологічні метрики, сталий дизайн	Відсутність технологічної реалізації
17	Управління життєвим циклом	LCC, експлуатаційна ефективність	Немає оцінки довготривалої дії на конструкцію

– передбачає реалізацію повного циклу прийняття рішень на основі достовірних даних, прогнозування, зворотного зв'язку та багатокритеріального аналізу.

Узагальнена структура універсальної множини рішень у межах технологічної моделі КТС повинна включати:

- алгоритмічне ядро прийняття рішень з урахуванням багатфакторного аналізу;
- системне моделювання конструктивно-технологічної поведінки каркасу;
- цифрову платформу з елементами BIM, LCA, AI та аналізу ризиків;
- модуль моніторингу та адаптивного зворотного зв'язку;
- інструменти соціально-економічної та організаційної оцінки;
- механізми адаптивного управління протягом життєвого циклу будівлі.

З урахуванням складності процесів реконструкції методика дослідження передбачає поетапну реалізацію, яка представлена блок-схемою реалізації методики досліджень та наведена на рис. 2.2.

На рисунку 2.3 представлено блок-схему алгоритму побудови методики дослідження якості підсилення каркасних будівель у межах конструктивно-технологічної системи. Запропонований алгоритм відображає послідовність і взаємозв'язок основних етапів формування методики — від аналізу технічного стану існуючих конструкцій та ідентифікації проблем до формулювання рекомендацій і апробації результатів у реальних умовах реконструкції

Ключовою особливістю алгоритму є інтеграція багатокритеріальної оцінки якості підсилення, що охоплює технічні, технологічні, економічні, екологічні та соціальні критерії, а також урахування технологічних ризиків і втрат, які виникають на різних етапах виконання робіт, а також використання сучасних цифрових інструментів, зокрема BIM-технологій для підтримки процесів проєктування, будівництва та експлуатації, а також Lean-підходів для мінімізації втрат ресурсів і підвищення ефективності організаційно-технологічних процесів. Це дозволяє здійснювати обґрунтований вибір конструктивно-технологічних

рішень на основі системного аналізу альтернатив із застосуванням методів багатокритеріального прийняття рішень.

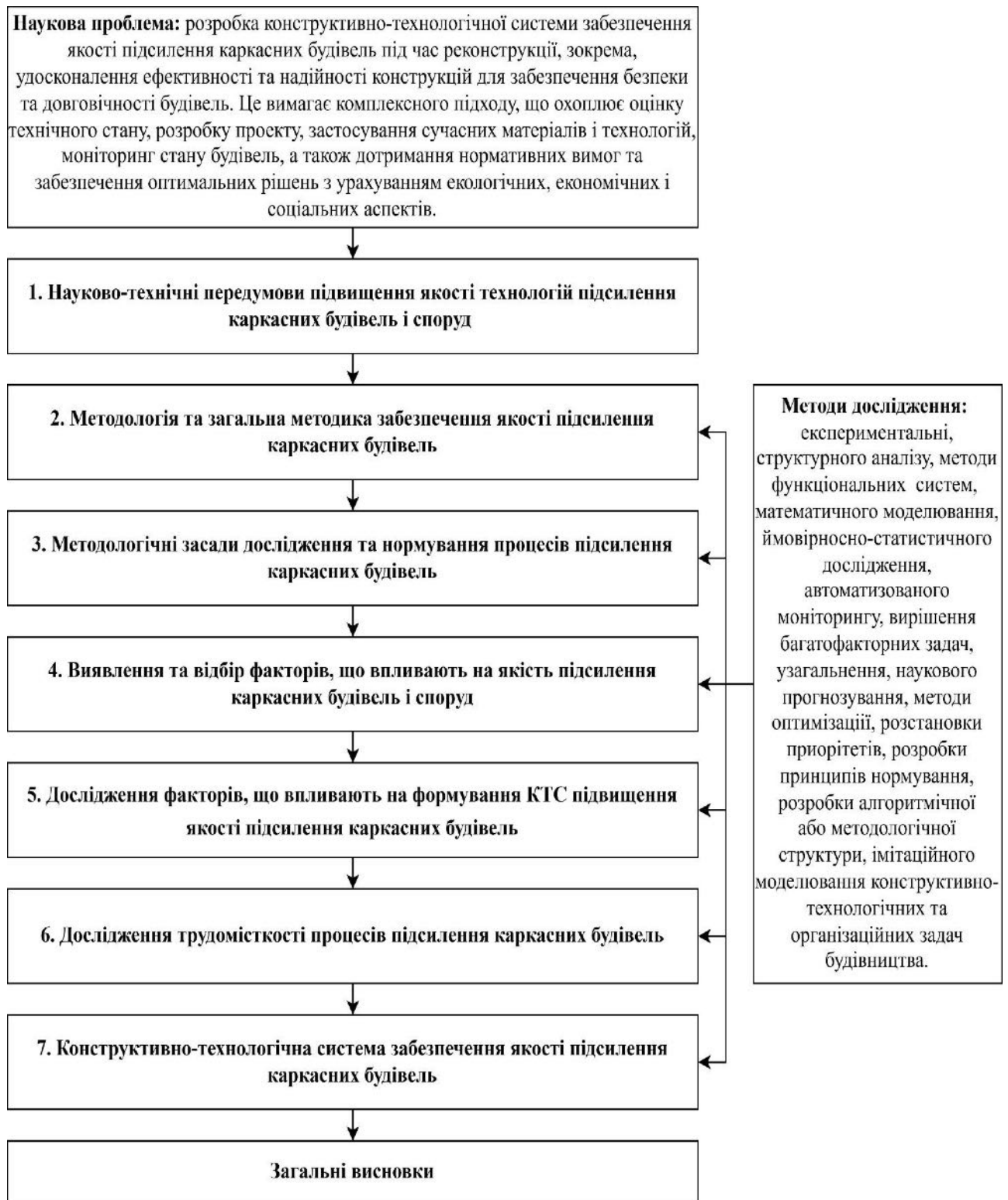


Рис.2.2. Загальна блок-схема методики досліджень



Рис. 2.3. Блок-схема алгоритму побудови методики дослідження якості підсилення каркасних будівель у межах конструктивно-технологічної системи

2.3. Відбір критеріїв оцінювання якості конструктивно-технологічних рішень підсилення каркасних будівель

У процесі реконструкції каркасів будівель якість КТР визначається не лише рівнем забезпечення несучої здатності та безпеки, а й сукупністю економічних, екологічних і соціальних чинників. Це зумовлює необхідність застосування

комплексного підходу до оцінки якості підсилення, у межах якого одночасно враховуються експлуатаційна надійність, ефективність реалізації та довготривала сталість реконструйованого об'єкта.

Підвищення експлуатаційної надійності каркасів будівель у процесі реконструкції є однією з ключових науково-практичних задач, оскільки такі об'єкти, як правило, характеризуються наявністю пошкоджень, обмеженим залишковим ресурсом та необхідністю виконання робіт в умовах функціонуючого середовища. За цих умов традиційні підходи, орієнтовані переважно на перевірку граничних станів, не забезпечують повноцінного врахування факторів ризику, ефективності та сталості прийнятих рішень.

Міжнародні стандарти та настанови у сфері будівництва і сталого розвитку (ISO [130, 88, 136], BREEAM [135], DGNB [134] та ін. [2–7]) формують нормативну та методологічну основу для проєктування, виконання робіт і оцінювання впливу будівельних рішень на довкілля, а також для нормування якості технологічних процесів підсилення конструкцій. Водночас зазначені документи не пропонують єдиної інтегрованої методології, яка б забезпечувала всебічну підтримку прийняття рішень саме при виборі конструктивно-технологічних рішень з підсилення каркасів існуючих будівель.

На практиці вибір методів підсилення значною мірою ґрунтується на професійному досвіді інженерів-проєктувальників та використанні обмеженого набору критеріїв оцінки. Відсутність системної інтеграції кількісних показників життєвого циклу (LCA), ключових показників ефективності (KPI), а також даних цифрового моніторингу технічного стану часто призводить до прийняття локально оптимальних, але загалом неефективних рішень, що знижують технічну якість, підвищують витрати ресурсів і не забезпечують належного рівня експлуатаційної надійності.

У зв'язку з цим у даному дослідженні розроблено авторський підхід до формування системи критеріїв оцінки якості КТР підсилення каркасних будівель, який базується на інтеграції трьох взаємопов'язаних груп показників [285]:

- критеріїв надійності (N_i), що характеризують технічний стан, безпеку та довговічність каркасу;
- критеріїв ефективності (R_i), які відображають технологічну, економічну та організаційну доцільність прийнятих рішень;
- критеріїв сталості (A_i), що враховують екологічні, соціальні та довгострокові аспекти реконструкції.

Авторський підхід відрізняється від існуючих тим, що:

- поєднує кількісні та якісні показники в єдиній системі оцінювання;
- забезпечує узгодження технічних, економічних і екологічних цілей реконструкції;
- створює методичну основу для подальшого використання BIM-, Lean- та ризик-орієнтованих моделей при виборі КТР підсилення.

З урахуванням принципів сталого будівництва та розподілу відповідальності між учасниками проєкту в таблиці 2.2 наведено узагальнені критерії якості реконструкції та їх відповідність ролям основних стейкхолдерів.

Для подальшого формалізованого аналізу в роботі запропоновано групування критеріїв оцінки якості підсилення каркасів будівель за трьома базовими категоріями: надійність, ефективність та сталість. Такий поділ відповідає сучасній міжнародній практиці оцінювання якості будівництва і реконструкції та водночас дозволяє адаптувати її до специфіки існуючих будівель і умов їх підсилення [172-175].

Запропонована система критеріїв, наведена в таблиці 2.3, є результатом узагальнення нормативних вимог, результатів наукових досліджень та авторського аналізу практики реконструкції, і використовується в подальших розділах роботи як основа для побудови моделей оцінки КТР підсилення, порівняння альтернативних варіантів реконструкції, а також для обґрунтування прийняття інженерних рішень з урахуванням життєвого циклу будівлі.

Таблиця 2.2

Основні критерії якості реконструкції та відповідальність учасників проекту в контексті сталого підходу до підсилення конструкцій

Основні показники ISO	Критерії відповідно до DGNB	Відповідальність учасника проекту
Викиди в повітря	Вплив життєвого циклу матеріалів (LCA), зниження викидів	Інженер ОБІК, архітектор
Використання ресурсів	Енергоефективність, водозбереження, моніторинг	Інженери-механіки, замовник
Управління відходами	Переробка та мінімізація будівельних відходів	Підрядник, будівельник
Вплив на будівельний майданчик	Екологія сайту, зменшення забруднення	Архітектор, будівельник
Безпека та доступність	Пожежна безпека, інклюзивний дизайн	Архітектор, експерт із пожежної безпеки
Якість внутрішнього середовища	Вентиляція, денне освітлення, звукоізоляція	Архітектор, інженери HVAC та акустики
Естетичні та функціональні якості	Гнучкість, дизайн, інтегроване мистецтво	Архітектор, дизайнер інтер'єрів
Процес реалізації	Комплексне планування, контроль якості	Замовник, підрядник, всі учасники
Викиди в повітря	Вплив життєвого циклу матеріалів (LCA), зниження викидів	Інженер ОБІК, архітектор
Використання ресурсів	Енергоефективність, водозбереження, моніторинг	Інженери-механіки, замовник
Управління відходами	Переробка та мінімізація будівельних відходів	Підрядник, будівельник
Вплив на будівельний майданчик	Екологія сайту, зменшення забруднення	Архітектор, будівельник
Безпека та доступність	Пожежна безпека, інклюзивний дизайн	Архітектор, експерт із пожежної безпеки
Якість внутрішнього середовища	Вентиляція, денне освітлення, звукоізоляція	Архітектор, інженери HVAC та акустики
Естетичні та функціональні якості	Гнучкість, дизайн, інтегроване мистецтво	Архітектор, дизайнер інтер'єрів

2.3.1. Призначення критеріїв експлуатаційної надійності каркасів будівель та відбір чинників, які впливають на їх вибір

Підвищення експлуатаційної надійності каркасів будівель у процесі реконструкції є ключовою умовою забезпечення безпечної та довготривалої експлуатації об'єктів. З огляду на наявність пошкоджень, обмежений залишковий ресурс та змінені нормативні вимоги, виникає необхідність формалізованого відбору критеріїв, які комплексно характеризують надійність реконструйованого

каркасу. У даній роботі експлуатаційна надійність каркасів будівель оцінюється за сукупністю критеріїв N_i , що охоплюють конструктивні, матеріальні, нормативні, технологічні та експлуатаційні аспекти реконструкції [5, 50-52, 54, 74, 139, 200].

Таблиця 2.3

Ключові фактори оцінки якості реконструкції будівель

Категорія	Фактор	Опис
Надійність	Призначення конструкції	Відповідність функціональним вимогам: міцність, жорсткість, стійкість
	Надійність конструкцій	Імовірність відмов, довговічність, опір корозії
	Експлуатаційна безпека	Безпека для користувачів, відповідність нормам
	Контроль якості	Відсоток дефектів, витрати на контроль, відповідність стандартам
	Моніторинг та техобслуговування	Наявність SHM-систем, регулярний огляд, зниження ризику відмов, використання machine learning
	Стійкість до зовнішніх впливів	Пожежна безпека, захист від атмосферних і біологічних чинників
Ефективність	Будівельність, технологічність	Простота реалізації: геометрія, структура, склад
	Ремонтопридатність	Трудомісткість, тривалість та вартість відновлення
	Тривалість та вартість реконструкції	Оптимізація бюджету та термінів через вибір технологій і методів
	Технологічна ефективність	Впровадження BIM, Lean, інноваційних рішень
	Капітальні витрати	Зменшення затрат на проектування, матеріали, обладнання
	Повна вартість життєвого циклу	Врахування CAPEX, OPEX, LCA
	Інтелектуальна підтримка рішень (ML/ANN)	Застосування нейронних мереж для прогнозування ефективності, ризиків
Сталість	Довговічність	Продовження терміну служби конструкцій
	Екологічність матеріалів	Рівень використання перероблених і екологічних матеріалів
	Енергозбереження і водозбереження	Зменшення споживання ресурсів під час експлуатації
	Управління відходами	Мінімізація, сортування та рециклінг будівельних відходів
	Соціальна сталість	Комфорт, збереження культурної спадщини, громадське сприйняття
	Естетика	Архітектурна виразність, гармонійність із середовищем

Система критеріїв експлуатаційної надійності представлена у вигляді укрупненої структурної схеми (рис. 2.4), яка відображає логіку їх формування та ієрархічні взаємозв'язки [285].

Критерії групи N_I (табл. 2.4) характеризують відповідність обраної конструктивної схеми та матеріалів вимогам надійності, довговічності й ефективності протягом життєвого циклу будівлі [126, 137, 139].

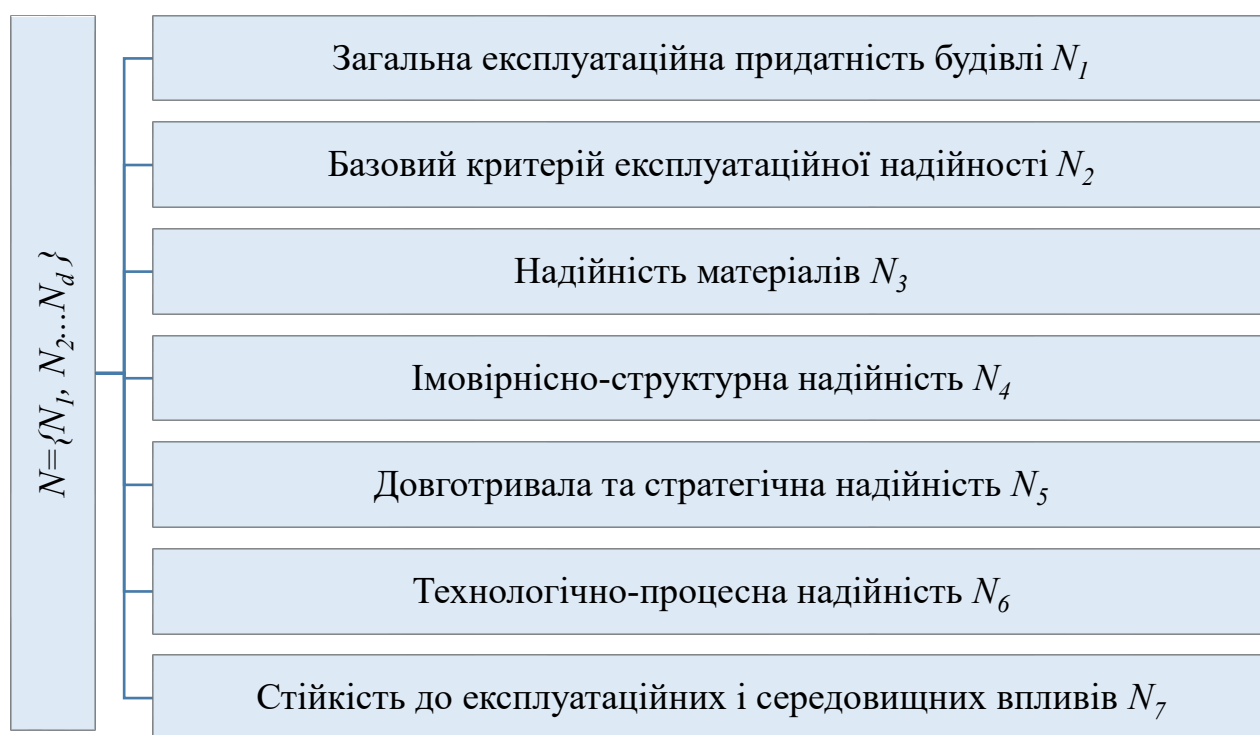


Рис. 2.4. Структурна схема системи критеріїв експлуатаційної надійності каркасних будівель у процесі реконструкції

Таблиця 2.4

Критерії групи N_I - Загальна експлуатаційна придатність

Позн.	Назва критерію	Показник та од.виміру
N_{I1}	Ймовірність витримання навантажень	Ймовірність, P , $\{0 \dots 1\}$
N_{I2}	Розрахунковий термін служби	Час, T , роки
N_{I3}	Стійкість до стихійних впливів	Ймовірність, P , $\{0 \dots 1\}$

Показник N_{11} визначає імовірність того, що напруження в елементах каркасу не перевищать граничні значення за заданих умов експлуатації: $P = 1 - F(\sigma)$, де $F(\sigma)$ - функція розподілу напружень (міцності), σ - розрахункові напруження.

Критерії групи N_2 (табл. 2.5) формують базовий рівень оцінювання експлуатаційної надійності каркасних конструкцій та поєднують фізико-механічні характеристики елементів із нормативно-ризиковими вимогами та класом наслідків об'єкта.

Критерій N_{21} характеризує ступінь надійності конструкції з урахуванням імовірності досягнення граничного стану. Значення індексу приймаються відповідно до класу наслідків об'єкта: зокрема, для об'єктів класу СС3 рекомендується $\beta \geq 3,8$, що відповідає підвищеним вимогам безпеки.

Таблиця 2.5

Критерії групи N_2 - Базовий критерій експлуатаційної надійності

Позн.	Назва критерію	Показник та од.виміру
N_{21}	Індекс надійності	Індекс надійності, β , –
N_{22}	Клас наслідків будівлі	Категорія, СС, {СС1; СС2; СС3}
N_{23}	Інтегральна нормативна відповідність	Безрозмірний показник, {0...1}
$N_{23.1}$	Запас несучої здатності	Коефіцієнт, R^d/E^d , –
$N_{23.2}$	Забезпечення експлуатаційного ресурсу	Коефіцієнт, T_{fact}/T_{norm} , {0...1}
$N_{23.3}$	Повнота нормативної відповідності	Частка виконання, $n_{вик}/n_{заг}$, {0...1}

Критерій N_{22} визначається згідно з ДБН В.1.2-14:2018 та відображає рівень потенційної небезпеки у разі відмови або руйнування конструкцій [5, 139, 176]. Клас наслідків використовується як базовий параметр для встановлення нормативних вимог до розрахунків і контролю надійності.

Критерій N_{23} характеризує ступінь відповідності проєктних і технологічних рішень чинним нормативним документам (ДБН, ДСТУ, EN) з урахуванням класу

наслідків об'єкта та спрямований на забезпечення нормативного рівня надійності, безпеки і довговічності конструкцій.

На відміну від традиційного нормативного підходу, у якому виконання вимог розглядається як декларативна умова, у роботі запропоновано критерій N_{23} як інтегральний показник надійності, що дозволяє кількісно оцінити повноту та якість виконання нормативних вимог та пов'язаних ризиків, що є особливо актуальним для реконструкції будівель з обмеженим залишковим ресурсом. Критерій N_{23} охоплює такі складові:

- виконання розрахунків надійності відповідно до актуалізованих навантажень і впливів;
- забезпечення проектного ресурсу та заданого терміну служби каркасу;
- урахування аварійних і експлуатаційних ризиків;
- дотримання вимог до жорсткості, стійкості та граничних деформацій.

Інтегральне значення критерію визначається як:

$$N_{23} = \sum w_{23i} \cdot \hat{N}_{23i}, \hat{N}_{23i} \in [0; 1] \quad (2.1)$$

де w_{23i} — вагові коефіцієнти, що залежать від класу наслідків об'єкта.

Підкритерій $N_{23,1}$ — запас несучої здатності визначається за формулою:

$$N_{23,1} = \frac{R_d}{E_d} \quad (2.2)$$

де R_d — розрахункова несуча здатність, E_d — розрахункове навантаження. Значення $N_{23,1} \geq 1$ свідчить про виконання вимог нормативної надійності. Значення $N_{23,1} < 1$ вказує на необхідність підсилення або зміни конструктивно-технологічних рішень.

Запровадження показника $N_{23,1}$ дозволяє кількісно оцінити запас несучої здатності конструкцій відносно сучасних нормативних навантажень, що є принципово важливим для будівель, зведених за застарілими нормами, у яких

рівень снігових, вітрових та експлуатаційних впливів був істотно нижчим. Так, наприклад, нормативні значення снігових навантажень на покрівлю, прийняті до введення ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи» [33], у ряді регіонів були приблизно у два рази меншими за сучасні нормативні значення.

$N_{23,2}$ – Забезпечення експлуатаційного ресурсу

$$N_{23,2} = \min\left(\frac{T_{\text{fact}}}{T_{\text{norm}}}, 1.0\right), \quad (2.3)$$

де T_{fact} — розрахунковий термін служби після реконструкції, T_{norm} — нормативний термін служби для класу наслідків.

$N_{23,3}$ – повнота нормативної відповідності:

$$N_{23,3} = \frac{n_{\text{виконано}}}{n_{\text{заг}}} \quad (2.4)$$

де $n_{\text{заг}}$ — кількість обов’язкових нормативних перевірок, $n_{\text{виконано}}$ — кількість виконаних і підтверджених перевірок.

Оцінювання урахування ризиків ґрунтується на контролі розрахункових і аварійних навантажень, вимог до вогнестійкості, запобігання прогресуючому руйнуванню та дотримання технологічних допусків, що забезпечує об’єктивність і відтворюваність показника. Підсумкове значення критерію:

$$N_{23} = w_1 N_{23,1} + w_2 N_{23,2} + w_3 N_{23,3}, \quad (2.5)$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1, \quad w_1 > w_2 > w_3,$$

де співвідношення ваг відображає пріоритет вимог безпеки та експлуатаційної надійності залежно від класу наслідків (СС1–СС3), їх можуть уточнюватися в межах КТС за допомогою методів багатокритеріальної оптимізації або алгоритмів машинного навчання.

Критерії групи N_3 (табл. 2.6) характеризують фізико-механічні властивості матеріалів, що застосовуються під час реконструкції каркасів будівель, та

визначають їхню здатність забезпечувати експлуатаційну надійність конструкцій протягом заданого терміну служби. Оцінювання витривалості матеріалів є необхідною умовою забезпечення довговічності та безвідмовної роботи підсилених елементів [132, 293].

Критерії групи N_4 (табл. 2.7) характеризують імовірнісні та структурні аспекти експлуатаційної надійності каркасів будівель і використовуються для оцінки ризику відмов та граничних станів конструкцій [200].

Таблиця 2.6

Критерії групи N_3 - Визначення витривалості матеріалів

Позн.	Назва критерію	Показник та од.виміру
N_{31}	Статична міцність	Напруження, $\sigma_{\text{и}}, \sigma_{\text{у}}$, МПа
N_{32}	Втомна міцність	Напруження, σ_{fat} , МПа
N_{33}	Ударна в'язкість	Енергія, KCU , Дж/см ²
N_{34}	Однорідність властивостей	Коефіцієнт варіації, V , –
N_{35}	Термін служби матеріалу	Час, T , роки

Таблиця 2.7

Критерії групи N_4 - Імовірнісно-структурна надійність

Позн.	Назва критерію	Показник та од.виміру
N_{41}	Ймовірність безвідмовної роботи	Ймовірність, $P(t)$, $\{0 \dots 1\}$
N_{42}	Жорсткість і стійкість конструкції	Момент інерції, I , см ⁴ ; напруження $\sigma_{\text{ср}}$, МПа
N_{43}	Приріст несучої здатності підсилених елементів	Відносне підвищення несучої здатності, $\Delta R / R_0$, %

Критерій N_{41} визначає ймовірність безвідмовної роботи конструкцій у заданий період експлуатації та використовується для оцінки рівня структурного ризику. Визначається за формулою:

$$P(t) = 1 - Q(t), \quad Q(t) = \frac{t_{\text{без}}}{t} \quad (2.6)$$

$Q(t)$ – показник надійності, $t_{\text{без}}$ – час безвідмовної роботи, t – загальний час функціонування.

Показник N_{43} характеризує ефективність конструктивного втручання за результатами розрахунків за граничними станами. Він виражається у відсотках і відображає відносний приріст несучої здатності підсилених елементів каркасу ΔR відносно їх вихідного технічного стану R_0 .

Критерії групи N_5 (табл. 2.8) характеризують стратегічну надійність КТР та спрямовані на обмеження передчасного морального і технічного застарівання реконструйованих каркасів будівель [5, 88, 93].

Таблиця 2.8

Критерії групи N_5 - Довготривала та стратегічна надійність

Позн.	Назва критерію	Показник та од.виміру
N_{51}	Індекс запланованого застарівання	POI, -
N_{52}	Тривалість ефективної експлуатації	Час, Т, роки

Критерій N_{51} (Planned Obsolescence Index, POI) використовується для оцінки схильності прийнятих рішень до передчасного технічного або функціонального застарівання.

Критерій N_{52} (Obsolescence-Free Operational Duration) характеризує тривалість ефективної експлуатації підсилених конструкцій до настання технічного або функціонального застарівання, протягом якого забезпечується відповідність вимогам надійності, безпеки та експлуатаційної доцільності.

Критерії N_6 – N_7 віднесено до групи додаткових критеріїв експлуатаційної надійності, які деталізують окремі аспекти реалізації, експлуатації та довготривалої стійкості КТР. З метою усунення різнорівневості та забезпечення логічної узгодженості, ці критерії згруповано за функціональною ознакою.

Критерії групи N_6 (табл. 2.9) характеризують технологічно-процесну надійність реалізації конструктивно-технологічних рішень у процесі реконструкції каркасів будівель та відображають ступінь керованості, відтворюваності й стабільності виконання будівельно-монтажних робіт.

Таблиця 2.9

Критерії групи N_6 - Технологічно-процесна надійність

Позн.	Назва критерію	Показник та од.виміру
N_{61}	Відповідність монтажу проєктним вимогам	Коефіцієнт відповідності, CR_m , $\{0 \dots 1\}$
N_{62}	Регулярність технічного обслуговування	Коефіцієнт відповідності, CR_b , $\{0 \dots 1\}$
N_{63}	Рівень впровадження сучасних технологій	Коефіцієнт успішності, $TASR$, $\{0 \dots 1\}$

Критерій N_{61} визначає ступінь дотримання проєктних і технологічних вимог під час монтажу конструкцій та використовується для оцінки якості виконання будівельно-монтажних операцій. Він визначається відношенням кількості правильно виконаних монтажних операцій або виявлених дефектів до загальної кількості монтажних операцій:

$$CR_m = \frac{m_{np}}{m}, \quad CR_m = \frac{m_{def}}{m} \quad (2.7)$$

Критерій N_{62} характеризує системність і регулярність технічного обслуговування конструкцій після завершення реконструкції, що безпосередньо впливає на збереження проєктної надійності.

Критерій N_{63} (Technology Adoption Success Rate, $TASR$) відображає рівень застосування сучасних технологій і методів під час реконструкції та використовується для оцінки технологічної прогресивності прийнятих рішень, та визначається за формулою:

$$TASR = \frac{n_{yчп}}{n} \quad (2.8)$$

$n_{yчп}$ - кількість успішно впроваджених технологій, n - загальна кількість спроб впровадження.

Критерії групи N_7 (табл. 2.10) характеризують здатність реконструйованих каркасів будівель зберігати експлуатаційну надійність під дією пожежних, кліматичних та агресивних середовищних факторів.

Таблиця 2.10

Критерії групи N_7 - Стійкість до експлуатаційних і середовищних впливів

Позн.	Назва критерію	Показник та од.виміру
N_{71}	Вогнестійкість конструкцій	Час вогнестійкості, t , хв (год)
N_{72}	Стійкість до атмосферних і корозійних впливів	Індекс стійкості, ARI (Atmospheric Resistance Index) / CRR (Corrosion Resistance Rating) / UVR (UV Resistance), [0;1]

Критерій N_{71} визначає здатність конструкцій зберігати несучу здатність і цілісність протягом нормативного часу пожежного впливу.

Критерій N_{72} використовується для оцінки довготривалої стійкості конструкцій до кліматичних, корозійних та ультрафіолетових впливів (особливо полімерів, FRP, покриттів) у процесі експлуатації.

Збір і аналіз інформації по критеріями надійності подається у вигляді відповідної матриці:

$$N = \{N_1, N_2, \dots, N_d\} \quad (2.9)$$

Запропонована система критеріїв експлуатаційної надійності N_i використовується як формалізована основа для оцінювання та порівняння моделей КТР у процесі реконструкції каркасів будівель. Значення окремих критеріїв та їх інтегральні показники безпосередньо впливають на вибір, обґрунтування та оптимізацію відповідних моделей M_{KTI}

До критеріїв, безпосередньо пов'язаних із технологічними ризиками та втратами під час виконання робіт, віднесено N_4 (контроль якості робіт) та N_6 (технологічно-процесна надійність), які характеризують стабільність і керованість будівельно-монтажних процесів та визначають фактичну реалізацію

проектної надійності конструкцій. Критерій N_8 відображає довготривалі наслідки прийнятих технологічних рішень і застосовується для оцінки стратегічних втрат у життєвому циклі об'єкта. Зазначені критерії використовуються для аналізу факторів F_1-F_7 (розділ 3.6) та забезпечують кількісну оцінку ефективності впровадження принципів ощадливого виробництва в процесах реконструкції.

2.3.2. Призначення критеріїв ефективності життєвого циклу каркасних будівель та відбір чинників, які впливають на їх вибір

Критерії ефективності життєвого циклу каркасних будівель (R_i) призначені для кількісної та якісної оцінки доцільності конструктивно-технологічних рішень з урахуванням повного життєвого циклу будівлі — від проектування та виконання робіт до експлуатації, реконструкції та можливого демонтажу. На відміну від локальних техніко-економічних показників, критерії R_i забезпечують комплексну оцінку ефективності рішень з позицій витрат, ресурсоспоживання, технологічності та соціального впливу [116].

У роботі критерії ефективності R_i згруповано в чотири підгрупи (рис.2.5): RE_s — ефективність експлуатації та життєвого циклу; RK_s — оптимальність капітальних інвестицій; RT_s — ефективність технологічного процесу виконання робіт; R — технологічність конструктивних рішень [9, 12, 70, 126, 127, 137, 285].

Зазначені підгрупи безпосередньо впливають на формування моделей ОТР (M_{OTi}), тоді як їх значення та вагомість визначаються прийнятою моделлю КТР (M_{KTi}).

Критерії ефективної експлуатації та життєвого циклу RE_s сформовано з урахуванням того, що життєвий цикл каркасної будівлі охоплює всі стадії існування об'єкта — від проектування і реконструкції до експлуатації та виведення з експлуатації. Підвищення ефективності життєвого циклу вимагає багатокритеріального підходу, який забезпечує комплексний облік економічних,

ресурсних, екологічних і соціальних чинників з урахуванням експлуатаційних ризиків.

Система критеріїв ефективної експлуатації каркасних будівель у процесі реконструкції представлена у вигляді укрупненої структурної схеми (рис. 2.6), яка відображає логіку формування та ієрархію показників [70, 126, 137].

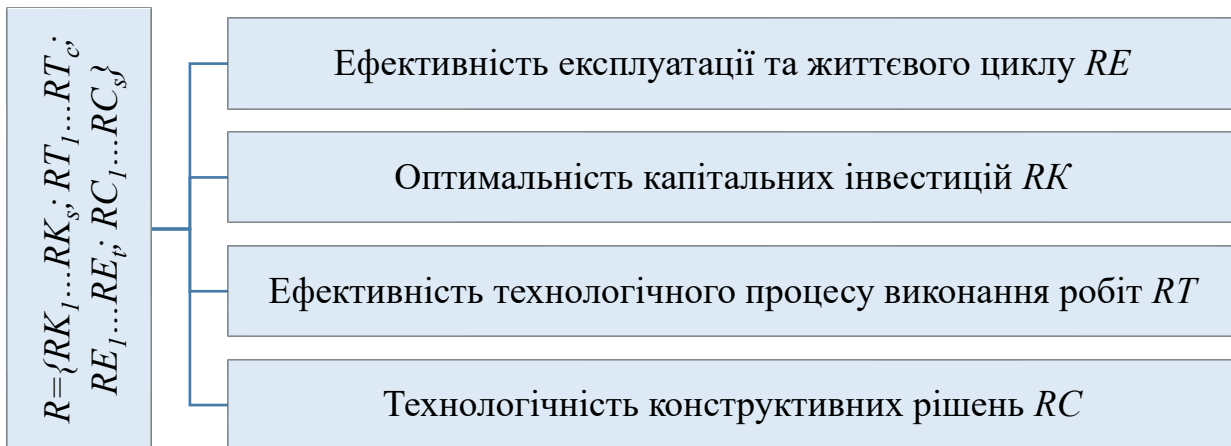


Рис. 2.5. Структурна схема системи критеріїв ефективності каркасних будівель у процесі реконструкції

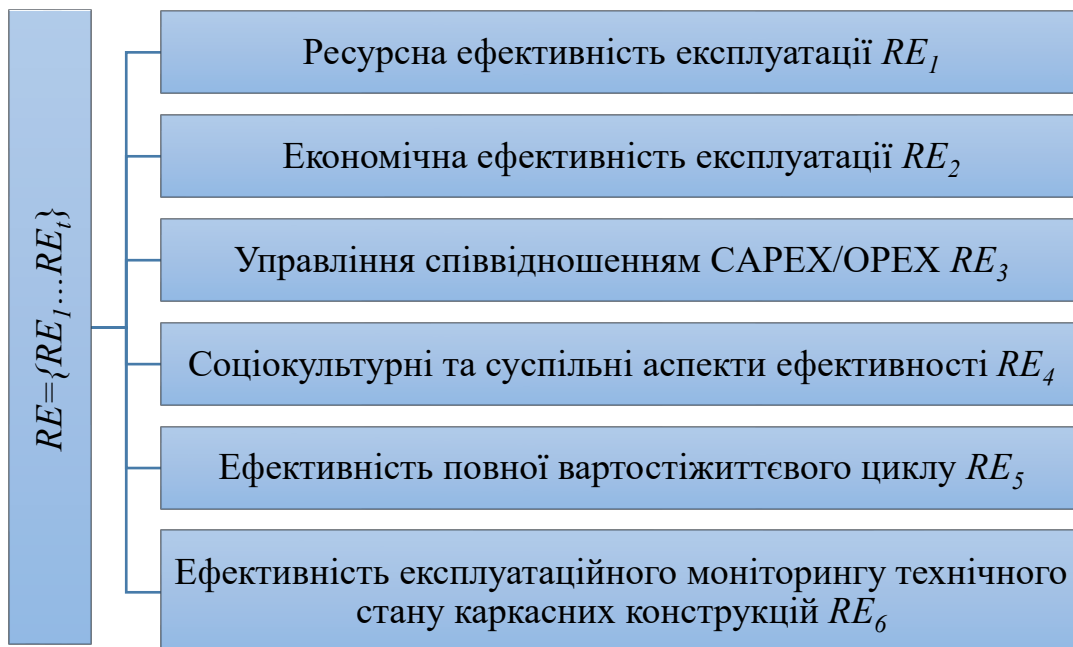


Рис. 2.6. Структурна схема системи критеріїв ефективної експлуатації та життєвого циклу каркасних будівель у процесі реконструкції

Критерії ефективної експлуатації та життєвого циклу RE_s (табл. 2.11) характеризують ефективність експлуатаційного контролю та керування технічним станом каркасних конструкцій після реконструкції, а також економічну, ресурсну, екологічну та соціальну ефективність реконструкції каркасних будівель протягом усього життєвого циклу. Їх застосування дозволяє своєчасно виявляти небезпечні відхилення параметрів напружено-деформованого стану, знижувати експлуатаційні ризики та забезпечувати реалізацію заданого рівня надійності протягом життєвого циклу будівлі [5, 207].

Таблиця 2.11

Критерії ефективної експлуатації RE при реконструкції каркасу будівлі

Позн.	Назва критерію	Показник та од.виміру
RE_1	Ресурсна ефективність експлуатації	Енергоспоживання; експлуатаційні ресурсні витрати; витрати матеріалів при обслуговуванні; інтегральний індекс $\{0...1\}$
RE_2	Економічна ефективність експлуатації	Експлуатаційні витрати (ОРЕХ), грн/рік; витрати на технічне обслуговування і ремонти, грн; коефіцієнт енергоспоживання; інтегральний індекс $\{0...1\}$
RE_3	Управління співвідношенням CAPEX/OPEX	Капітальні витрати (CAPEX), грн; експлуатаційні витрати (ОРЕХ), грн/рік; співвідношення CAPEX/OPEX; розрахунковий термін експлуатації, роки; інтегральний $\{0...1\}$
RE_4	Соціальна та користувацька ефективність	Рівень задоволеності користувачів, %; доступність експлуатації; інтегральний індекс $\{0...1\}$
RE_5	Ефективність повної вартості життєвого циклу	Повна вартість життєвого циклу (LCC), грн; тривалість життєвого циклу, роки; інтегральний індекс $\{0...1\}$
RE_6	Ефективність експлуатаційного моніторингу технічного стану	Таблиця 2.12

Критерій RE_1 відображає рівень ресурсної ефективності реконструкції та раціональності використання енергетичних і матеріальних ресурсів протягом

життєвого циклу будівлі. Оцінювання базується на показниках енергоспоживання, витрат ресурсів під час експлуатації та технічного обслуговування, а також ефективності використання матеріалів [223]. Узагальнення результатів здійснюється через інтегральний індекс, що дозволяє порівнювати альтернативні рішення незалежно від масштабів об'єкта [9, 12, 285].

Критерій RE_2 характеризує економічну ефективність експлуатації реконструйованої будівлі та відображає рівень витрат на обслуговування, ремонт і енергоспоживання. Основними індикаторами є фактичні експлуатаційні витрати та коефіцієнт енергоспоживання. Для інтегральної оцінки застосовується індекс, який відображає відносну ефективність експлуатаційних рішень.

Критерій RE_3 спрямований на оцінювання раціональності інвестиційних та експлуатаційних витрат протягом життєвого циклу будівлі. Він враховує співвідношення капітальних витрат (CAPEX), експлуатаційних витрат (OPEX) та тривалості експлуатації. Індекс дозволяє оцінити доцільність вибору КТР з позицій параметричного підходу та життєвого циклу.

В цьому контексті дуже доцільним став Закон України «Про внесення змін до Закону України «Про будівельні норми» щодо удосконалення нормування у будівництві» [140], у відповідності з яким параметричний метод нормування в будівництві [73] було визначено пріоритетним. Параметричні норми передбачають варіантне проектування, що дозволяє на основі варіабельності дотримання допоміжних нормативних вимог виходити на ефективний варіант проектного рішення, зокрема приймати найприйнятніший термін експлуатації, а не той, що вказаний для відповідної споруди в ДБН [5], та варіювати надійністю каркасу будівлі та її вартістю.

Критерій RE_4 відображає вплив реконструкції на соціальне середовище, користувачів будівлі та місцеву громаду. До індикаторів належать соціокультурна адаптованість, покращення якості середовища та рівень залучення громади.

З огляду на складність кількісної оцінки соціальних і суспільних чинників, у роботі критерії групи RE_4 подано у скороченому та узагальненому вигляді без

детального методичного опису процедур оцінювання, оскільки можуть відрізнятися залежно від функціонального призначення будівлі та умов реконструкції. Такий підхід відповідає практиці багатокритеріального аналізу та дозволяє зберегти універсальність запропонованої системи критеріїв для різних типів об'єктів і умов реконструкції.

Критерій RE_5 характеризує сумарні витрати на всіх стадіях життєвого циклу каркасу будівлі, включаючи проєктування, реконструкцію, експлуатацію та можливе виведення з експлуатації [177]. Оцінювання здійснюється на основі повної вартості життєвого циклу з урахуванням коригувального коефіцієнта ризиків:

$$C_{LCC} = \sum_{i=1}^n C_{capex_i} + k \cdot \sum_{j=1}^m C_{opex_j}, \quad (2.10)$$

де C_{capex} – капітальні витрати; C_{opex} – операційні витрати; k – коригувальний коефіцієнт, що враховує макроекономічні ризики, інфляційні процеси та можливі зміни вартості ресурсів.

Критерії групи RE_6 (табл. 2.12) характеризують ефективність експлуатаційного моніторингу та управління технічним станом каркасних конструкцій у період їх функціонування після реконструкції. Їх застосування забезпечує контроль змін напружено-деформованого стану, своєчасне виявлення дефектів і пошкоджень та зниження експлуатаційних ризиків за рахунок раннього реагування на потенційно небезпечні відхилення [5, 50, 88, 131, 178, 179].

Критерій RE_{61} використовується для оцінки керованого запасу безпеки конструкцій у процесі експлуатації на основі даних моніторингу. Критичні значення визначаються залежно від типу конструкції, очікуваного типу відмови (раптовий / пластичний), та наявності дефектів.

Коефіцієнт варіації RE_{62} оцінює ступінь варіабельності контрольованих параметрів (наприклад, напружень, переміщень) у системі моніторингу. Розраховується як відношення середньоквадратичного відхилення до середнього

значення параметру. Високий рівень варіабельності може свідчити про нестабільність експлуатаційного режиму або недостатню ефективність системи моніторингу.

Таблиця 2.12

Критерії групи RE_6 - Ефективність експлуатаційного моніторингу
технічного стану каркасних конструкцій

Позн.	Назва критерію	Показник та од.виміру
RE_{61}	Керований запас безпеки	Коефіцієнт безпеки, –
RE_{62}	Стабільність експлуатаційних параметрів	Коефіцієнт варіації, V , –
RE_{63}	Надійність системи моніторингу	Час, $MTTF$, год
RE_{64}	Адекватність експлуатаційних навантажень	Навантаження, P_{exp} , P_u , кН

Середній час до відмови RE_{63} (MTTF – Mean Time To Failure) визначає безвідмовність елементів системи моніторингу (датчиків, каналів передачі даних, програмного забезпечення).

Критерій RE_{64} використовується при проведенні контрольних випробувань конструкцій на основі поєднання постійного та пробного навантаження. P_{exp} – навантаження, при якому внутрішні зусилля дорівнюють експлуатаційним. P_u – навантаження, що відповідає граничним розрахунковим значенням. Використовуються для перевірки адекватності реакції системи моніторингу та відповідності фактичних напружень розрахунковим значенням.

Індекси відповідності RE визначаються як нормований зважений показник, що формується на основі сукупності часткових індикаторів та нормованих експертних та статистичних даних, які відображають окремі аспекти реконструкції:

$$RE_t = \sum_{j=1}^m w_{ij} \cdot \hat{r}_{ij}, \hat{r}_{ij} \in [0; 1], \quad (2.11)$$

де $\hat{r}_{ij}$ — нормовані значення часткових індикаторів (рівень задоволеності користувачів, соціокультурна адаптованість, безпека тощо), w_{ij} — вагові коефіцієнти, що визначають відносну значущість індикаторів і приймаються на основі експертної оцінки.

Запропонована система критеріїв RE не включає вичерпний перелік можливих показників, але слугує інструментом порівняльної оцінки ефективності альтернативних КТР у процесі реконструкції каркасних будівель.

Наступним етапом при реконструкції каркасу будівлі є формування критеріїв оптимальних капітальних інвестицій RK_s (табл. 5.5), які використовуються для оцінювання економічної доцільності прийнятих конструктивно-технологічних рішень та їх узгодженості з вимогами експлуатаційної надійності й сталого розвитку [12, 126, 141, 185].

Рівень капітальних вкладень у процесі реконструкції визначається сукупністю технічних, організаційних та територіальних чинників, зокрема технічним станом каркасу, масштабом конструкцій, строками реалізації робіт, типом матеріалів підсилення та умовами розміщення об'єкта.

Система критеріїв RK подана у вигляді укрупненої структурної схеми (рис. 2.7), а їх кількісна інтерпретація наведена в табл. 2.13.

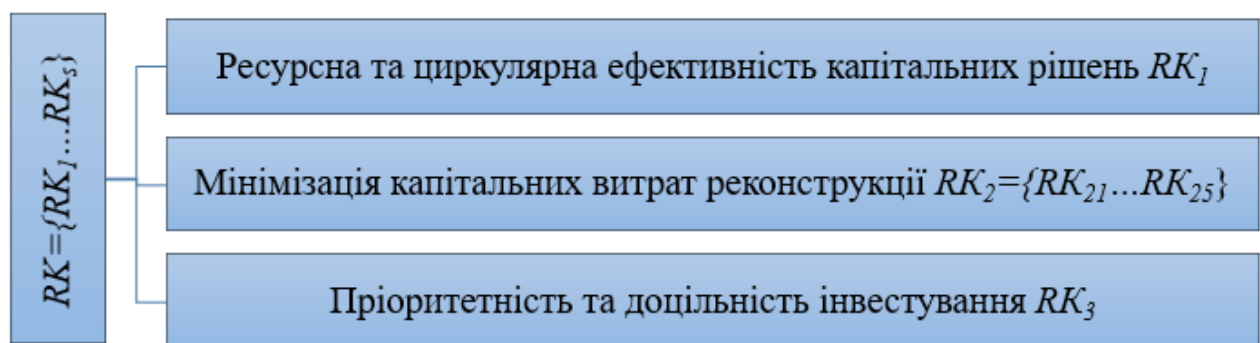


Рис. 2.7. Структурна схема системи критеріїв оптимальних капітальних інвестицій у процесі реконструкції каркасних будівель

Критерій RK_1 характеризує ефективність використання матеріальних та енергетичних ресурсів у складі капітальних інвестицій із урахуванням принципів

циркулярної економіки. Оцінювання здійснюється на основі обсягів споживання первинних матеріалів, частки вторинної сировини, енерговитрат (на виробництво сировини, на виробництво матеріалів, на транспортування, на будівництво та монтаж, на рециклінг та вторинну обробку матеріалів) та пов'язаних екологічних ефектів, зведених до нормованого інтегрального індексу.

Таблиця 2.13

Критерії оптимальних капітальних інвестицій RK при реконструкції
каркасу будівлі

Позн.	Назва критерію	Показник та од.виміру
RK_1	Ресурсна та циркулярна ефективність капітальних рішень	Витрати матеріалів, кг; енергоспоживання, кВт·год; викиди CO ₂ -екв., кг; частка вторинних матеріалів, %; інтегральний індекс {0...1}
RK_2	Мінімізація капітальних витрат реконструкції	Загальні капітальні витрати, грн; структура CAPEX, %; трудомісткість робіт, люд.-год.; інтегральний індекс {0...1}
RK_3	Пріоритетність та доцільність інвестування	Коефіцієнт технічної необхідності; строк реалізації, роки; рівень ризику; інтегральний індекс {0...1}

Критерій RK_2 відображає рівень капітальних витрат на реалізацію конструктивно-технологічних рішень при реконструкції каркасу. До складу показників входять витрати на проєктування, матеріали, будівельно-монтажні роботи, обладнання та інші складові CAPEX. Узагальнена оцінка подається у вигляді інтегрального індексу капітальних витрат.

Критерій RK_3 використовується для визначення пріоритетності реалізації реконструкції з позицій економічної доцільності, технічної необхідності та обмежень за строками і ризиками. Критерій дозволяє ранжувати альтернативні рішення за ступенем обґрунтованості інвестування в умовах обмежених ресурсів [180].

Ефективність технологічного процесу реконструкції каркасів будівель істотно впливає на тривалість виконання робіт, рівень витрат ресурсів, імовірність виникнення технологічних ризиків та ступінь реалізації проєктних і КТР [259, 116]. У зв'язку з цим доцільним є виділення групи критеріїв ефективного технологічного процесу RT_c , які відображають рівень цифровізації, керованості та раціональності ОТР на етапі реконструкції та частково на стадії експлуатації [251].

Система критеріїв ефективного технологічного процесу у процесі реконструкції каркасних будівель представлена у вигляді укрупненої структурної схеми (рис. 2.8), яка відображає логіку та ієрархію показників.

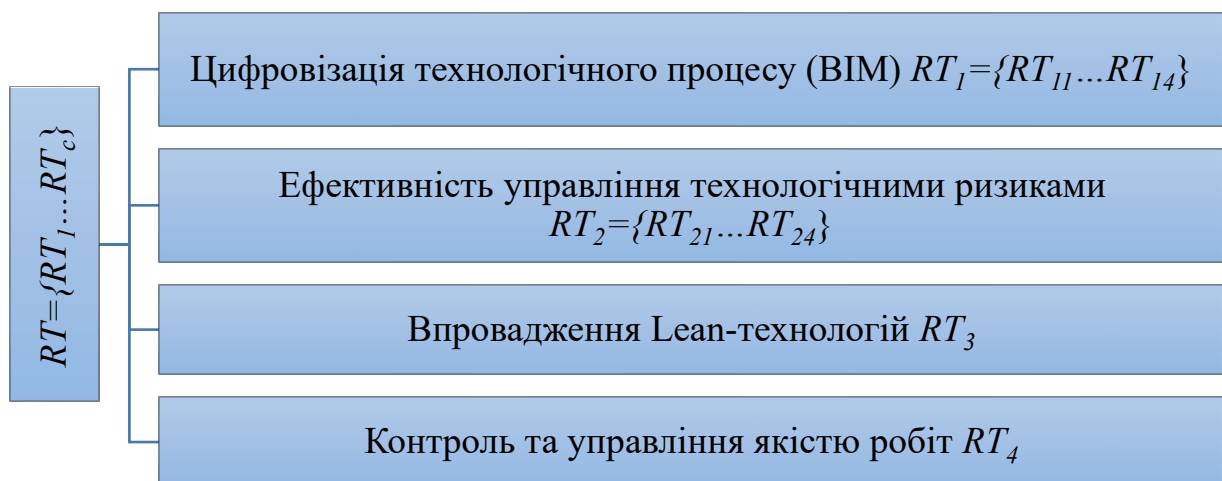


Рис. 2.8. Структурна схема системи критеріїв ефективного технологічного процесу у процесі реконструкції каркасних будівель

Критерії групи RT_1 (табл. 2.14) відображають рівень цифровізації технологічного процесу реконструкції шляхом застосування BIM-технологій на стадіях проєктування, будівництва, експлуатації та реабілітації.

Критерії групи RT_2 (табл. 2.15) характеризують результативність системи управління технологічними ризиками та визначається через показники зменшення частоти виникнення ризикових подій, зниження їх впливу та рівень підготовленості організаційно-технологічних процесів до невизначеностей.

Таблиця 2.14

Критерії групи RT_1 - Цифровізація технологічного процесу (BIM)

Позн.	Назва критерію	Показник та од.виміру
RT_{11}	BIM у проєктуванні	Зменшення колізій і помилок, %; трудомісткість, люд.-год.
RT_{12}	BIM в управлінні будівництвом	Відповідність графіку, %; своєчасність завершення етапів, %; скорочення часу, дні; зниження трудомісткості, люд.-год.;
RT_{13}	BIM в експлуатації	Зменшення витрат, %; підвищення енергоефективності, %
RT_{14}	BIM при утилізації та реабілітації	Частка перероблених матеріалів, %; відновлення вартості, %

Таблиця 2.15

Критерії групи RT_2 - Ефективність управління технологічними ризиками

Позн.	Назва критерію	Показник та од.виміру
RT_{21}	Зменшення частоти ризикових подій	Зменшення кількості ризиків, %
RT_{22}	Зменшення впливу ризиків	Зменшення витрат через ризики, %
RT_{23}	Підготовленість до ризиків	Покриття ризиків управлінськими заходами, %
RT_{24}	Ефективність комунікації	Рівень задоволеності учасників, %

Критерій RT_3 (табл. 2.16) відображає рівень впровадження Lean-технологій, спрямованих на мінімізацію втрат трудових, матеріальних і енергетичних ресурсів та підвищення продуктивності організаційно-технологічних процесів реконструкції

Критерії групи RT_4 (табл. 2.17) характеризують рівень забезпечення якості виконання робіт з підсилення та відновлення каркасних конструкцій у процесі реконструкції. Вони відображають ступінь дотримання проєктних рішень, технологічних регламентів і вимог виробничого контролю, що безпосередньо

впливає на досягнення розрахункової надійності та довговічності підсилених елементів.

Таблиця 2.16

Критерії групи RT_3 - Впровадження Lean-технологій

Позн.	Назва критерію	Показник та од.виміру
RT_3	Впровадження Lean-технологій	Скорочення трудомісткості, люд.-год.; зменшення витрат, грн.; скорочення часу, дні; зменшення ресурсоспоживання; зменшення витрат енергії, Дж., кВт·ч.

Таблиця 2.17

Критерії групи RT_4 - Контроль та управління якістю робіт

Позн.	Назва критерію	Показник та од.виміру
RT_{41}	Виявлення дефектів	Кількість, n , шт. Частка, D_{det} , %
RT_{42}	Усунення дефектів	Кількість, n , шт. Частка, D_{det} , %
RT_{43}	Тривалість контролю	Час, t_{QC} , год
RT_{44}	Вартість контролю	Вартість, C_{QC} , грн
RT_{45}	Частота відмов	Кількість, n_{fail} , шт.
RT_{46}	Вартість виправлень	Вартість, C_{rep} , грн
RT_{47}	Відповідність стандартам	Частка, C_R , %

RT_{41} – Відсоток виявлених дефектів визначає, яка частка можливих дефектів була виявлена під час контролю якості. Він дозволяє оцінити ефективність процесу контролю.

RT_{42} – Кількість виправлених дефектів вказує на те, скільки дефектів було успішно виправлено після виявлення. Це свідчить про ефективність системи виправлення помилок.

RT_{43} – Час, витрачений на контроль якості може допомогти оптимізувати процес та покращити продуктивність.

RT_{44} – Вартість контролю якості важливий показник при плануванні бюджету при реконструкції будівлі.

RT_{45} – Показник відмов визначає кількість випадків, коли роботи були визнані такими, що не відповідають вимогам якості, що може свідчити про ступінь ефективності робіт.

RT_{46} – Вартість виправлень дефектів, виявлених під час контролю якості, може бути корисним для оцінки економічної ефективності процесу.

Наступним етапом є формування критеріїв технологічності конструктивних рішень RC_s [6, 18], які характеризують ступінь адаптованості конструкцій каркасу будівлі до умов виготовлення, транспортування та монтажу в процесі реконструкції. Критерії RC_s відображають можливість реалізації прийнятих конструктивних рішень з мінімальними трудовими, матеріальними та енергетичними витратами за збереження необхідного рівня надійності та відповідності нормативним вимогам [259].

Система критеріїв технологічності конструктивних рішень RC у процесі реконструкції каркасних будівель представлена у вигляді укрупненої структурної схеми (рис. 2.9), яка відображає логіку та ієрархію показників. Подальша деталізація показників здійснюється у таблиці 2.18.

Критерій RC_1 характеризує ступінь уніфікації та стандартизації конструктивних рішень, що визначає можливість серійного виготовлення елементів і зниження трудомісткості монтажу.

Критерій RC_2 відображає відповідність масо-габаритних характеристик конструкцій технічним можливостям транспортування та монтажу в умовах реконструкції.

Критерій RC_3 визначає придатність конструкцій до транспортування без застосування спеціальних логістичних заходів.

Критерій RC_4 характеризує складність і трудомісткість монтажних операцій та рівень механізації робіт.

Критерій RC_5 відображає ефективність використання матеріалів з позицій технологічності виготовлення конструкцій.

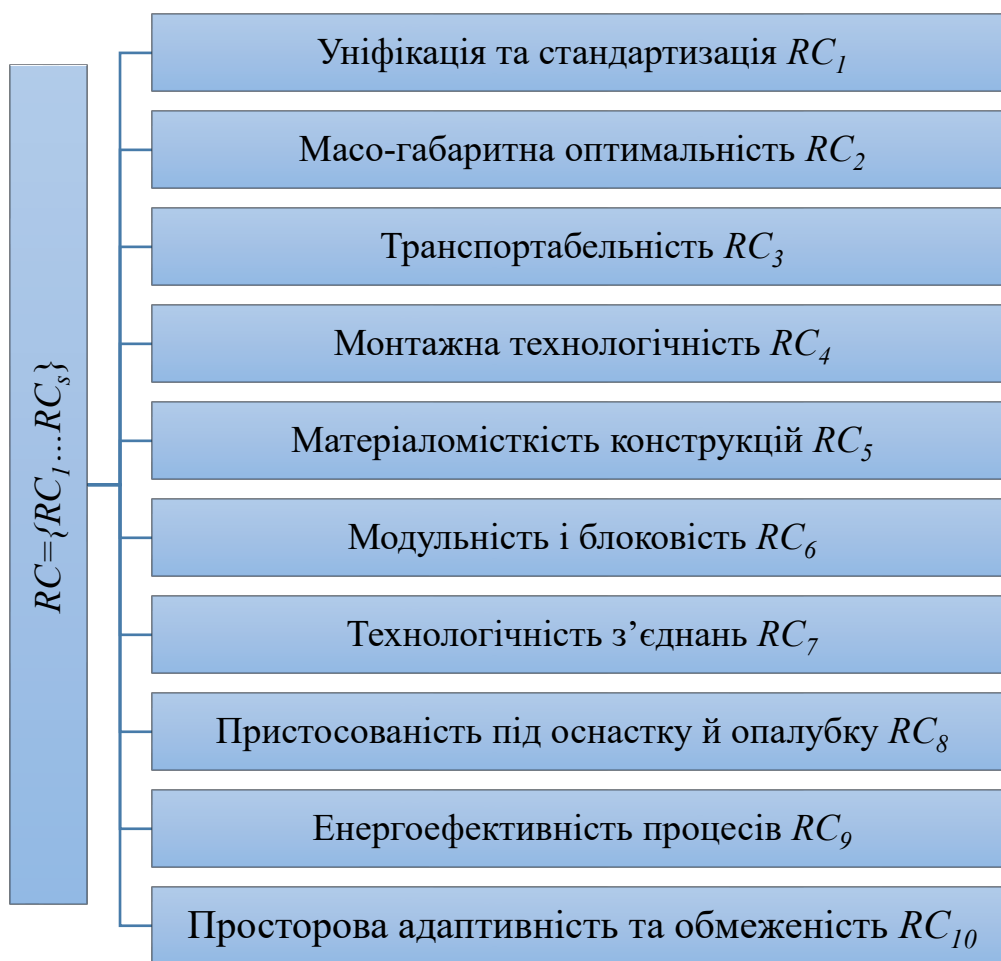


Рис. 2.9. Структурна схема системи критеріїв технологічності конструктивних рішень у процесі реконструкції каркасних будівель

Критерій RC_6 визначає рівень модульності та блоковості конструктивних рішень, що впливає на швидкість і повторюваність монтажу.

Критерій RC_7 характеризує швидкодію та технологічну надійність з'єднань у процесі монтажу.

Критерій RC_8 відображає пристосованість конструкцій до використання типових засобів оснастки та опалубки.

Критерій RC_9 характеризує енергоефективність і ресурсозбереження технологічних процесів транспортування та монтажу конструкцій.

Наступним операційним блоком алгоритму методики дослідження є збір і аналіз інформації по критеріями ефективності та формування відповідної матриці:

$$R = (RK_1 \dots RK_k; RT_1 \dots RT_c; RE_1 \dots RE_t; RC_1 \dots RC_s) \quad (2.12)$$

Таблиця 2.18

Критерії технологічності конструктивних рішень RC при реконструкції каркасу будівлі

Позн.	Назва критерію	Показник та од.виміру
RC_1	Уніфікація та стандартизація	Частка уніфікованих елементів, %; ступінь стандартизації, %; коефіцієнт різнотипності
RC_2	Масо-габаритна оптимальність	Середня маса елемента, т; частка елементів, придатних до монтажу, %
RC_3	Транспортабельність	Частка елементів без спецдозволів, %; відповідність габаритним обмеженням, %
RC_4	Монтажна технологічність	Трудомісткість монтажу, люд.-год/т; Середній час монтажу елемента, год; рівень механізації, %
RC_5	Матеріаломісткість конструкцій	матеріаломісткість, кг/м ² ; коефіцієнт використання матеріалу; частка маловідходних технологій, %
RC_6	Модульність і блоковість	кількість типорозмірів; частка блокових конструкцій, %
RC_7	Технологічність з'єднань	Частка заводської готовності, %; середній час виконання з'єднання, хв; частка болтових/штирових стиків, %
RC_8	Пристосованість під оснастку й опалубку	Частка конструкцій, адаптованих до типових опалубних систем, %; рівень застосування типових засобів оснащення, %;
RC_9	Енергоефективність процесів	Енерговитрати транспортування і монтажу, кВт·год/т; скорочення відходів, %
RC_{10}	Просторова адаптивність та обмеженість	Коефіцієнт просторової гнучкості / обмеженості, $K_s \{0 \dots 1\}$ Площа зон обмеженого доступу, S_o , м ²

2.3.3. Призначення критеріїв сталості реконструкції та відбір чинників, які впливають на їх вибір

Концепція сталого будівництва, вперше запропонована Чарльзом Кібертом у 1994 році [160], передбачає відповідальність будівельної галузі за екологічну стабільність та раціональне використання ресурсів. Сучасна стала реконструкція забезпечує баланс між економічною ефективністю, екологічною відповідальністю, комфортом експлуатації та якістю конструкцій. В Україні принципи раціонального використання природних ресурсів при проектуванні споруд визначені стандартом ДСТУ 9171:2025 «Настанова щодо забезпечення сталого використання природних ресурсів під час проектування споруд» [141]. Таблиця 2.19 узагальнює основні принципи сталого використання ресурсів, які доцільно враховувати при нормуванні технологічних процесів підсилення конструкцій.

Таблиця 2.19

Основні принципи нормування технологічних процесів підсилення конструкцій

Принципи	Значення
Енерго- та водоефективність	Оптимізація енергоспоживання через використання поновлюваних джерел, повторне використання та переробка води.
Управління відходами	Мінімізація утворення відходів і ефективне їх управління під час реконструкції.
Комфорт та функціональність	Оптимізація розташування елементів підсилення для освітлення, вентиляції, термоакустичного комфорту та здорових умов користувачів.
Екологічність матеріалів	Використання нетоксичних, перероблених матеріалів із низьким впливом на довкілля.
Довговічність конструкцій	Використання стійких матеріалів та технологій із можливістю адаптації конструкцій до майбутніх потреб.
Економічна ефективність	Зниження витрат на екологічні рішення без втрати конкурентоспроможності та скорочення ресурсозатрат.

Дотримання основних принципів сталого будівництва забезпечує не лише ефективність технологічних процесів, а й високу якість реконструйованих конструкцій. Це є ключовим фактором у процесі нормування технологій підсилення будівель, оскільки дозволяє поєднувати екологічні стандарти із задоволенням практичних вимог сучасного будівництва.

Європейське агентство з охорони навколишнього середовища (ЕЕА) оцінювало вплив реконструкції будівельних каркасів на сталий розвиток, зокрема з точки зору циркулярної економіки та кліматичних змін [181]. Основними показниками були масове споживання матеріалів та обсяги викидів парникових газів. Аналіз показав, що заходи реконструкції, включно з підсиленням каркасів, значно знижують екологічний вплив будівельного сектору через економію ресурсів і скорочення відходів.

Особливу увагу приділено металевим каркасам, які є екологічно ефективними завдяки багаторазовій переробці та мінімізації будівельних відходів. Це підкреслює переваги використання сталі для реконструкції і сприяє циркулярності матеріальних потоків.

Для оцінки впливу реконструкції застосовуються принципи циркулярності, структуровані за схемою R-драбини (Refuse, Reuse, Reduce, Recycle, Rethink) [181] (табл. 2.20). Пріоритет надається скороченню використання матеріалів, повторному використанню виробів, переробці матеріалів та розробці довготривалих рішень. Особливу роль відіграє «дизайн для демонтажу» (DfD), що забезпечує легку розбірність конструкцій і знижує потребу у первинних матеріалах.

Переваги сталого підсилення конструкцій можна згрупувати за напрямками:

- Екологічні: скорочення викидів забруднюючих речовин, раціональне управління водними ресурсами, мінімізація відходів, збереження природних ресурсів.
- Економічні: зниження витрат на енергію та воду, оптимізація витрат протягом життєвого циклу, підвищення ринкової вартості об'єкта.

- Соціальні: покращення якості повітря, створення комфортних умов для проживання і роботи, підтримка здорового способу життя.

Таблиця 2.20

Огляд порядку реноваційних дій для моделювання загального впливу



У сучасних дослідженнях з реконструкції будівельних конструкцій критерії сталості розглядаються переважно в загальному контексті енергоефективності, зменшення утворення відходів та екологічного впливу. Хоча у сучасних нормативних документах, зокрема у ДСТУ 9171:2025, запропоновано кількісні показники оцінювання сталості, такі як приєднана енергія та приєднаний вуглець, що характеризують вплив будівельної продукції на довкілля протягом життєвого циклу, аналіз наукових публікацій і оглядових досліджень [109, 117, 119, 126, 144, 183, 184] свідчить, що існуючі інженерні методики вибору технологій підсилення конструкцій, як правило, не включають ці показники у вигляді самостійного критеріального блоку. У більшості відомих підходів вони розглядаються як додаткові або рекомендаційні параметри [146, 130, 185], а не як визначальні фактори, що безпосередньо впливають на вибір технологічного процесу.

Основні принципи нормування технологічних процесів підсилення конструкцій є фундаментальними критеріями для оцінювання їхньої якості.

Ці принципи забезпечують комплексний підхід до якісного сталого будівництва, спрямований на оптимізацію енергоспоживання, ефективне використання ресурсів, зменшення впливу на навколишнє середовище та підвищення довговічності конструкцій [130, 136]. Вони також враховують економічну ефективність рішень та комфорт користувачів. Таблиця 2.8 надає детальний опис цих принципів та їх значення.

Науковою новизною дослідження є включення критеріїв сталості A_m як повноправного елемента системи прийняття рішень при виборі моделей КТР і ОТР. Такий підхід дозволяє перевести критерії сталості з рівня загальних рекомендацій у кількісно оцінюваний фактор, що впливає на параметри технологічного процесу реконструкції, зокрема на його тривалість, ресурсомісткість та матеріальні потоки, технічну довговічність конструкцій, вартість життєвого циклу об'єкта, екологічний слід реконструкції та обсяг логістичних втрат і відходів [141].

Впровадження сталого підсилення конструкцій базується на кількох ключових передумовах:

1. Інноваційні технології – використання сучасних сталих методів і матеріалів для підсилення конструкцій.
2. Планування та управління – ефективні системи постановки цілей, моніторингу та контролю на всіх етапах будівельного процесу.
3. Процеси реконструкції – впровадження методик, що поєднують екологічні, економічні та соціальні аспекти для забезпечення довговічності та безпеки конструкцій.

Серед об'єктивних обмежень сталого підсилення можна виділити високі початкові витрати на впровадження екологічних рішень та обмежену доступність екологічно чистих матеріалів, що підвищує їхню вартість та ускладнює логістику у віддалених регіонах.

Для формалізації критеріїв сталості A_m та оцінювання їх впливу на якість технологічного процесу реконструкції (вартість, тривалість, ефективність, надійність і безпеку) використовується система показників, що відображає

економічні, екологічні, соціальні та конструктивно-технологічні аспекти реконструкції каркасу будівлі відповідно до стандартів ISO [70, 130].

На основі аналізу сучасних наукових підходів до оцінювання сталості будівельних систем автором запропоновано систему критеріїв сталості, яка враховує економічні, екологічні, соціальні, конструктивно-технологічні та організаційні аспекти прийняття конструктивно-технологічних рішень. Її структуру подано у вигляді схеми (рис. 2.10), а кількісну та якісну інтерпретацію показників наведено в табл. 2.21 [285].

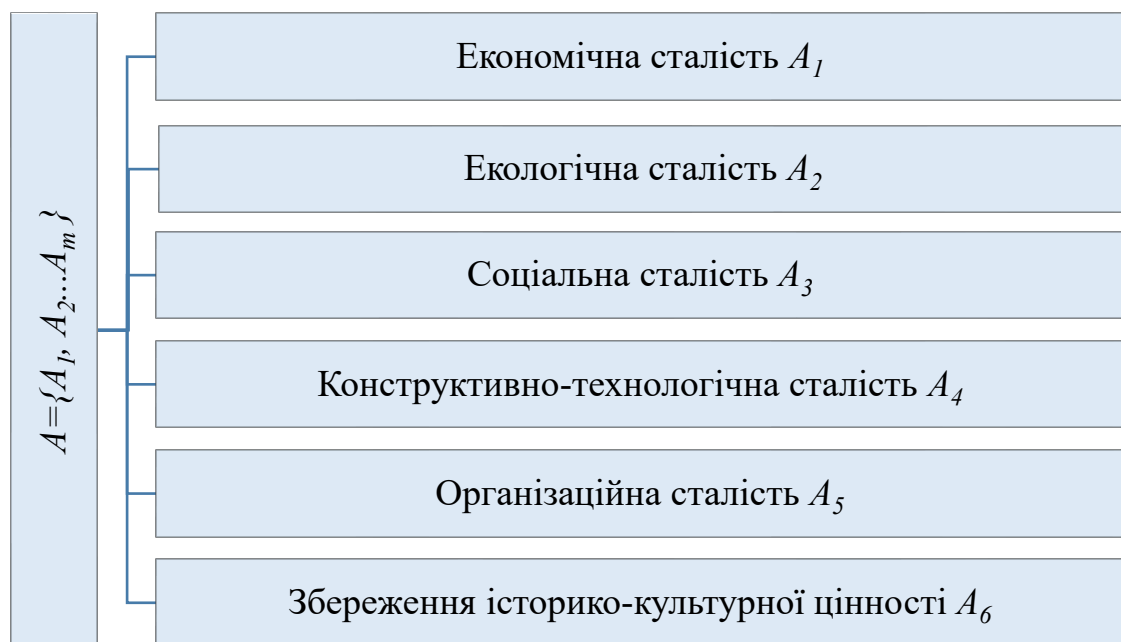


Рис. 2.10. Критерії сталості при реконструкції каркасу будівлі

На відміну від критеріїв економічної ефективності та технологічності, критерії сталості A_m характеризують довгострокові наслідки реалізації КТР протягом життєвого циклу об'єкта [126, 137]. Вони враховують специфіку виконання робіт у межах існуючих, як правило, експлуатованих будівель, з обмеженнями щодо простору, безперервності функціонування та умов безпеки.

Рівень сталості КТР визначається шляхом інтеграції економічних, конструктивних, технологічних та організаційних показників. Для узагальненої оцінки застосовано критерії A_1 – A_5 , які агрегують відповідні первинні показники груп надійності N та ефективності R .

Критерії сталості A_m та показники при реконструкції каркасу будівлі

Позн.	Назва критерію	Показник та од.виміру
A_1	Економічна сталість	Відносна зміна експлуатаційних витрат, %; порівняльна вартість реконструкції / новобудови; інтегральний індекс $\{0...1\}$
A_2	Екологічна сталість	Викиди CO ₂ -екв. (приєднаний вуглець), кг/м ² ; частка екологічних матеріалів, %; екологічно обумовлені витрати, грн; обсяг утворення будівельних відходів, кг/м ² ; енергоємність процесів підсилення, кВт·год/м ² ; інтегральний екологічний індекс $\{0...1\}$.
A_3	Соціальна сталість	Рівень безпеки робіт; індекс соціальної прийнятності; безперервність функціонування об'єкта, %; індекс впливу на користувачів $\{0...1\}$
A_4	Конструктивно-технологічна сталість	Збереження несучої здатності, %; чутливість до деградаційних факторів; сумісність матеріалів; інтегральний індекс $\{0...1\}$
A_5	Організаційна сталість	Тривалість реконструкції, дні; рівень порушення експлуатації об'єкта; інтегральний індекс $\{0...1\}$
A_6	Збереження історико-культурної цінності	Індекс цінності

A_1 – економічна сталість характеризує здатність реконструктивних рішень забезпечувати довгострокову економічну доцільність експлуатації будівлі [126]. Вона відображає зміну експлуатаційних витрат порівняно з вихідним станом, співвідношення вартості реконструкції та нового будівництва, а також узагальнюється інтегральним індексом, який дозволяє порівнювати альтернативні варіанти реконструкції з урахуванням життєвого циклу об'єкта.

A_2 – екологічна сталість відображає рівень екологічного впливу, пов'язаного з реалізацією КТР під час реконструкції каркасних будівель. До цього критерію віднесено показники викидів парникових газів у CO₂-еквіваленті, енергоємності процесів підсилення, частки екологічно безпечних матеріалів і ступеня

зменшення утворення будівельних відходів [223]. Для оцінювання використовується показник глобального потенціалу потепління (GWP), відповідно до якого викид 1 кг N_2O еквівалентний 298 кг CO_2 -екв., 1 кг CH_4 — 25 кг CO_2 -екв., а 1 кг SF_6 — близько 22,8 тис. кг CO_2 -екв. [189, 223].

A_3 — соціальна сталість відображає вплив процесу реконструкції на користувачів будівлі та персонал, задіяний у виконанні робіт. Вона включає рівень безпеки будівельно-монтажних робіт, можливість безперервного функціонування об'єкта під час реконструкції, а також узагальнений індекс впливу на користувачів, який враховує обмеження доступу, шумові та інші фактори дискомфорту відповідно до сучасних підходів до оцінювання соціальної складової сталості будівель [70, 130, 136, 238, 239]. Соціальні критерії є похідними від КТР та ОТР та мають особливе значення для будівель, що експлуатуються.

A_4 — конструктивно-технологічна сталість характеризує здатність прийнятих рішень зберігати необхідний рівень надійності, несучої здатності та технологічної сумісності протягом тривалого періоду експлуатації. До цього критерію віднесено показники збереження несучої здатності, чутливості конструкцій до деградаційних факторів (корозія, втома, повзучість), а також сумісності матеріалів існуючих і підсилювальних елементів [5, 207]. Узагальнення показників здійснюється за допомогою інтегрального індексу.

A_5 — організаційна сталість відображає ефективність організації процесу реконструкції з точки зору тривалості виконання робіт і впливу на експлуатацію об'єкта. Вона характеризується загальною тривалістю реконструкції, рівнем порушення нормального функціонування будівлі та інтегральним індексом, що дозволяє порівнювати альтернативні ОТР [116, 256, 259].

A_6 — збереження історико-культурної спадщини характеризує ступінь збереження архітектурної, історичної та культурної цінності об'єкта. Враховує необхідність збереження автентичних елементів і просторово-планувальних рішень.

Критерії сталості A_m виконують інтегруючу функцію в системі оцінювання реконструкції каркасних будівель, поєднуючи результати оцінювання

економічних, технологічних і конструктивних рішень та забезпечуючи узгодженість моделі з принципами сталого розвитку і життєво-циклового підходу. Наступним операційним блоком алгоритму методики дослідження є збір і аналіз інформації по показникам сталості та формування відповідної матриці:

$$A = (A_1, A_2 \dots A_m) \quad (2.13)$$

На рис. 2.11 подано узагальнену модель структури оцінювання якості підсилення каркасних конструкцій із головною функцією оцінювання якості (ФОЯ), яка інтегрує критерії надійності, ефективності та сталості в єдину систему підтримки прийняття рішень у процесі реконструкції [285]. Запропонована модель базується на системному та життєво-цикловому підходах і враховує взаємозв'язок економічних, екологічних, соціальних, технічних і організаційних аспектів реконструкції каркасних будівель.



Рис. 2.11. Ієрархічна структура функції оцінювання якості (QAF) підсилення каркасних конструкцій, що інтегрує критерії надійності (N), ефективності (R) та сталості (A)

Відповідно, узагальнена ФОЯ підсилення каркасних конструкцій визначається як інтегрована сукупність критеріїв:

$$QAF = f(N_i, R_i, A_i) \quad (2.14)$$

де N — множина критеріїв надійності, R — множина критеріїв ефективності, A — множина критеріїв сталості.

Виходом функції оцінки якості є набір показників якості:

$$QAF \rightarrow \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}, \quad (2.15)$$

які характеризують загальний рівень якості прийнятого конструктивно-технологічного рішення.

Окремі критерії в межах запропонованої моделі можуть одночасно належати до різних функціональних груп і виконувати різні ролі: слугувати стратегічними орієнтирами сталого розвитку, характеризувати рівень надійності КТР, а також виступати кількісно вимірюваними показниками ефективності. Такий міжгруповий перетин не є дублюванням, а відображає багатовимірний характер оцінювання та складність вибору оптимальних конструктивно-технологічних рішень у процесі реконструкції каркасних будівель.

Система критеріїв побудована за ієрархічним принципом і передбачає поетапне використання окремих груп показників залежно від стадії прийняття рішення та типу КТР. Узагальнені критерії інтегрують сукупність підпоказників, які застосовуються вибірково (рекомендовано не більше 7–9 критеріїв одночасно), що дає змогу зберегти інформативність моделі без надмірного ускладнення процедури оцінювання.

2.4. Етапи дослідження та очікувані результати

Методика дослідження (рис. 2.12–2.18) реалізується як послідовна семиетапна система, що забезпечує перехід від аналізу передумов до формування та апробації конструктивно-технологічної системи (КТС) підвищення якості підсилення каркасних будівель.

Перший етап (рис. 2.12) передбачає аналіз сучасного стану проблеми, об'ємно-планувальних і геометричних параметрів існуючих будівель, досвіду

застосування матеріалів і технологій підсилення та формування цілей і завдань дослідження. Результатом є визначення наукових передумов і обґрунтування необхідності системного підходу до забезпечення якості.

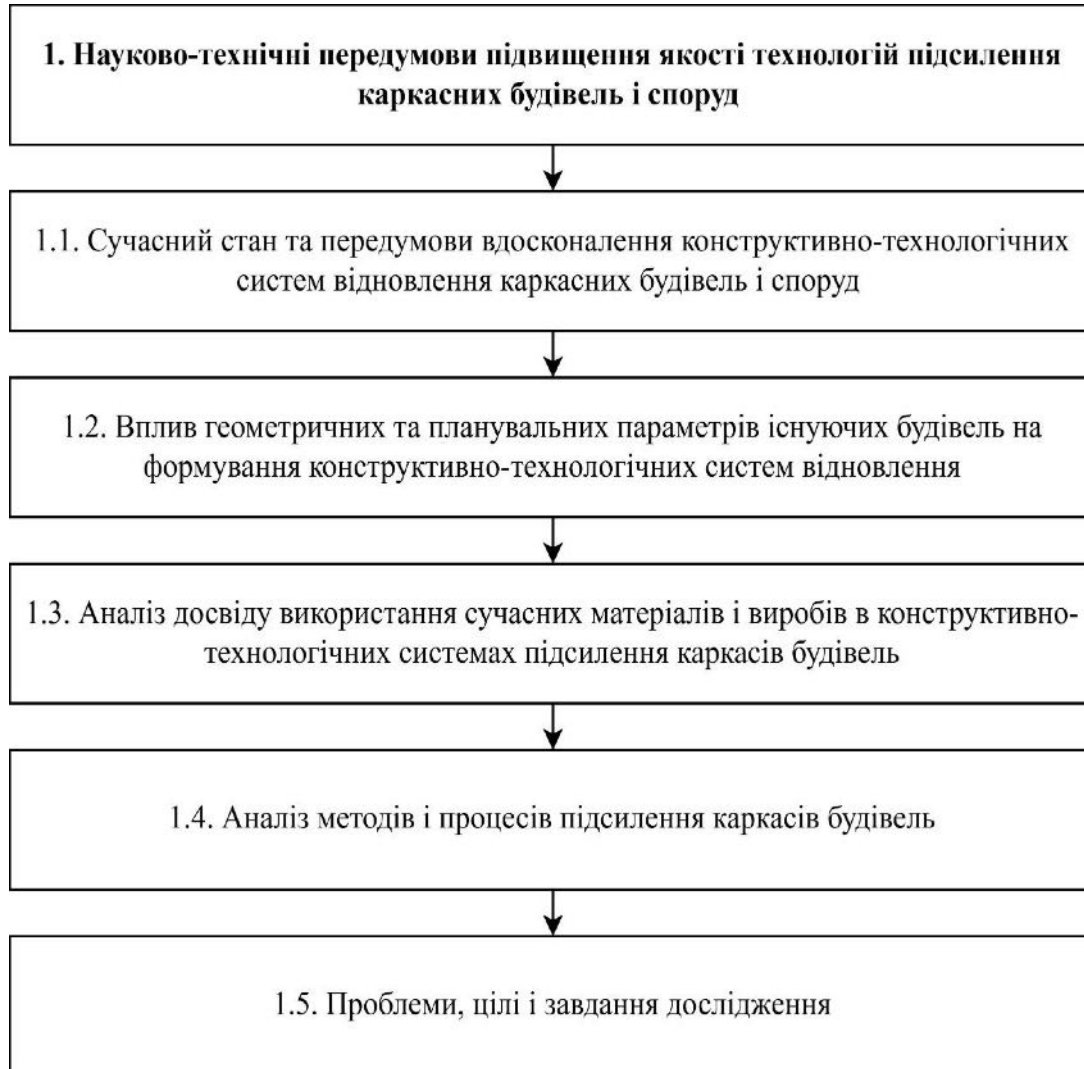


Рис.2.12. Блок-схема першого етапу методики досліджень

Другий етап (рис. 2.13) спрямований на розроблення методології забезпечення якості підсилення: формування принципів побудови КТС, інтеграцію технічних, економічних та екологічних аспектів і відбір системи критеріїв оцінки (R_i – ефективність, N_i – надійність, A_i – сталість). Результатом є багатокритеріальна модель оцінювання КТР.

Третій етап (рис. 2.14) включає дослідження та нормування процесів підсилення: аналіз методів обстеження, розроблення багатофакторної системи

норм часу та витрат праці, декомпозицію операцій і створення нормативної бази. Результатом є формалізована модель нормування трудомісткості процесів.

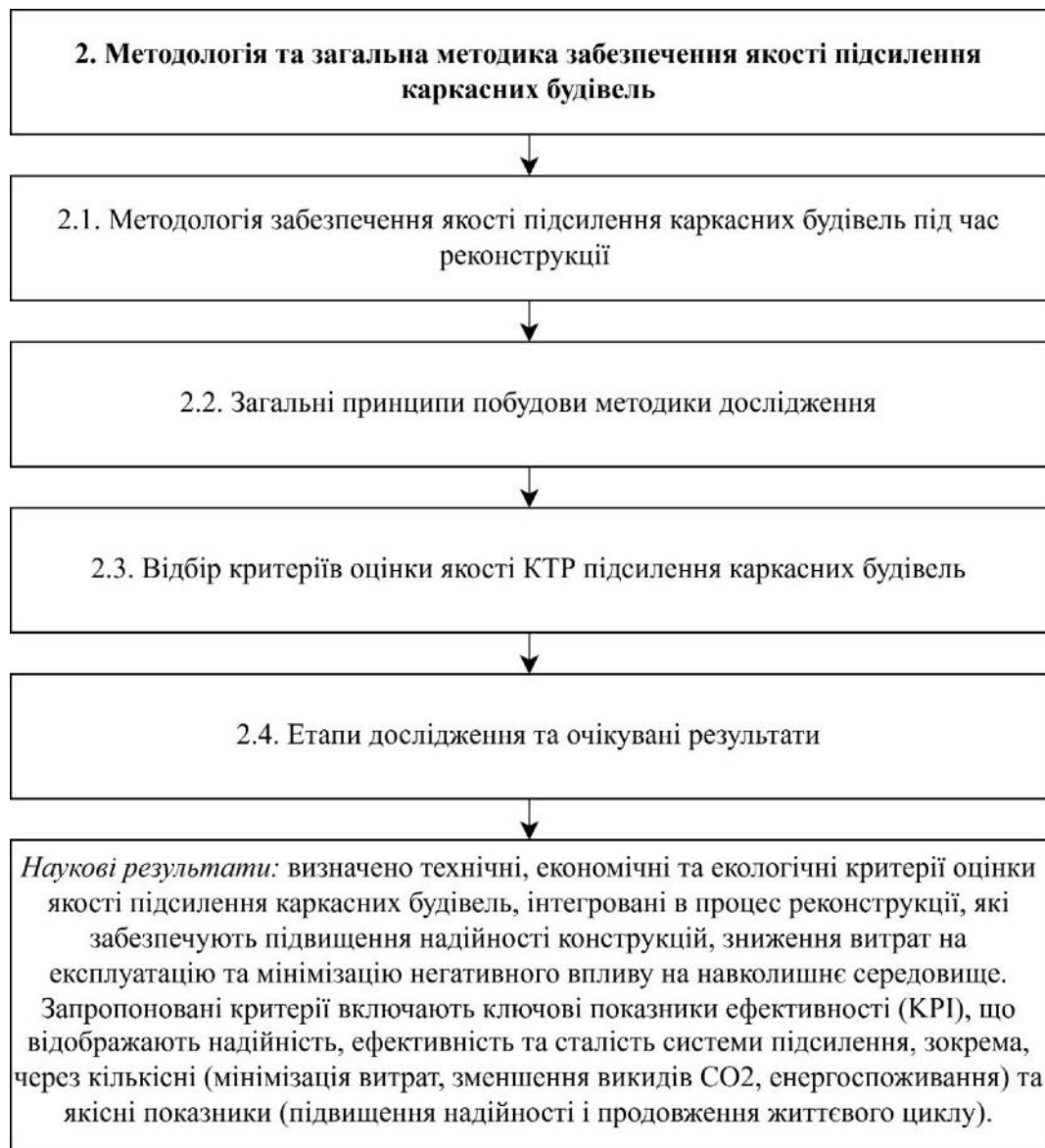


Рис.2.13. Блок-схема другого етапу методики досліджень

Четвертий етап (рис. 2.15) передбачає виявлення, класифікацію та систематизацію дефектів і пошкоджень, формалізацію ризиків та факторів впливу, дослідження ефективності сучасних матеріалів (зокрема FRP-систем) і відбір ключових чинників формування КТС. Результатом є структурована модель факторів якості та ризиків підсилення.

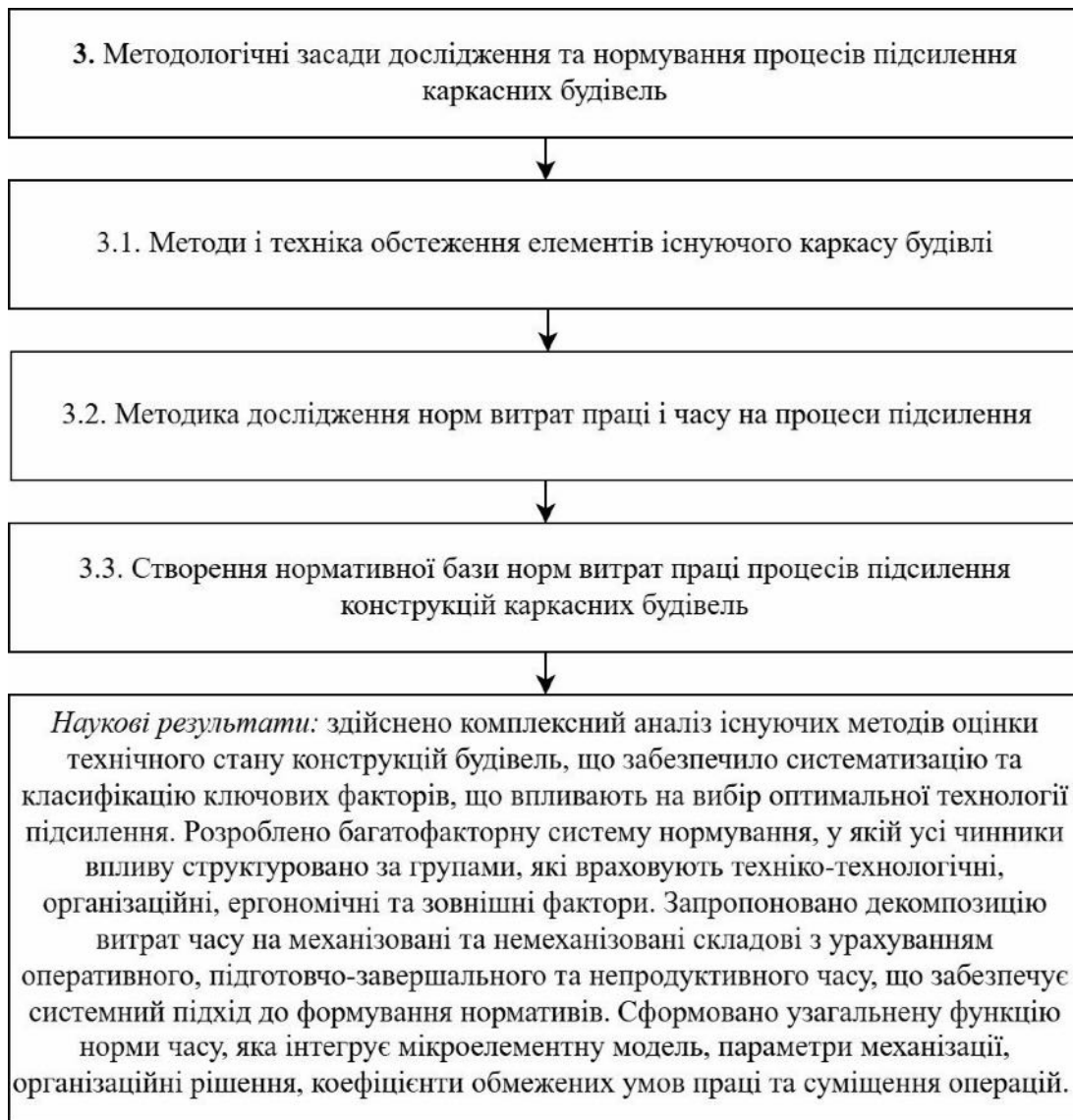


Рис.2.14. Блок-схема третього етапу методики досліджень

П'ятий етап (рис. 2.16) спрямований на дослідження організаційно-технологічного середовища реконструкції: аналіз просторово-планувальних параметрів, умов виконання робіт, параметрів робочих місць і засобів механізації, формування та систематизацію моделей КТР. Результатом є формалізована модель формування ОТР і КТР як основи подальшої оптимізації.

Шостий етап (рис. 2.17) включає моделювання технологічних схем організації та механізації процесів підсилення, дослідження трудомісткості, тривалості й собівартості робіт, багатокритеріальне ранжування альтернатив та інтеграцію BIM–Lean підходу. Результатом є алгоритмізований ланцюг вибору MKT_i – MOT_i та кількісне підтвердження ефективності запропонованих рішень.

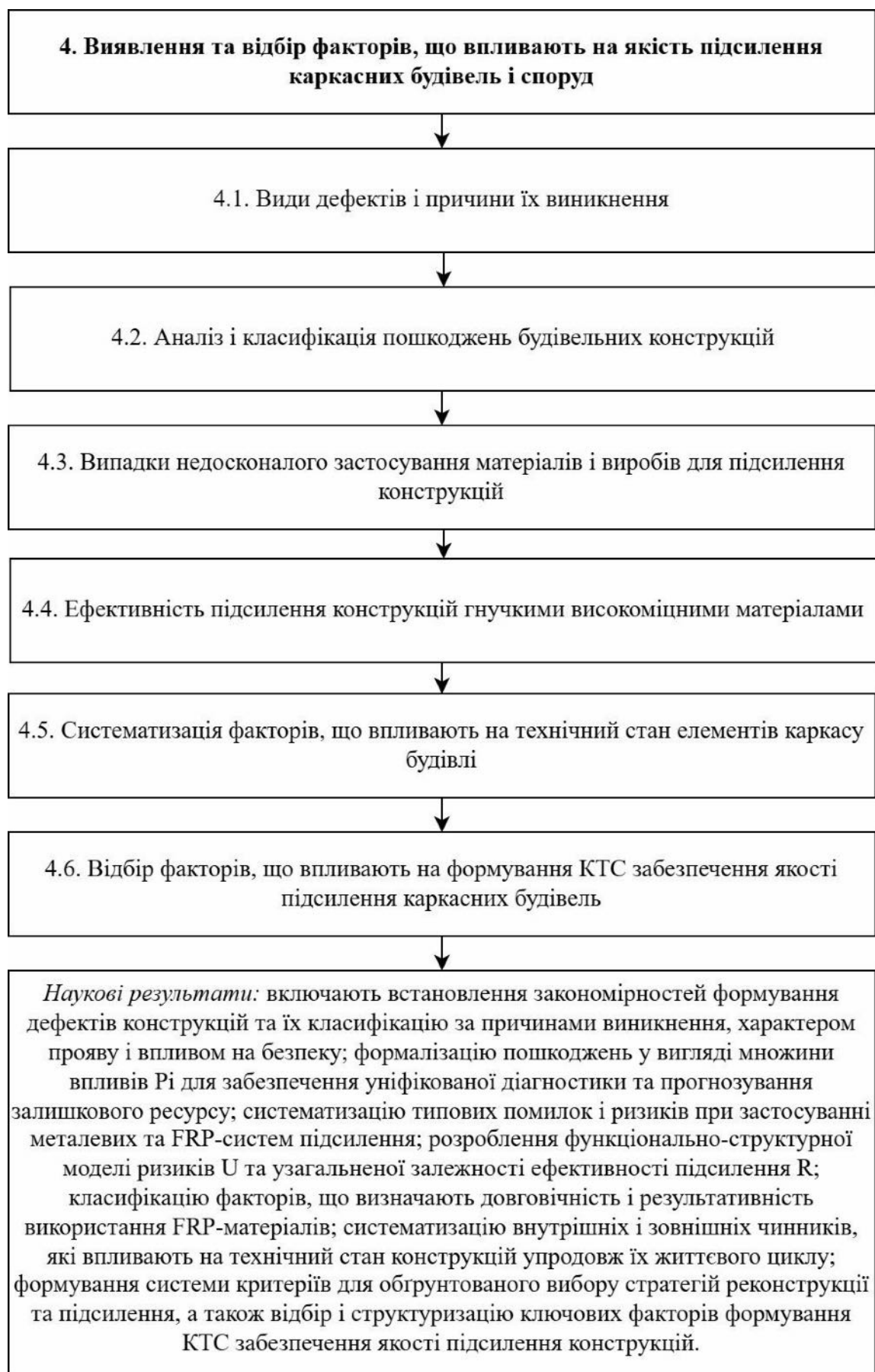


Рис.2.15. Блок-схема четвертого етапу методики досліджень

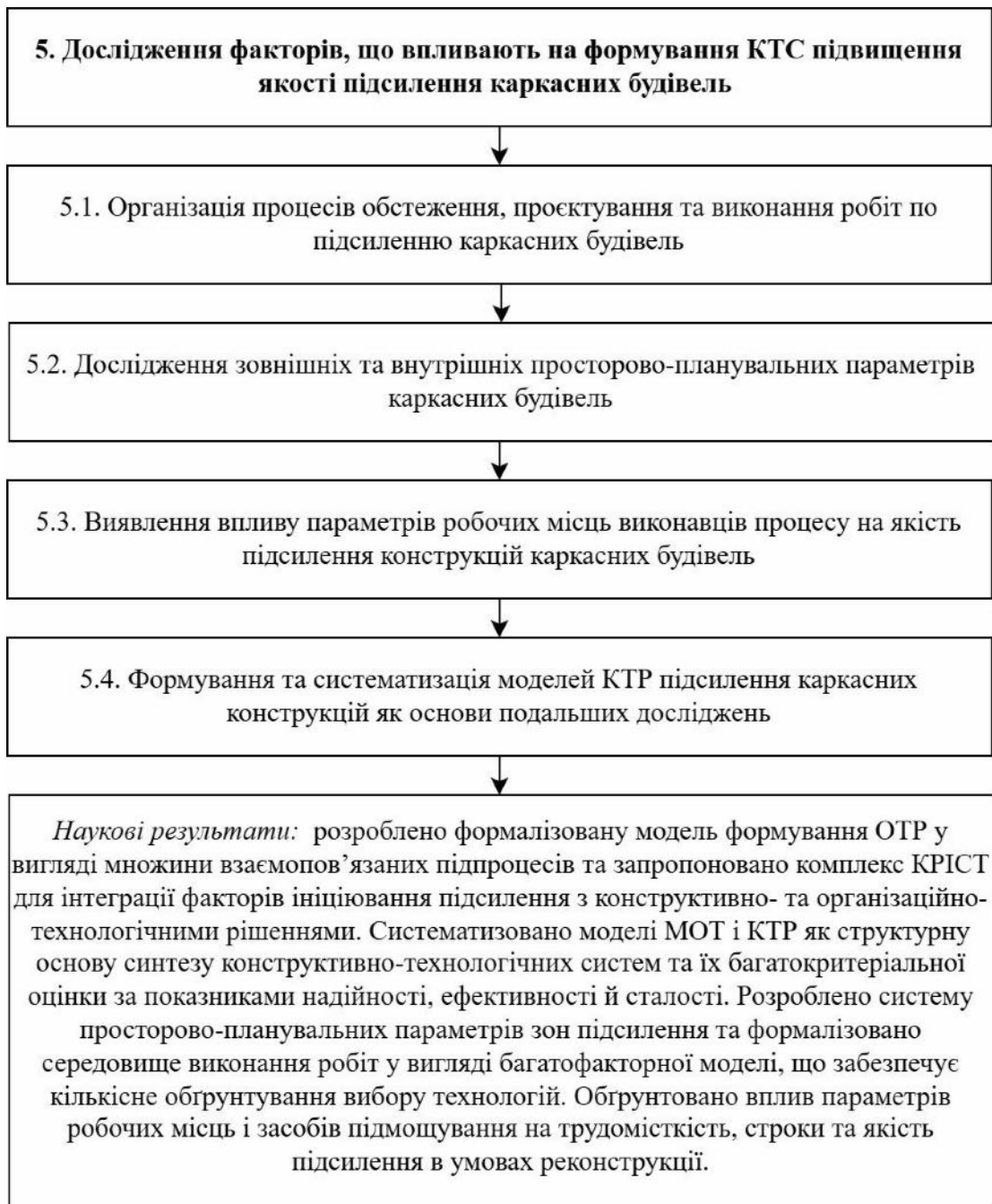


Рис.2.16. Блок-схема п'ятого етапу методики досліджень

Сьомий етап (рис. 2.18) передбачає узагальнення результатів попередніх досліджень, формування завершеної конструктивно-технологічної системи (КТС) підвищення якості підсилення каркасних будівель, її модифікацію з інтеграцією BIM- та Lean-технологій, оптимізацію КТР за принципами сталого розвитку та розроблення практичних рекомендацій щодо впровадження системи. На цьому етапі здійснюється апробація КТС у реальних умовах реконструкції та оцінювання ефективності за критеріями R_i – N_i – A_i .

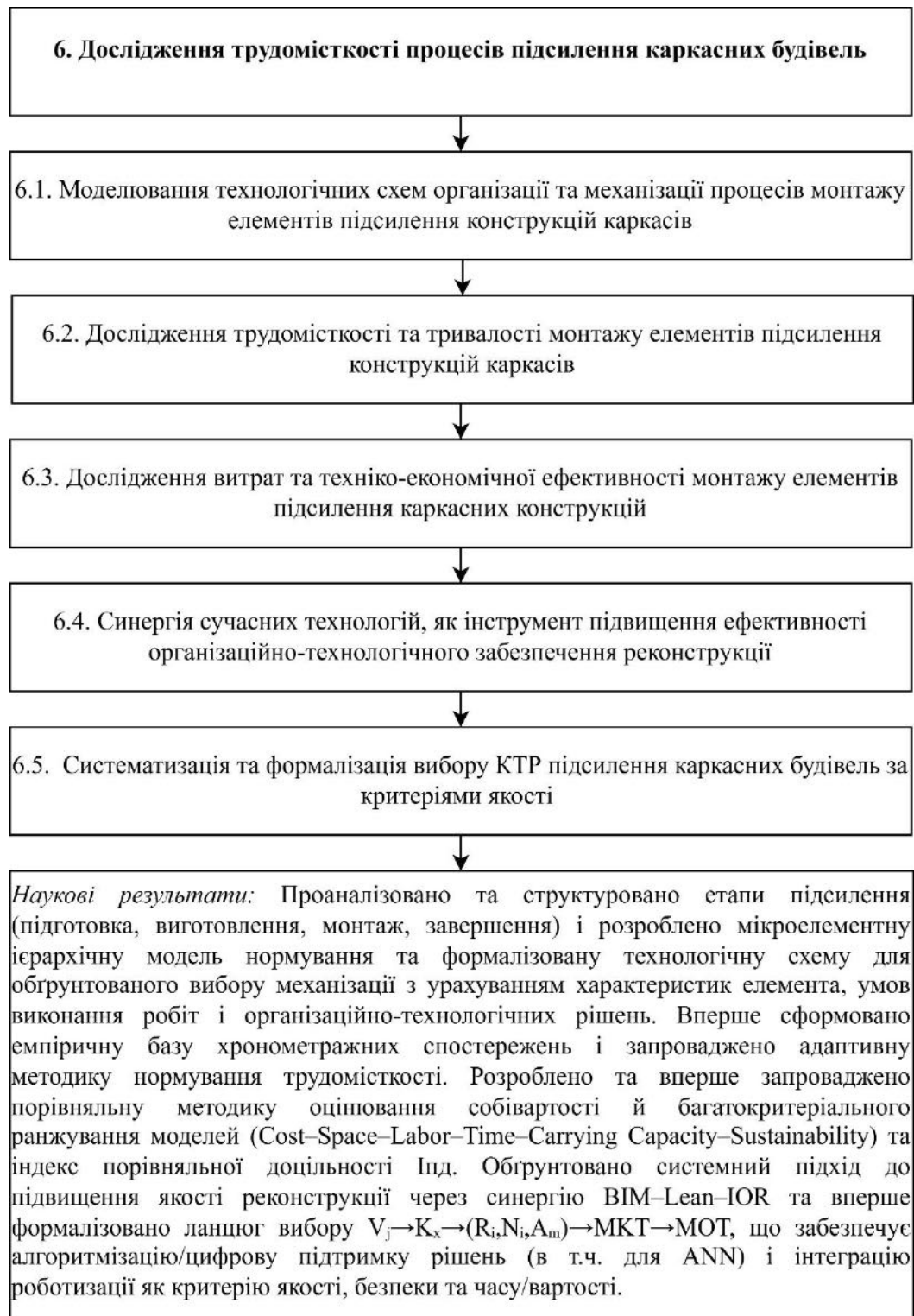


Рис.2.17. Блок-схема шостого етапу методики досліджень

Очікуваними результатами реалізації методики є формування цілісної конструктивно-технологічної системи забезпечення якості підсилення, розроблення алгоритмізованого механізму вибору КТР за багатокритеріальною моделлю, встановлення залежностей між факторами впливу та показниками

ефективності, а також експериментальне підтвердження скорочення трудомісткості, тривалості та витрат при одночасному підвищенні надійності й екологічної сталості реконструкції.

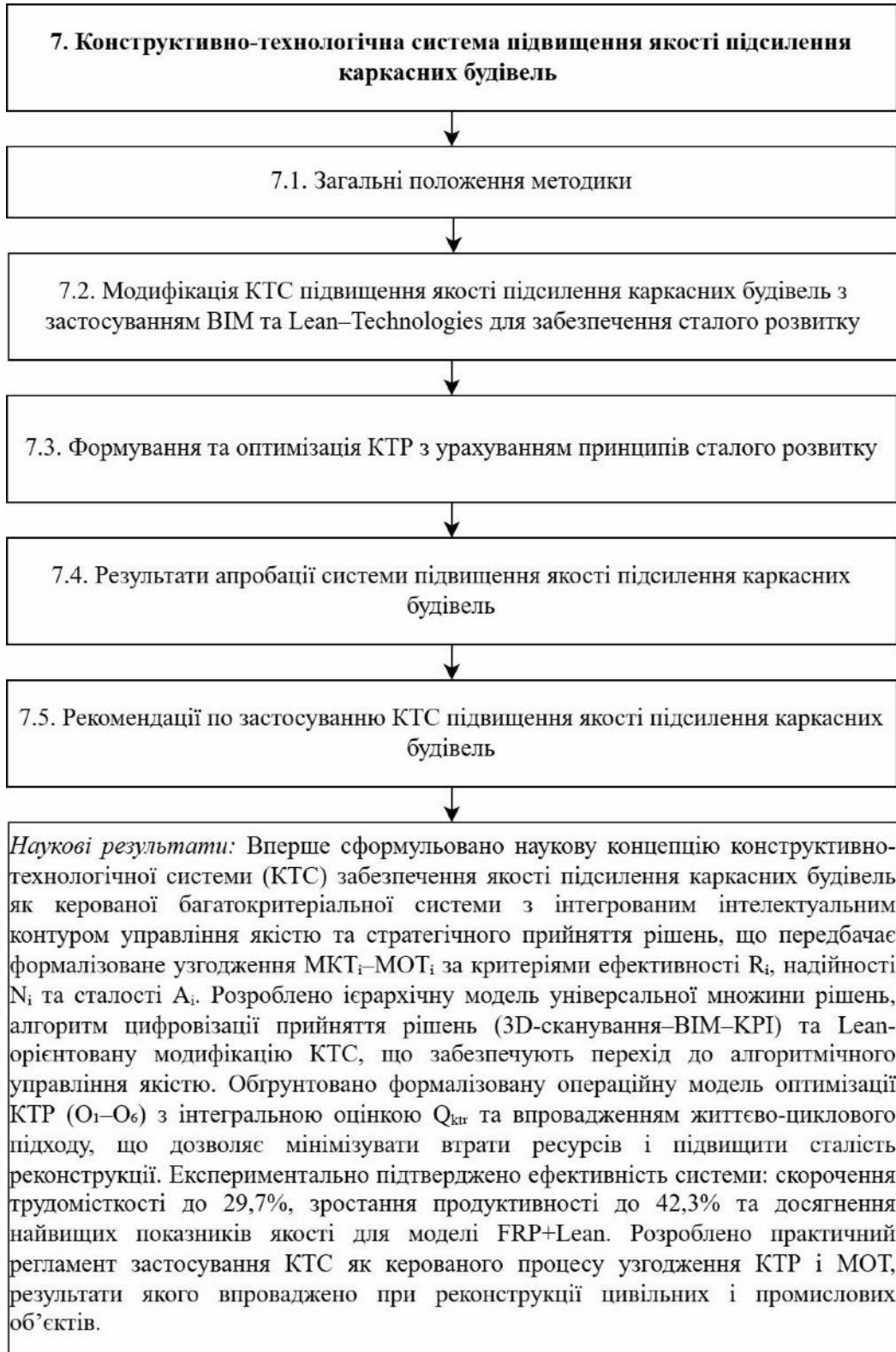


Рис.2.18. Блок-схема сьомого етапу методики досліджень

Висновки по другому розділу

1. Визначено наукове трактування якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції як інтегральної характеристики конструктивно-технологічних рішень, що поєднує конструктивні, технологічні та експлуатаційні аспекти протягом життєвого циклу об'єкта. Систематизовано та класифіковано основні принципи забезпечення якості конструктивно-технологічної системи підсилення каркасу будівлі, що створює методологічну основу для обґрунтованого вибору рішень в умовах наявних дефектів, обмеженого ресурсу та підвищених ризиків. Обґрунтовано доцільність життєво-циклового підходу та розроблено модель інвестиційно-будівельного проєкту реконструкції, яка забезпечує комплексне управління якістю підсилення на етапах планування, проєктування, виконання робіт та подальшої експлуатації. Запропоновано застосування багатокритеріального підходу з використанням системи ключових показників якості, що охоплюють показники надійності, довговічності, технологічності та економічної доцільності. Визначено послідовність дій щодо оцінювання пріоритетів і ризиків у процесі підсилення, що створює передумови для прийняття оптимальних конструктивно-технологічних рішень. Отримані результати формують основу для подальшого розвитку системи критеріїв оцінювання якості КТР підсилення каркасних будівель та можуть бути використані для удосконалення методів контролю якості й нормативно-методичних підходів у практиці реконструкції.

2. У підрозділі обґрунтовано необхідність формування системної методики дослідження якості підсилення каркасних будівель, що враховує складність процесів реконструкції, багатофакторний характер впливів та обмеження реальних умов виконання робіт. Встановлено, що існуючі науково-методичні підходи мають фрагментарний характер, орієнтовані на окремі стадії життєвого циклу або ізольовані аспекти (конструктивні, енергетичні, економічні) та не забезпечують комплексного управління якістю підсилення. На основі аналізу вітчизняних і зарубіжних досліджень сформульовано загальні принципи побудови методики, які базуються на системному, життєво-цикловому та

багатокритеріальному підходах і передбачають інтеграцію технічних, технологічних, організаційних, економічних, екологічних і соціальних чинників. Обґрунтовано доцільність використання конструктивно-технологічної системи як базової моделі для формування та оцінювання рішень з підсилення каркасних конструкцій. Запропоновано поетапну структуру методики дослідження з використанням багатокритеріальної оцінки, аналізу ризиків, цифрових інструментів (BIM, LCA), а також принципів Lean-організації процесів, що створює методологічне підґрунтя для обґрунтованого вибору та оптимізації КТР у процесі реконструкції.

3. У результаті проведеного дослідження обґрунтовано та систематизовано критерії оцінювання якості конструктивно-технологічних рішень підсилення каркасних будівель у процесі реконструкції. Встановлено, що якість підсилення доцільно оцінювати на основі інтеграції критеріїв надійності, ефективності та сталості, які відображають експлуатаційні, технологічні, економічні та екологічні наслідки прийнятих рішень упродовж життєвого циклу об'єкта. Відібрано та структуровано систему ключових показників якості, що включає як кількісні показники (трудомісткість, витрати, енергоспоживання, викиди CO₂), так і якісні характеристики (експлуатаційна надійність, довговічність, адаптивність і сталість конструкцій). Показано, що врахування лише окремих економічних або конструктивних показників є недостатнім для обґрунтованого вибору КТР у складних умовах реконструкції. Запропоновано ієрархічну модель критеріїв, яка дозволяє узгодити різноманітні показники та забезпечити системний підхід до порівняльної оцінки альтернативних рішень з урахуванням технологічних, організаційних, соціальних та екологічних обмежень. Систематизація критеріїв створює методичну основу для подальшої формалізації процесу оцінювання якості підсилення та підтримки прийняття рішень у межах конструктивно-технологічної системи реконструкції каркасних будівель.

4. У результаті проведених досліджень сформовано методичну основу дослідження процесів підсилення каркасних будівель у системі реконструкції, яка реалізується у вигляді послідовної семиетапної методики. Запропонований

підхід забезпечує системний перехід від аналізу сучасного стану проблеми, формування методологічних принципів і критеріїв оцінювання до моделювання організаційно-технологічних процесів, нормування трудомісткості, ідентифікації факторів ризику та формування конструктивно-технологічних рішень. Методика інтегрує технічні, організаційно-технологічні, економічні та екологічні аспекти реконструкції та базується на багатокритеріальній системі оцінювання ефективності, надійності та сталості рішень ($R_i-N_i-A_i$). Послідовна реалізація етапів дослідження дозволяє формалізувати фактори впливу на якість підсилення, обґрунтувати структуру конструктивно-технологічних рішень та створити передумови для їх оптимізації з урахуванням параметрів організаційно-технологічного середовища реконструкції. Важливим результатом є формування науково обґрунтованої моделі вибору та оцінювання конструктивно-технологічних рішень, що забезпечує можливість кількісного порівняння альтернатив та обґрунтування раціональних технологічних схем підсилення. Запропонована методика створює науково-методичну основу для подальшого формування конструктивно-технологічної системи підвищення якості підсилення каркасних будівель, інтегрованої з сучасними підходами BIM-моделювання та принципами Lean-організації будівельного виробництва. Її практична реалізація спрямована на підвищення ефективності реконструкції, зниження трудомісткості та тривалості робіт, підвищення надійності конструкцій і забезпечення екологічної сталості будівельного середовища.

5. Основні результати розділу викладені у роботах [23, 55, 75, 177, 201, 216, 285].

РОЗДІЛ 3

МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА НОРМУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПІДСИЛЕННЯ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ

3.1. Методи і техніка обстеження елементів існуючого каркасу будівлі

У процесі реконструкції будівель технічне обстеження конструкцій є обов'язковим етапом, а його результати оформлюються у вигляді технічного звіту, що використовується як вихідна інформація для проєктування [247, 178]. Метою обстеження є отримання достовірних даних про геометричні параметри, міцність і технічний стан елементів, необхідних для розроблення рішень щодо підсилення та відновлення несучих конструкцій [56, 64, 96, 178].

Під час реконструкції каркасних будівель особливу увагу приділяють стану несучих елементів каркасної системи. Залежно від завдань і ступеня деталізації розрізняють три основні типи обстеження каркасних елементів: попереднє, основне (технічне) та додаткове, що ілюструється на рис. 3.1 [56].

Попереднє обстеження проводиться на передінвестиційній стадії або під час ухвалення рішення щодо доцільності подальших робіт і має на меті формування загального уявлення про технічний стан елементів каркасу та умов експлуатації об'єкта. На цьому етапі виконують візуальний огляд конструкцій, збір вихідних даних про будівлю, оцінку умов експлуатації та виявлення основних ознак дефектності [35, 56]. За результатами попереднього огляду конструкції відносять до відповідних категорій технічного стану [178].

Основне (технічне) обстеження є більш глибоким і спрямоване на отримання точних даних про технічний стан конструкцій, геометричні характеристики, дефекти, деформації та властивості матеріалів. Додаткове обстеження виконують у разі потреби уточнення даних основного етапу або за наявності суперечливих результатів. Воно може включати моніторинг деформацій у часі, уточнення навантажень та окремі спеціальні дослідження.

	Попереднє (рекогносцирувальне) обстеження	Основне (технічне) обстеження	Додаткове обстеження
Залізобетон	Візуальний огляд (тріщини, корозія арматури, руйнування бетону), простукування молотком, вимірювання ширини тріщин (щупи, мікроскоп з лінійкою)	Нівелювання, ультразвуковий метод, ударно-імпульсний метод, метод відриву зі скалюванням, магнітометричний контроль товщини захисного шару, визначення глибини тріщин (ультразвук, підсікання), визначення міцності бетону (пластична деформація, стискання),	Моніторинг деформацій (нівелювання, GNSS, тахеометрія, лазерне сканування, фотограмметрія), контроль прогинів та переміщень (рідинний метод, прогиномири, відеомоніторинг, цифрові датчики), пробні навантаження конструкцій, вимірювання вологості (нейтронний метод, електричний імпеданс), визначення щільності матеріалів (радіометрія, вимірювання маси/об'єму)
Метал	Візуальний огляд (корозія, деформації, стан зварних, болтових, заклепувальних з'єднань), вимірювання деформацій та прогинів (щупи, мікроскоп з лінійкою)	Вимірювання деформацій та прогинів (нівелювання, тахеометрія), ультразвуковий контроль швів (ультразвукові дефектоскопи), магнітопорошковий контроль тріщин, визначення марки сталі (рентгенофлуоресцентний або іскровий метод), контроль прихованих дефектів (ультразвуковий, радіометричний, електромагнітний методи)	Моніторинг деформацій (нівелювання, GNSS, тахеометрія, лазерне сканування, фотограмметрія), моніторинг вібрацій (візуальний, механічний, електрооптичний методи), спектральний аналіз коливань, контроль прогинів та переміщень (прогиномири, відеомоніторинг, цифрові датчики), пробні навантаження ферм і балок, контроль екологічності (вимірювання радіаційного фону)

Рис. 3.1. Типи обстеження елементів каркасів будівель з відповідними методами в залежності від матеріалу

Під час обстеження також аналізують технічну документацію, зокрема проєктні матеріали, результати попередніх обстежень і відомості про виконані ремонти чи підсилення. Результатом комплексного технічного обстеження є аналітичний звіт із висновком про фактичний стан конструкцій, оцінкою їх несучої здатності та рекомендаціями щодо відновлення, підсилення або заміни елементів [56].

Обстеження каркасних конструкцій включає комплекс робіт, що мають уніфіковану методику виконання та застосовуються практично до всіх типів конструкцій. До основних видів належать [35]:

а) Обмірні роботи. Обсяг і зміст обмірних робіт визначаються на стадії попереднього обстеження залежно від поставлених завдань, наявності проєктної документації, історії реконструкцій будівлі та окремих її елементів. Під час обмірювання встановлюють конфігурацію, розміри, положення конструкцій у плані та по висоті. Особливу увагу приділяють перевірці ключових геометричних параметрів: довжини прольотів, висоти колон, перетинів елементів, вузлів опирання балок тощо — адже саме від них залежить напружено-деформований стан конструкцій.

Положення базових ліній, кутів і відміток, від яких ведуться вимірювання, визначають за допомогою геодезичної зйомки з використанням теодолітів, нівелірів та інших точних вимірювальних приладів відповідно до ДБН В.1.3-2:2010 [246].

б) Вимірювання прогинів і деформацій. Для оцінки просторової стабільності конструкцій здійснюють вимірювання переміщень, прогинів, деформацій (нахилів, зсувів, випинань). Залежно від характеру вимірювання використовують такі засоби [35]:

- Для лінійних вимірювань — сталеві та дерев'яні лінійки, складні метри, рулетки (5, 10, 20 м і більше), цифрові лазерні далекоміри (наприклад, DLE 50 Professional).

- Для кутових вимірювань — звичайні та високоточні теодоліти з 20–40-кратним збільшенням (ТБ-1, ТТ-5, ОТШ, ТОМ, ВІД-02), кутоміри, бусолі.

- Для визначення вертикальних переміщень — оптичні нівеліри з 20–30-кратним збільшенням (НЗ, НІ 1, НТ, НА-1), теодоліти з рівнем на трубі (ТТ-4, ТОМ, ОТШ), гідростатичні нівеліри на базі принципу сполучених посудин (типу НШТ).

- Для перевірки вертикальності — виски (дротові, нитяні), оптичні прилади вертикального візування (зеніт-прилади, надир-прилади: ОЦП, ПОВП), лазерні прилади (ПІВ-1, ЛЗЦ-1, ЛТ-75).

Вимірювання геометричних параметрів конструкцій (довжина, ширина, висота) виконують із застосуванням стрічок, рулеток, лінійок, косинців,

штангенциркулів, висків тощо. Допустима точність: для бетонних і кам'яних конструкцій — до 1 см; для сталевих елементів і арматури — до 1 мм. Геометричні характеристики конструкцій у плані та по висоті мають відповідати загальним розмірам будівлі та результатам геодезичної зйомки. Рекомендується фіксувати результати обмірів у вигляді наростаючого підсумку для подальшого аналізу та порівняння.

Відхилення від вертикалі та випучування високих стін, колон і споруд (зокрема труб і веж) у важкодоступних місцях визначають за допомогою теодолітів методом перенесення вертикальної осі на міліметрову лінійку (рис. 3.2). Нахили, опуклості, співвісність колон у межах одного поверху, а також відхилення від вертикалі, фіксують за допомогою виска та міліметрової лінійки (рис. 3.3).

Зсув у плані та горизонтальні вигини колон визначають шляхом вимірювання їхнього положення відносно натягнутої горизонтальної нитки (дроту), закріпленої між опорними точками або осями будівлі (рис. 3.4).

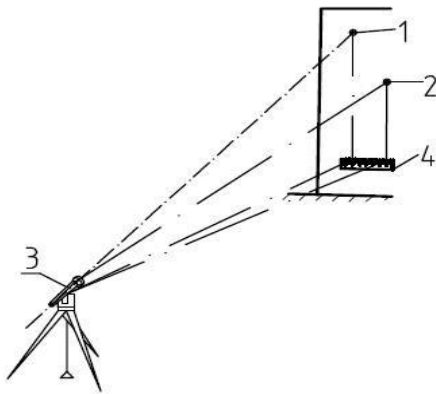


Рис. 3.2. Вимірювання горизонтального зміщення двох точок (1 і 2) елементу каркасу будівлі методом знесення за вертикаллю за допомогою теодоліта: 1, 2 – точки; 3 – теодоліт; 4 – переносна лінійка

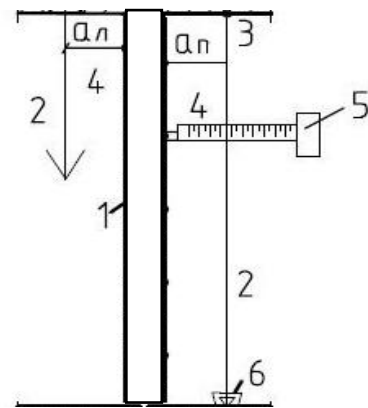


Рис. 3.3. Визначення співвісності і відхилень колони від вертикалі за допомогою вертикального виска: 1 – колона; 3 – висок; 3 – точки підвішування виска; 4 – точки вимірювання; 5 – лінійка; 6 – посудина з водою

Величину прогину (вигину) конструкцій у точці L (f_i) визначають за формулою:

$$f_i = h_i - h_0 - (h_n - h_0) l_i/l, \quad (3.1)$$

де h_0 , h_n – відстань (ордината) від нитки до початкової (0) і кінцевої (n) точок; h_i , l_i – ордината й відстань від початку координат (0) до розглядуваної точки; l – довжина конструкції.

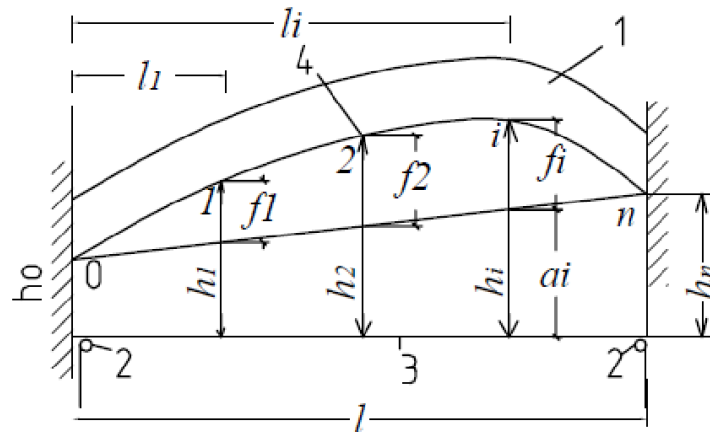


Рис. 3.4. Визначення прогинів горизонтальних та вигинів вертикальних елементів за допомогою горизонтальної нитки: 1 – перекриття (стіна); 2 – точка закріплення нитки; 3 – горизонтальна нитка; 4 – точка вимірювання



Рис. 3.5. Визначення прогину з використанням сталевोї нитки, яку натягують уздовж нижнього поясу обстежуваної конструкції. ПАТ «ДОНБАСЕНЕРГО»

Найпростішим способом визначення прогину конструкцій є натяг сталевोї нитки вздовж нижнього поясу елемента, що обстежується (рис. 3.5).

Деформації швів і стиків (розкриття, зсуви) у динаміці вимірюють за допомогою переносних індикаторів (месур) із точністю до 0,01 мм або штангенциркулів, між штирями з центрувальним обладнанням, закріпленими по обидва боки шва (стику). У важкодоступних або небезпечних для безпосереднього обстеження місцях застосовують дистанційне обладнання, яке дозволяє фіксувати деформації за допомогою теодолітів або зорових труб без фізичного контакту з конструкцією. Всі вимірювання виконуються спеціалізованими організаціями відповідно до ДСТУ Б В.2.1-30:2014 і рекомендацій «Посібника зі спостережень за деформаціями будинків і споруд» [68, 245].

Уточнення навантажень і впливів здійснюється таким чином:

- Постійні навантаження від власної ваги конструкцій визначають за робочими кресленнями або результатами обмірних робіт.
- Навантаження від стаціонарного обладнання та агрегатів — за паспортними даними або кресленнями з урахуванням схеми їх розміщення та точок опори.
- Вага покриттів (перекриттів) встановлюється шляхом локального розкриття покрівлі чи підлоги, з подальшим визначенням товщини й щільності кожного шару. Якщо шари не вдається відокремити, проводять розкриття ділянки площею 0,25 або 0,5 м² і зважують вміст. Для однієї черги будівництва площею до 3000 м² передбачено мінімум три зони розкриття.

Для моніторингу стану каркасів будівель під час експлуатації та реконструкції застосовують також технології лазерного сканування, які забезпечують отримання просторових даних у вигляді хмари точок і створення точної 3D-моделі об'єкта (Рис. 3.6) [253]. Це дозволяє фіксувати геометричні параметри, виявляти деформації та використовувати результати обстеження для подальшого цифрового опрацювання.

Лазерне сканування доцільне переважно для великих та інфраструктурних об'єктів, а також історичних будівель, оскільки дозволяє точно фіксувати стан

конструкцій та виявляти потенційні проблеми. Технологія знижує кількість невизначеностей у проєкті завдяки точному аналізу елементів конструкцій.

Існують три типи сканерів: імпульсні (визначають відстань за часом проходження променя), фазові (за зсувом фаз) і триангуляційні (використовують геометрію променя та приймача).

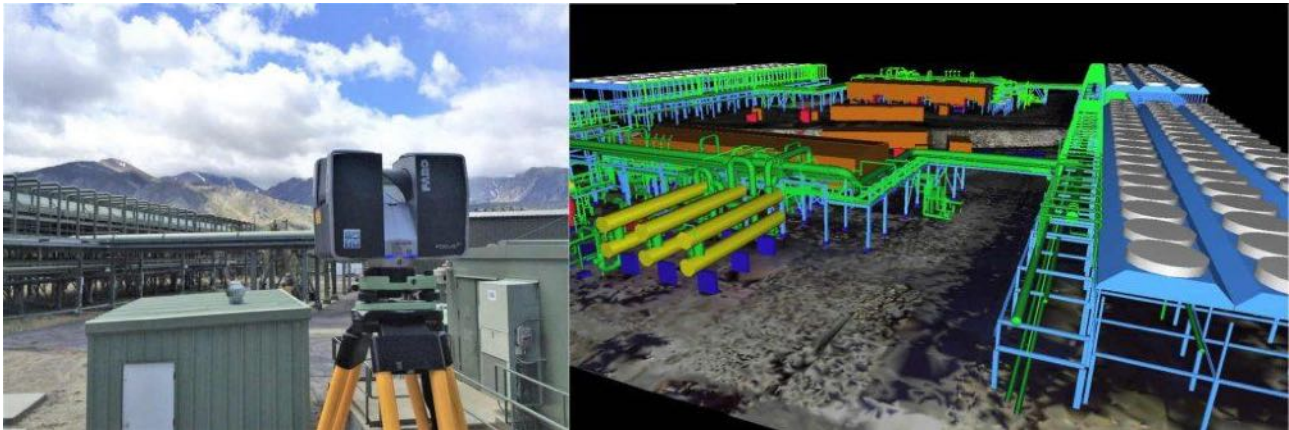


Рис. 3.6. Результат 3D-лазерного сканування каркасу промислової будівлі [253]

в) методи й засоби спостережень за тріщинами.

Під час обстеження будівельних конструкцій важливим етапом є вивчення тріщин та визначення причин їх виникнення і розвитку. Тріщини поділяються на три групи за ступенем небезпеки: безпечні, небезпечні та проміжні [56].

За наявності тріщин на несучих конструкціях будинків і споруд потрібно організувати систематичне спостереження за їхнім станом і можливим розвитком, для того щоб з'ясувати характер деформацій конструкцій і ступінь їх небезпеки для подальшої експлуатації.

Спостереження за розвитком тріщин проводять за спеціальним графіком, який складають індивідуально для кожного об'єкта залежно від умов експлуатації. Тріщини виявляють шляхом огляду поверхонь конструкцій і, за потреби, шляхом вибіркового зняття захисних або оздоблювальних покриттів. Визначають положення, форму, напрямок, довжину, ширину розкриття, глибину тріщин, а також фіксують, чи триває їхній розвиток.

У місцях найбільшого розвитку тріщин встановлюють маяки, які розриваються або зміщуються при подальшому розширенні тріщини (див. рис. 3.7). Крім того, кінці тріщин під час кожного огляду позначають поперечними штрихами, нанесеними фарбою або гострим інструментом, із зазначенням дати спостереження.

Схематичне розташування тріщин наносять на креслення розгортки стін будівлі із зазначенням номерів і дат установки маяків. На кожен тріщину складають окремий графік розвитку і розкриття.

Огляди тріщин і маяків проводять періодично згідно з графіком спостережень. За результатами складають акт, у якому вказують дату огляду, креслення розташування тріщин і маяків, стан тріщин, наявність або відсутність нових дефектів та інформацію про встановлення нових маяків.

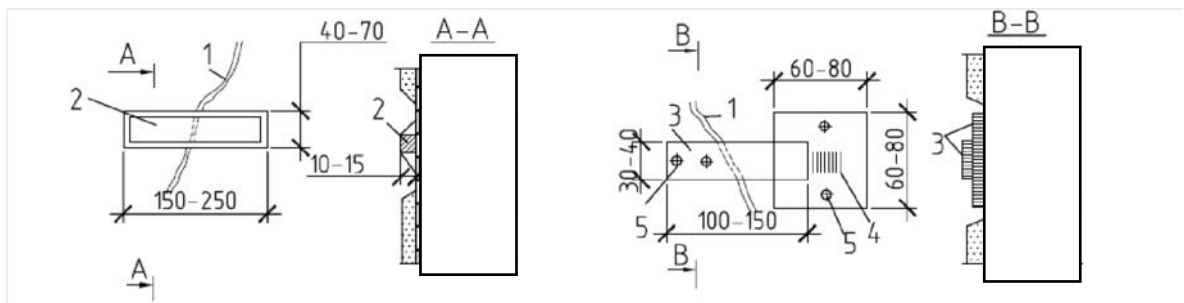


Рис. 3.7. Маяки для спостереження за розкриттям тріщин у колонах: 1 – тріщина; 2 – маяк гіпсовий або зі скла; 3 – металева пластина; 4 – риски; 5 – цвях

Ширину розкриття тріщин зазвичай визначають за допомогою мікроскопа МПБ-2 (рис. 3.8) з ціною поділки 0,02 мм, межею вимірювання 6,5 мм і мікроскопа МИР-2 з межами вимірювань від 0,015 до 0,6 мм, а також лупи з масштабним розподілом (лупи Бринеля) або інших приладів і інструментів, що забезпечують точність вимірювань не нижче 0,1 мм.

Для визначення глибини тріщин використовують голки, дротові щупи або ультразвукові прилади типу УКБ-1М, Бетон-3М, КК-10ПМС.

Основним засобом контролю за розвитком тріщин є маяки — пластинки з гіпсу, цементно-піщаного розчину, скла чи металу, що встановлюються поперек тріщини. Їх розміри: 200–250 мм на 40–50 мм, товщина 6–10 мм. Маяки закріплюють безпосередньо на очищену поверхню конструкції, за потреби — в штраби, заповнені розчином. Розрив або зміщення частин маяка свідчить про розвиток деформацій.



Рис. 3.8. Визначення ширини розкриття тріщини у балці покриття за допомогою мікроскопа МПБ-2 (Мир-2). ПАТ «Донбасенерго» [56]

Контроль маяків: перша перевірка через тиждень після встановлення, надалі — щомісячно, або щодня при активному розвитку тріщин. Деформовані маяки замінюють новими з тим самим номером; пошкоджені залишають до завершення спостережень. Якщо протягом 30 днів тріщина не змінюється, її розвиток вважається завершеним — маяки демонтують, тріщини закривають.

Для вимірювання ширини тріщин використовують щілиноміри або тріщиноміри відповідних типів.

У журналі спостережень фіксують: номер і дату встановлення приладу, місце і схему розміщення, початкові параметри тріщини (ширина, довжина, глибина) та їхню динаміку. За отриманими даними будують графіки розкриття тріщин.

Оцінка тріщин і стану конструкцій виконується наступним чином [56]:

- Розкриття до 0,3–0,4 мм — нормальна робота конструкції.

- Розкриття понад 0,4 мм — перевантаження, пластичні деформації, порушення зчеплення арматури з бетоном.

- Сантиметрові тріщини — ознака критичного стану або можливого обвалення.

Характер тріщин і їх можливі причини залежать від характеру зусиль в елементах залізобетонних конструкцій:

- ***У стиснених елементах.***

- Поперечні тріщини вказують на виникнення розтягальних напружень (можливо, тимчасових) і зниження несучої здатності конструкції приблизно на 15%, але не на її аварійний стан.

- Поздовжні тріщини та відколи — ознака початку руйнування бетону (за винятком корозійних чи усадкових причин).

- ***У розтягнутих елементах:***

- Поздовжні тріщини можуть бути наслідком усадки, обтиснення переднапруженою арматурою, недостатнього поперечного армування, корозії або висмикування арматури. За винятком останніх двох випадків, ці тріщини не є ознакою критичного стану.

- Поперечні тріщини можуть виникати внаслідок перевантаження, температурно-вологісних деформацій, локальних концентрацій розтягальних напружень або зміщення опор. Залежно від глибини та розкриття, вони можуть бути як контрольованими, так і свідчити про зниження несучої здатності елемента.

- ***У переднапружених елементах:***

- Поперечні й похилі тріщини можуть вказувати на перевантаження або втрату ефекту переднапруження.

- Похилі тріщини в приопорній зоні, які перетинають зону розміщення арматури та виходять на нижню грань — ознака втрати анкерування.

- Горизонтальні тріщини в торцях уздовж арматури зі сколюванням кахлів — свідчення порушення анкерування або проковзування арматури.

- ***У згинальних конструкціях:***

- Похилі тріщини в приопорних ділянках (балок, плит, прогонів, ферм) свідчать про перевантаження або недостатню несучу здатність за поперечною силою.

- Вертикальні тріщини в пролітних ділянках вказують на перевантаження, надмірну деформативність або нестачу несучої здатності за згином.

- Розкриття тріщин 0,5–1 мм свідчить про пластичні деформації; понад декілька міліметрів — ознака аварійного стану.

• **Специфічні випадки:**

- Тріщини уздовж арматурних стержнів або хомутів можуть виникати внаслідок розпирання бетону при корозії металу.

- Вертикальні тріщини на гранях колон без ознак корозії — можливий наслідок надмірного вигину арматури або перевантаження конструкції.

Виявлення тріщин у металевих конструкціях є критично важливою частиною технічного обстеження, оскільки вони можуть сигналізувати про небезпечні деформації, втому матеріалу або порушення цілісності з'єднань. Основні зусилля при огляді зосереджуються на вузлових зонах ферм, зварних і клепаних з'єднаннях, опорних вузлах та стиках, а також на зонах з великими розтягуючими навантаженнями [56, 35, 36, 196, 197]. Оцінка виконується візуально, із застосуванням дзеркал, ліхтарів, дотику, а також із використанням простих вимірювальних засобів, як-от виски та щупи (Таблиця 3.2).

Під час обстеження колон, стиків балок, зв'язків та елементів покриття важливо оцінювати не лише наявність тріщин, а й інші супутні ознаки – місцеві деформації, залишкові прогини, корозію, зсуви або викривлення. Узагальнення методів спостереження за тріщинами в металевих конструкціях наведено в табл. 3.1.

Для визначення технічного стану конструкцій використовують різноманітні методи і техніки, що дозволяють проводити детальне обстеження технічного стану елементів каркасу будівлі [35-36, 56, 65-67, 196-198, 242]. Серед основних інструментів є нивелір та теодоліт, що використовуються для визначення прогинів, осідань і перекосів основних конструкцій колон та опорних вузлів

покриття. Для вимірювання лінійних величин, таких як зсув опорних вузлів або деформації гнутих елементів, застосовують інструменти, наприклад, рулетки, штангенциркулі або метри.

Таблиця 3.1

Методи спостереження за тріщинами в металевих конструкціях

№	Об'єкт спостереження	Ознаки тріщин/дефектів	Метод виявлення	Примітки/Засоби
1	Вузли ферм (накладки, фасонки)	Тріщини в місцях стику елементів	Візуально, дотик, ліхтар/дзеркало	Особливо у розтягнутих
2	Опорні стики та з'єднання	Відшарування, тріщини в зварних швах	Візуальний контроль, дотик	Уточнення: за відсутності доступу – використати дзеркало
3	Пояси та стінки підкранових балок	Поверхневі тріщини, вигини	Огляд з обох боків, щупи	Важливо: під ребрами жорсткості
4	Заклепувальні з'єднання	Тріщини в голівках, слабе кріплення	Візуально, простукування	До 2 мм зазору — допускається
5	Колони (нижня частина, стики, ґрати)	Місцеві тріщини, скривлення, вм'ятини	Візуальний контроль	Слід враховувати механічні дії від транспорту
6	Підкранові балки, рейкові шляхи	Тріщини у поясах, швах, вигини	Візуально, вимірювання прямолінійності	Звертати увагу на нерозрізні балки
7	Вузли зв'язків (до колон, балок)	Тріщини у фасонках, швах, болтових з'єднаннях	Огляд, перевірка зварних швів	Особливо у розтягнутих елементах

Щоб досліджувати глибину зазорів між фланцевими з'єднаннями у вузлах з'єднання стержнів і конекторів, використовують щупи. З допомогою переносного мікроскопа МИР-2 здійснюється обстеження ширини розкриття тріщин на металевих конструкціях. Для оцінки міцності конструкцій і виявлення прихованих дефектів застосовуються ультразвукові пристрої, наприклад УКБ-2

та ДУК-20. Крім того, для відбору проб металу використовують електродріль ударно-обертальної дії. Для визначення твердості сталі, зокрема в металевих фермах, використовують динамічний твердомір ТДМ-2 (рис. 3.9).



Рис. 3.9. Визначення твердості сталі ферми за допомогою динамічного твердоміра ТДМ-2. Цех № 24 ВАТ «Донецькгірмаш»

Ушкодження антикорозійних захисних покриттів металевих конструкцій встановлюють візуально, а їх стан оцінюють у процесі періодичних оглядів відповідно до чинних нормативних документів. Для визначення величини корозійних ушкоджень елементи попередньо очищають від забруднень і продуктів корозії, після чого вимірюють їх товщину мікрометром, штангенциркулем або спеціальними приладами; для замкнених профілів доцільно використовувати ультразвукові товщиноміри (рис. 2.19). Температурно-вологісний режим експлуатації оцінюють за допомогою психрометрів, а якість зварних швів — візуально, шаблонами та, за потреби, дефектоскопічними методами.

Перед оглядом металеві конструкції очищають від бруду, пилу та корозії. Зовнішні дефекти зварних, болтових і заклепкових з'єднань виявляють переважно візуально із застосуванням простих вимірювальних засобів, а приховані дефекти — простукуванням, дефектоскопією або іншими спеціальними методами. Ступінь небезпеки виявлених ушкоджень, зокрема деформацій, корозійного зносу, надрізів і вирізів, визначають шляхом

перевірних розрахунків; у разі потреби передбачають заходи щодо тимчасового закріплення аварійних конструкцій.

Кількісна характеристика ушкоджень і часу їх виникнення дає змогу оцінити надійність підкранових конструкцій, виявити найуразливіші місця та обґрунтувати заходи щодо відновлення їх експлуатаційних якостей. Питання обстеження та оцінювання технічного стану сталевих конструкцій найбільш повно викладено у [56, 66, 179].

Основними характеристиками, які підлягають визначенню під час обстеження бетонних і залізобетонних конструкцій, є [56]:

- геометричні розміри конструкцій і вузлів їх з'єднання;
- прогини, крени, осідання конструкцій;
- ширина й довжина розкриття тріщин, їх місце розташування і характер;
- міцність бетону;
- водопроникність бетону;
- глибина ушкодженого шару бетону;
- діаметр, кількість і розташування арматури;
- клас арматури, марка сталі, її міцнісні й деформаційні характеристики; - ступінь ушкодження арматури й закладних деталей корозією.

Під час обстеження бетонних і залізобетонних конструкцій необхідно виявляти видимі дефекти й ушкодження: деформації окремих елементів або конструкцій у цілому, відхилення від проектного положення по горизонталі або вертикалі, порушення геометричних розмірів перетинів, дефекти бетонування (раковини й скупчення інертних, слабо зв'язаних між собою тощо), механічні ушкодження, різного роду тріщини, зсуви й деформації у вузлах сполучень конструкцій, розтріскування й відшарування захисних шарів бетону, корозію арматур, порушення зчеплення арматури з бетоном, зволоження, висоли, руйнування захисних покриттів бетону й карбонізацію бетону, недостатнє або ослаблене армування під час руйнування захисного шару [35, 56, 64, 100].

При визначенні причин прогинів слід враховувати, що прогини від навантаження або недостатньої несучої здатності зазвичай супроводжуються

розкриттям тріщин, тоді як їх відсутність може свідчити про технологічні деформації. Визначення прогинів виконують вибірково для характерних елементів.

Для уточнення дефектів і стану арматури, за потреби, застосовують методи з розкриттям конструкцій, а внутрішні дефекти (міцність, пористість, розташування арматури) визначають із використанням спеціальних приладів. Перед визначенням міцності бетону виділяють ділянки з характерними дефектами та проводять випробування відповідно до нормативних вимог [34].

Кількість і розташування ділянок випробувань встановлюють за програмою обстежень із забезпеченням їх репрезентативності [34].

Для визначення міцності бетону насамперед слід використовувати метод відриву зі сколюванням і метод сколювання ребра, для яких, відповідно до [85], можна використовувати уніфіковані градуйовані залежності. Для методу відриву зі сколюванням використовують прилади ГПНВ-5 (рис. 3.10), ГПНС-4, ГПНС-5, ПИБ, а для методу сколювання ребра, крім того, УРС-2. Враховуючи високу трудомісткість визначення міцності бетону методом відриву зі сколюванням і методом відколу ребра за великого обсягу робіт, одночасно з ними слід використовувати такі методи про які йдеться у [85]: пружного відскоку (прилад КМ, склерометр Шмідта), пластичних деформацій (прилади ПМ-2, Ц-22), ударного імпульсу (прилад ВСМ, вимірювач міцності бетону ударно-імпульсний ОНИКС-2.5 (рис. 3.11), а також ультразвуковий метод (прилади Бетон-12, УК-НП, УК10ПМ, УФ-10П) [110]. Про спільне використання цих методів йдеться в [85]. Міцність бетону масивних конструкцій можна визначати за результатами випробувань висвердлених з конструкції кернів.

Ділянки для визначення міцності бетону вибирають залежно від стану конструкцій, умов їх роботи і методів оцінки міцності бетону [143, 85].

У процесі статистичного оцінювання міцності бетону необов'язково розмішувати ділянки випробувань у найбільш навантажених елементах і

перетинах конструкцій. Під час оцінювання несучої здатності окремих перетинів і зон у них потрібно визначати міцність бетону.



Рис. 3.10. Ямка у бетоні після визначення міцності бетону в колоні за допомогою приладу ГПНВ-5. ПУМА УГП Укрхімтрансміак, м. Горлівка



Рис. 3.11. Визначення міцності бетону в колоні та в підкрановій балці за допомогою вимірника міцності бетону ударно-імпульсного типу ОНИКС-2.5.

ТОВ «Електросталь», м. Курахово Донецької області

Положення, кількість і діаметр арматури, розташованої з досить великим кроком і неглибоко в тілі бетону, можна визначати магнітним методом за ДСТУ Б В.2.6-4-95 (прилади ИЗС) за допомогою штангенциркуля, оголивши захисний шар бетону (рис. 3.12) або магнітометричним методом за допомогою приладу ПОИСК 2.51 [85].

За складних схем армування й глибоко розташованої арматури для визначення товщини захисного шару бетону, розмірів і розташувань арматури

використовують методи радіаційної дефектоскопії за ДСТУ Б В.2.7-224:2009 (малогабаритні бетатрони ПМБ-6 і МИБ-4) [34].



Рис. 3.12. Визначення діаметра робочої арматури колони. ТОВ
«Електросталь», м. Курахово Донецької області

У процесі обстеження попередньо напружених залізобетонних конструкцій особливу увагу потрібно звертати на стан анкерувальних обладнань і суміжних ділянок бетону.

Ступінь небезпеки й заходи щодо усунення прогинів, відхилень від проектного положення, тріщин, дефектів і ушкоджень металевих сполучних елементів, корозійних ушкоджень арматури, а також внутрішніх дефектів і ушкоджень бетонних і залізобетонних конструкцій потрібно визначати на основі перевірних розрахунків, відповідно до вимог чинних інструктивно-нормативних документів.

Під час визначення ступеня небезпеки тріщин у бетоні, а також ушкоджень захисних покриттів залізобетонних конструкцій слід урахувувати ступінь агресивності експлуатаційного середовища. У будинках з неагресивними середовищами в конструкціях зі звичайним армуванням допускається не ремонтувати тріщини, що поширюються до арматур або закладних деталей, з величиною розкриття до 0,3 мм. Величину розкриття тріщин, а також ушкоджень захисних покриттів в агресивних середовищах ухвалюють відповідно до вимог нормативних документів.

Величини корозійних ушкоджень арматур слід визначати й оцінювати, керуючись відповідними вказівками щодо металевих конструкцій з виконанням, за потреби, розкриттів розглядуваних елементів [178].

На основі проведеного аналізу у таблиці 3.2 систематизовано основні методи інструментального обстеження каркасів будівель. Методи обстеження згруповані за досліджуваними параметрами та методами випробувань у відповідні функціональні групи та підгрупи, що забезпечує системний підхід до вибору контрольно-вимірювальних засобів згідно з технічними вимогами і специфікою інженерного завдання. Отримані результати слугують базою для розрахунків і перевірки конструкцій на несучу здатність згідно з вимогами чинних будівельних нормативів.

Таблиця 3.2

Систематизація методів інструментального обстеження каркасів будівель за досліджуваними параметрами та методами випробувань

	Групи факторів за досліджуваним параметром		Підгрупи факторів за методом випробування чи вимірювання	Приклади інструментів, приладів, обладнання
<i>B₁</i>	Об'ємна деформація будівлі	<i>B₁₁</i>	Нівелювання	Нівеліри: Н-3, Н-10, НА-3, НА-1, цифрові нівеліри (наприклад, Leica DNA03, Trimble DiNi), лазерний далекомір DLE 50 Professional – 2 шт., підзорна труба x12 – 1, бінокль x40, рулетка – 2 шт.
		<i>B₁₂</i>	Теодолітна зйомка	Теодоліти: Т2, Т15, ТаН, електронні теодоліти (наприклад, Leica T100, Sokkia DT940)
		<i>B₁₃</i>	Фотограмметрія	Фотоапарати, стереокомпаратор, дрон з фотограмметричним ПЗ (наприклад, DJI Phantom 4 RTK + Pix4D, Agisoft Metashape)
		<i>B₁₄</i>	Тривимірне лазерне сканування	3D лазерні сканери: Leica RTC360, FARO Focus Premium, Trimble X7, Z+F IMAGER 5016, RIEGL VZ-400i; програмне забезпечення: Autodesk ReCap, Leica Cyclone, FARO Scene
		<i>B₁₅</i>	Геодезичне супутникове спостереження (GNSS)	GNSS-приймачі: Trimble R12i, Leica GS18, Topcon Hiper VR, контролери Trimble TSC7

Продовження таблиці 3.2

		<i>B₁₆</i>	Тахеометрична зйомка (електронна)	Роботизовані тахеометри: Leica TS16, Trimble S5, Topcon GT-1200
<i>B₂</i>	Прогини та переміщення	<i>B₂₁</i>	Нівелювання	Нівеліри: Н-3, Н-10, НА-1, цифрові (Leica NA300, Trimble DiNi); лазерні нівеліри (Bosch GLL 3-80, DeWalt DW088K); лазерний далекомір DLE 50 Professional
		<i>B₂₂</i>	Прогиномири механічної дії	ПМ-2, ПМ-3, ПАТ-5, Прогиномір 6ПАТ – 2 шт., індикатори "ІЧ-10" – 4 шт., багатообертовий індикатор «МІГ», індикатор годинниковий ІЧ-10 ГОСТ 577-68
		<i>B₂₃</i>	Рідинний метод (сполучені судини)	П-1, водяний рівень, електронний рівнемір (наприклад, Nivel System DL60)
		<i>B₂₄</i>	Цифрові датчики переміщення / Лінійки LVDT	Цифрові лінійки типу Solartron Metrology, Keyence, SICK – для точних вимірів мікропереміщень
		<i>B₂₅</i>	Геодезичні способи (тахеометр, GNSS)	Електронні тахеометри: Trimble S9, Leica TS16; GNSS приймачі: Leica GS18, Topcon Hiper HR
		<i>B₂₆</i>	Оптична фіксація / Відеомоніторинг	Цифрові відеокамери з мітками переміщення, програми для аналізу зображення: ImageJ, Tracker
<i>B₃</i>	Міцність бетону	<i>B₃₁</i>	Метод пластичної деформації (ГОСТ 22690.0-88, DIN EN 12504-4)	Молотки Фізделя, Кашкарова, склерометри Schmidt Hammer (Proceq N/NR), прилади КМ, ПМ, ХПС
		<i>B₃₂</i>	Ультразвуковий метод (ГОСТ 17624-87)	УКБ-2, Бетон-5, УК-14П, УК1401, Бетон-12, NOVOTEST Сучасні цифрові/смарт технології: Proceq Pundit PL-200 (цифровий), Proceq Pundit Live Array (хмарний, з аналітикою)
		<i>B₃₃</i>	Метод відриву зі сколюванням (ГОСТ 22690.0-88)	ДПНВ-5, ДПНЗ-4, Сучасні цифрові/смарт технології: Proceq DY-2 (цифровий з пам'яттю), DeFelsko PosiTest AT-M / AT-A (цифрові pull-off тестери), ВУК Pull-off Tester (дисплей, реєстрація даних)
		<i>B₃₄</i>	Метод стискання	Динамометричні кліщі, пресові машини (наприклад, PILOT Pro, CONTROLS, Toni Technik)
		<i>B₃₅</i>	Ударно-імпульсний метод	Прилад ОНІКС 2.5, Rebound Hammer SilverSchmidt (Proceq)
		<i>B₃₆</i>	Резонансна динамічна методика (динамічний модуль пружності)	Proceq Resonance Tester, Toni Technik Resonance System, Controls E-Modul

Продовження таблиці 3.2

		B ₃₇	Безконтактний сенсорний метод моделювання міцності бетону	SmartRock (Giatec/Heidelberg), Sensohive Maturix, Converge
B ₄	Міцність розчину	B ₄₁	Метод пластичної деформації	Склерометр СД-2, Schmidt Hammer (тип L), прилад ударно-імпульсний ОНІКС 2.5
		B ₄₂	Індиректні методи	Мікропреси для зразків розчину, портативні пресові пристрої
B ₅	Приховані дефекти матеріалу конструкції	B ₅₁	Ультразвуковий метод	УКБ-1, УКБ-2, Бетон-5, Бетон-12, Бетон-8УРЦ, УК-14П, ультразвуковий дефектоскоп УДЗ-71, TICO Pro, NOVOTEST УД2301 Сучасні цифрові/смарт технології: Pundit Live Array (Proceq) – з Bluetooth/Wi-Fi, AI аналіз
		B ₅₂	Радіометричний метод	РПП-1, РПП-2, РП6С, радіометри типу SRP-68-01, дозиметри (ТЕРРА-П, МКС-АТ6130)
		B ₅₃	Метод електромагнітного контролю	Електромагнітні дефектоскопи, сканери типу Profoscope Сучасні цифрові/смарт технології: Hilti PS 300 / PS 1000 (GPR-сканери), Proceq Profometer PM8000 (AI, хмарне сховище, аналіз), Leica C-thruе (сучасний GPR з інтерпретацією), GSSI StructureScan/Conquest 100/Mini HR (радар, 3D візуалізація)
B ₆	Глибина тріщин у бетоні та кам'яній кладці	B ₆₁	Підсікання тріщин (ручний метод)	Молоток, зубило, лінійка, шупи, цифровий штангенциркуль
		B ₆₂	Ультразвуковий метод	УК-10ПМ, Бетон-12, УК-14П, Бетон-5, Бетон-8УРЦ, TICO, NOVOTEST ТКМ-3590
B ₇	Ширина розкриття тріщин	B ₇₁	Вимірювання сталевими шупами / штангенциркуль	Щуп, лінійка, цифровий штангенциркуль, тріщиномір типу УШС-3, Crack Width Gauge
		B ₇₂	Відліковий мікроскоп / лупа з лінійкою	СВІТ-2, МПБ-2, тріщиноміри з підсвіткою (CrackScope, CrackDetect), цифрові мікроскопи Dino-Lite
B ₈	Товщина захисного шару бетону	B ₈₁	Магнітометричний метод	ІЗС-2, МІ-1, ICM, товщиномір ПОШУК 2.51, Proceq Profometer 630AI, NOVOTEST PE-2M
		B ₈₂	Ультразвуковий метод	Товщиномір ТУЗ-5, ультразвукові сканери Elcometer NDT, Krautkramer CL5
B ₉	Щільність бетону, каменю та сипучих матеріалів	B ₉₁	Радіометричний метод	Джерела випромінювання: Cs-137, Co-60; виносний елемент типу ІП-3; радіометри: Б-3, Б-4, Бетон-8-УРЦ, GammaScout, Radi-Alert

Продовження таблиці 3.2

		<i>B₉₂</i>	Твердомір динамічний	Твердомір динамічний ТДМ-2, Proseq НМ-200, Novotest ТДМ
		<i>B₉₃</i>	Метод вимірювання маси та об'єму (демонтажні роботи)	Ваги високої точності, рівень вологості зваженого матеріалу (важливе для сипучих матеріалів)
<i>B₁₀</i>	Оцінювання адгезії та зчеплення матеріалів	<i>B_{10,1}</i>	Метод відриву з контролем адгезії (ISO 4624, EN 1542, ASTM C1583, ASTM D7234)	DeFelsko PosiTest AT-M / AT-A (ISO 4624, EN 1542, ASTM C1583), ВУК Pull-Off Tester, CES-350
		<i>B_{10,2}</i>	Лабораторний контроль	Pull-off тестер (китайські, німецькі), цифрові гідравлічні системи (Zwick/Roell, Walter+Bai)
<i>B₁₁</i>	Вологість бетону та каменю	<i>B_{11,1}</i>	Нейтронний метод	Джерела випромінювання Ra-Be, датчик НВ-3, рахункові пристрої: СЧ-3, СЧ-4, "Бамбук", вологостат ПОЛОН-2, Heliotool-4
		<i>B_{11,2}</i>	Датчики вологості та температури	Датчики ДВТ-302ц, І2ДВТ, In-Situ Inc. "Hydromet"
		<i>B_{11,3}</i>	Метод електричних імпедансних вимірювань	Вимірювачі вологості та температури типу WET-3000, ПТ-4Е, ПТ-1000
<i>B₁₂</i>	Повітропроникність	<i>B_{12,1}</i>	Пневматичний метод	ДСК-3-1, ІТТ-2М, повітророзподільні камери для досліджень, аналізатори аеродинамічних характеристик, аналізатор герметичності SIGMA 2000
		<i>B_{12,2}</i>	Анімометр ручний типу Б	Анімометри типу Ametek, Lutron AM-420, Testo 410-2, Aeroqual Series 200
<i>B₁₃</i>	Параметри вібрації конструкції	<i>B_{13,1}</i>	Візуальний метод	Відеокамери з високою частотою кадрів для фіксації вібрацій (система відеоаналітики)
		<i>B_{13,2}</i>	Механічний метод	Вібромарка, Віброграф Гейгера, ручний віброграф ВР, аналізатор спектру вібрацій 795М107В
		<i>B_{13,3}</i>	Електрооптичний метод	Осцилографи: Н-700, Н-700, ВІД-24-51, комплект вібродатчиків (VibraTest, Geosig), аналізатор частотних характеристик (B&K, Brüel & Kjær)
<i>B₁₄</i>	Осадка фундаменту	<i>B_{14,1}</i>	Нівелювання	Нівеліри: Н-3, Н-10, НА-1, цифрові та лазерні нівеліри (Leica, Trimble, Topcon)
		<i>B_{14,2}</i>	Прогиноміри	Прогиномір 6ПАТ, індикатор "ГЧ-10", індикатор багатообертовий "МІГ", мікрометри для вимірювання осадків (типу Sesa)
<i>B₁₅</i>	Екологічність	<i>B₁₅</i>	Вимірювання рівня радіаційного фону	Прилади для вимірювання рівня радіації: GammaScout, ТЕРРА-М, термолюмінесцентні дозиметри (ПНД-50), Geiger Counter (LabTech)

Продовження таблиці 3.2

B_{16}	Визначення марки сталі	$B_{16,1}$	Рентгенофлуоресцентний метод	Портативний РФА спектрометр: X-MET7000, Niton XL5, Thermo Scientific Analyzer
		$B_{16,2}$	Іскровий оптичний метод	Атомно-емісійний спектрометр: Spectro, ARL 4460, оптико-емісійний аналізатор металів SPECTRO iQ

Модель структури методів інструментального обстеження каркасів будівель за функціональними ознаками оцінки технічного стану представлена на рис. 3.13.



Рис. 3.13 Структурно-функціональна модель методів інструментального обстеження каркасів будівель

3.2.Методика дослідження норм витрат праці і часу на процеси підсилення

Підсилення конструкцій каркасних будівель є складним і багатоаспектним процесом, що потребує науково обґрунтованого підходу до планування та нормування трудових витрат. Трудові витрати визначаються стандартним часом — кількістю часу, необхідною для виконання одиниці обсягу робіт.

У практиці країн СНД основою нормування трудових витрат тривалий час залишалися єдині норми часу і розцінок (ЕНіР), тоді як в Україні наразі застосовується система кошторисних норм та державних стандартів [233]. Однак зазначені нормативи були сформовані з урахуванням переважно традиційних технологічних рішень і не повною мірою враховують застосування сучасних матеріалів, інноваційних методів організації праці (зокрема принципів Lean-будівництва) та новітніх засобів механізації. За умов впровадження високотехнологічних методів підсилення конструкцій типові норми можуть втрачати актуальність, а локальні розцінки, що застосовуються на практиці, нерідко є недостатньо методично обґрунтованими.

У міжнародній практиці для розрахунку норм часу поширені більш гнучкі методи: статистично-множинний регресійний аналіз (MRA) [145], метод міркування на основі прецедентів (CBR), а також нейронні мережі (NN), які здебільшого застосовуються для оцінки вартості реконструкції [19, 177, 257, 258]. Їхня сильна сторона полягає у здатності обробляти великі масиви даних та виявляти приховані закономірності. Проте такі підходи мають обмеження: вони потребують надійних вихідних баз даних, тривалого процесу навчання моделей та не орієнтовані безпосередньо на специфіку окремих будівельних процесів, зокрема підсилення (табл. 3.3).

У межах цього дослідження нормативна база витрат праці формувалася на основі аналітичних методів нормування технологічних операцій, які дозволяють формалізувати процеси підсилення та встановити їх кількісні параметри, зокрема трудомісткість, тривалість і ресурсні витрати, а саме:

- оптимальні трудові витрати на одиницю обсягу;
- кількісний склад виконавців різної кваліфікації;
- номенклатуру та завантаженість технічних засобів;
- умови мінімізації втрат ресурсів і часу.

Таблиця 3.3

Огляд методів визначення норм часу на виконання процесів підсилення
будівельних конструкцій

Метод нормування	Опис	Переваги	Недоліки
Часові заміри	Спостереження за реальними витратами часу на виконання окремих операцій.	Простота, висока точність у реальних умовах.	Трудомісткість збору даних, врахування лише локальних умов.
Нормативно-довідковий	Використання типових норм витрат часу та ресурсів із довідників.	Швидкість розрахунків, доступність готових даних.	Узагальненість, неврахування специфіки об'єкта.
Математичне моделювання	Створення моделей взаємозв'язків між параметрами (час, ресурси, навантаження). Використання таких програм як MATLAB, Mathcad, або спеціалізовані розрахункові програми, які використовують інженери для моделювання навантажень і оптимізації процесів.	Висока точність, врахування багатьох факторів.	Складність створення моделей, необхідність точних вхідних даних.
Мережеві методи (PERT, CPM)	Побудова графіків процесів, визначення критичного шляху. Використання таких програм як MS Project, Primavera P6, Oracle Aconex. для створення та аналізу критичного шляху або побудови діаграм.	Оптимізація тривалості проєкту, врахування взаємозв'язків між операціями.	Необхідність точних даних для кожного етапу.
Теорія масового обслуговування	Аналіз впливу випадкових подій на черги та ресурси. Для аналізу черг, ймовірностей затримок або розподілу ресурсів використовують спеціальні ПЗ, як Arena Simulation, AnyLogic, або бібліотеки в Python (наприклад, SimPy).	Моделювання змінних умов, врахування ризиків.	Складність у застосуванні без спеціального програмного забезпечення.

Особливе місце займають методи математичного моделювання та оптимізації. До них належать метод критичного шляху, мережеве планування, статистичні та ймовірнісні методи прогнозування продуктивності (табл. 3.3). Їх застосування дозволяє формувати адаптивні графіки виконання робіт, що враховують можливі зміни виробничих умов та забезпечують безперервність і узгодженість технологічних потоків.

Для підвищення достовірності розрахунків у роботі запропоновано поєднання математичного моделювання з методом часових замірів, що дає можливість отримати реалістичні параметри тривалості та ресурсних витрат у реальних умовах будівництва.

Запропонована інтеграція методів передбачає:

- використання часових замірів для збору базових параметрів процесу;
- побудову математичної моделі, що враховує взаємозв'язки між операціями, матеріалами та зовнішніми факторами;
- прогнозування та оптимізацію технологічного процесу з метою зниження витрат;
- досягнення високої точності нормування та практичної цінності результатів для задач підсилення.

Важливим елементом є врахування послідовності та тривалості окремих етапів процесу, включно з маршрутами пересування робітників або технічних засобів до місця складання і назад. Це дає можливість відтворити процес підсилення у часі та змодельовати необхідні маршрути пересування працівників або проїзду технічних засобів до робочої зони і назад у положення очікування. Якщо до складання залучено кількох робітників, передбачається або впровадження спеціальних механізмів співпраці, або організація роботи у складі бригади з відповідним розподілом функцій і тривалості завдань.

Фундаментом для створення нормативної бази витрат праці та для розроблення ефективних організаційно-технологічних рішень є впровадження аналітичних методів нормування, запропонованих проф. Тонкачєвим Г.М., що

забезпечують об'єктивну оцінку трудомісткості, ресурсної забезпеченості та часових меж кожного етапу технологічного процесу [18].

Створювана система нормування витрат праці та часу також враховує можливості сучасного програмного забезпечення, що дозволяє:

- виконувати тривимірне моделювання технологічних процесів;
- автоматизувати розрахунок витрат праці та ресурсів;
- визначати обсяги матеріалів і тривалість окремих операцій;
- знижувати вплив людського фактора;
- підвищувати точність планування та надійність підсилених конструкцій.

Крім того, передбачається впровадження ергономічної моделі робочого процесу, яка враховує взаємодію виконавця із зовнішнім середовищем та інтегрує додаткові дії, що супроводжують основну операцію. На продуктивність робіт у цьому контексті впливають такі фактори: мотивація виконавця, температура (34°C, 23°C, 8°C, 0°C, -10°C, -18°C), навички виконавця, висота розташування робочої зони, розташування робочої зони, час доби, освітлення місця роботи, напруження та втома виконавця, стрес, який може почувати виконавець, шум.

Розроблювана методика дослідження норм витрат праці і часу на процеси підсилення відрізняється тим, що представляє складну багатофакторну систему складових, що враховують вплив різномірних зовнішніх та внутрішніх умов. Для забезпечення системності аналізу та точності нормування, всі фактори структуровано у п'ять основних груп:

TTP – техніко-технологічні параметри процесів (Technical and Technological Parameters of Processes);

SPOF – соціально-психологічні і організаційні фактори (Socio-Psychological and Organizational Factors);

EF – зовнішнє середовище (шум, температура, освітлення тощо);

PSW – фізіологічний стан працівника (Physiological State of the Worker);

WRL— відходи, ризики та втрати при реконструкції (Waste, Risks and Losses).

Кожна з перших чотирьох груп (TTP, PSW, SPOF, EF) включає підгрупи факторів, які впливають на структуру витрат праці, зокрема:

- на продуктивний час T_o — безпосереднє виконання робіт;
- на непродуктивний час T_l — викликаний відпочинком, простоем, помилками, затримками тощо.

П'ята група WRL є інтегральним результатом впливу перших чотирьох груп, що дозволяє оцінити та проаналізувати: непродуктивні витрати часу; ризики виникнення втрат; потребу у коригуванні нормативів праці та часу відповідно до реальних умов виконання робіт та впровадити коригувальні коефіцієнти; оптимізувати ресурси; забезпечити реалістичність та ефективність організації робіт. Структурна схема взаємозв'язку основних факторів впливу з втратами (WRL) та їх впливом на нормування витрат праці і часу представлена на рис. 3.14. З кожної групи факторів впливу виділено підгрупи факторів (табл. 3.4).

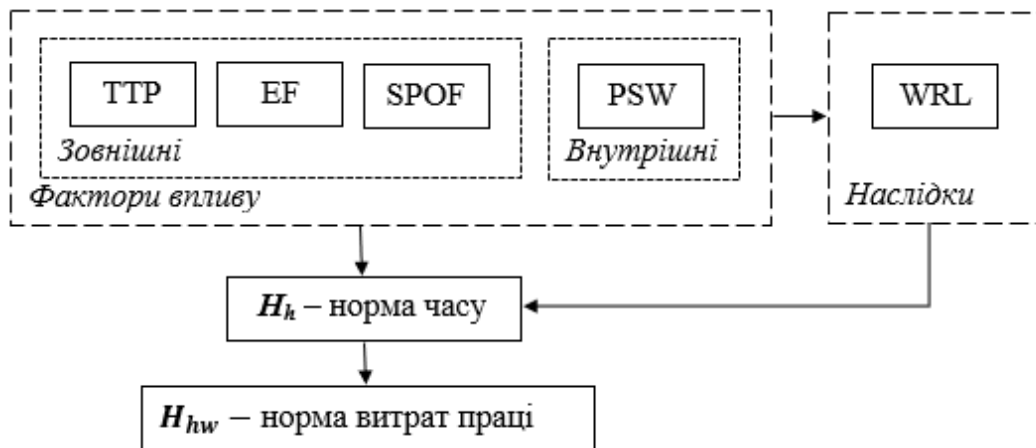


Рис. 3.14 Структурна схема взаємозв'язку факторів впливу на нормування витрат праці

Враховуючи всі фактори впливу, загальна норма часу на процес підсилення:

$$T_w = T_{hw} + T_{mw} \quad (3.2)$$

T_{hw} — витрат часу на немеханізований процес

T_{mw} — витрати часу на механізований процес.

Таблиця 3.4

Класифікація груп і підгруп факторів, що впливають на нормування витрат праці та часу при підсиленні конструкцій

Групи факторів	Підгрупи факторів	Приклади
TTP	TTP-1. Конструктивні особливості об'єкта	Тип каркасу, наявність дефектів, складність доступу до зони підсилення
	TTP-2. Технологія підсилення	Мокра чи суха, ін'єктування, накладки, композитні матеріали
	TTP-3. Рівень механізації	Використання підйомників, засобів малої механізації, інструментів
	TTP-4. Складність виконання монтажу	Обмеженість простору, необхідність точного стикування
	TTP-5. Обсяг робіт і їх циклічність	Монотонність, тривалість операцій, повторюваність
SPOF	SPOF-1. Рівень кваліфікації персоналу	
	SPOF-2. Ступінь мотивації та моральний стан	
	SPOF-3. Організація праці на об'єкті	Наявність ІТР, інструктаж, розподіл завдань
	SPOF-4. Комунікації між працівниками	
	SPOF-5. Розподіл змінності, графік робіт	
EF	EF-1. Температура повітря	
	EF-2. Освітлення робочого місця	
	EF-3. Рівень шуму та вібрацій	
	EF-4. Погодні умови (якщо роботи виконуються зовні)	
	EF-5. Вентиляція, запиленість, вологість	
PSW	PSW-1. Важкість фізичного навантаження	Середня, важка, надважка [194]
	PSW-2. Втома, стомлюваність	Фази працездатності, потреба у перервах
	PSW-3. Адаптація до умов	Висота робіт, температура, нічна зміна
	PSW-4. Стан здоров'я та вік виконавця	

Враховуючи всі фактори впливу, витрати часу на немеханізований процес визначати за формулою:

$$T_{hw} = T_{hw,o} + T_{hw,pc} + T_{hw,l} \quad (3.3)$$

де $T_{hw,o}$ – витрати часу на оперативну роботу, зокрема на основні і допоміжні операції, включаючи роботи з відновлення пошкоджених ділянок конструкцій, виготовлення монтаж, фіксацію і контроль, хв. або год;

$T_{hw,pc}$ — витрати часу на підготовчі та завершальні процеси, хв. або год.

$T_{hw,l}$ – витрати часу на непродуктивний час, викликаний відпочинком, технологічними перервами, простоєм, помилками, затримками тощо.

Аналогічно, витрати часу на механізований процес визначати за формулою:

$$T_{mw} = T_{mw,o} + T_{mw,pc} + T_{mw,l} \quad (3.4)$$

де $T_{mw,o}$ – витрати часу на оперативну роботу, зокрема на основні і допоміжні операції, включаючи роботи з відновлення пошкоджених ділянок конструкцій, виготовлення монтаж, фіксацію і контроль, хв. або год;

$T_{mw,pc}$ — витрати часу на підготовчі та завершальні процеси, хв. або год.

$T_{mw,l}$ – витрати часу на непродуктивний час, викликаний реверсуванням рухів, технологічними перервами, помилками, затримками тощо.

3.3.Методичні засади нормування витрат праці процесів підсилення конструкцій каркасних будівель

Підґрунтям для розроблення нормативної бази норм витрат праці стала методика цілочислового нормування технологічних процесів, запропонована професором Тонкачєєвим Г.М. [18, 19]. У межах даного дослідження вона була доопрацьована з урахуванням комплексу факторів, що впливають на формування трудомісткості та тривалості процесів підсилення конструкцій, згідно з результатами, викладеними у розділі 3.2. Для побудови нормативної бази виконано попередній системний аналіз структури технологічного процесу, Зокрема, враховані технологічна послідовність операцій, просторово-конструктивні особливості об'єкта, кліматичні чинники та технічний стан

будівельних елементів. Наприклад, при підсиленні колон за допомогою обойм розглядаються такі фактори, як їх висота, положення у структурі каркасу, ступінь пошкодження, а також доцільність паралельного виконання окремих технологічних етапів з метою оптимізації трудових витрат.

Доцільність використання цілочисельного нормування на четвертому рівні структури будівельних процесів обґрунтована у працях [17-19]. У цьому контексті враховуються різні варіанти організації праці, включаючи змінність складу робочих бригад, типів будівельної техніки й обладнання, а також конструктивні параметри будівельних елементів.

У рамках запропонованого підходу тривалість монтажно-демонтажних та інших будівельних операцій доцільно визначати у вигляді цілих чисел — залежно від кількості технологічних дій, рівня відповідальності за якість і надійність виконуваних робіт, а також з урахуванням впливу зовнішніх і виробничих чинників.

Розроблена модель спрямована на розв’язання задачі синтезу витрат часу на виконання будівельних процесів, забезпечуючи їх адекватне нормування відповідно до реальних умов виробництва та підвищуючи точність планування трудових ресурсів.

Для оцінки часу виконання операцій проаналізовано загальну методологію [18, 256], яка передбачає два основні методи визначення нормативного часу: аналітико-розрахунковий метод (обчислення нормативного часу на основі існуючих регламентів) та аналітико-дослідницький метод (проведення польових досліджень із використанням хронометражу, фотографування тощо).

Часто ці два методи застосовуються у поєднанні. Проте їхня взаємодія з регламентами не вирішує усіх проблем нормування.

У зарубіжній практиці використовуються понад 200 різних систем мікроелементних нормативів [258]. Існуючі мікроелементні аналітичні методи нормування, а саме MTM (Methods-Time Measurement), MOST (Maynard Operation Sequence Technique) та MODAPTS (Modular Arrangement of Predetermined Time Standards) [18, 257, 258], які базуються на розкладанні

трудоих процесів на мікроелементи – базові рухи або дії, що оцінюються в умовних одиницях часу, попри їх високу точність при моделюванні трудових дій та операцій, не враховують комплексний вплив критичних факторів. Тому окрему увагу в роботі приділено врахуванню впливу техніко-технологічних особливостей процесів (ТТР), фізіологічного стану працівника (PSW), соціально-психологічних та організаційних умов (SPOF), зовнішнього середовища (EF), а також відходів, ризиків та втрат при реконструкції (WRL). Зазначені фактори мають вирішальне значення під час виконання робіт із підсилення конструкцій у реальних виробничих умовах, де нормативи, засновані лише на ідеалізованих діях, не забезпечують належної точності.

Це зумовило необхідність розроблення інноваційного підходу до нормування, який інтегрує результати дослідження факторів впливу (див. розділ 3.2) та адаптується до специфіки будівельних процесів реконструкції.

$T_0(e)$ – базова мікроелементна модель часу для процесу третього рівня TP_p (підсилення конкретного елемента e):

$$T_0(e) = \sum_{s \in S} \sum_{i \in I_s(e)} N_i \cdot H_h(i), \text{ хв}, \quad (3.5)$$

де S – підготовка, виготовлення, транспортування/подача, підйом,

установлення/вирівнювання, фіксація, контроль якості, завершальні};

$I_s(e)$ — множина мікродій у стадії s ,

N_i — кількість повторів дії i ,

H_h – норма часу відповідно до складності та відповідальності дій,

виражений цілими числами у i – му комплексі W_i , $H_h(i) \in \{1, \dots, 8\}$, хв.

Трудомісткість комплексу i – x дій за кількістю виконавців:

$$Q(e) = T_0(e) \times N_w(e), \quad (3.6)$$

де $N_w(e)$ — чисельність виконавців на процес TP_p .

У межах інноваційного методу нормування, що розроблений з урахуванням специфіки процесів підсилення конструкцій каркасних будівель, вперше введено інтегральний коригувальний коефіцієнт впливу.

Цей коефіцієнт сформований на основі результатів дослідження факторів впливу, представлених у розділі 2.5, де детально розглянуто п'ять основних груп чинників: ТТР – техніко-технологічні параметри процесів, PSW – фізіологічний стан працівника, SPOF – соціально-психологічні та організаційні фактори, EF – фактори зовнішнього середовища, WRL – відходи, ризики та втрати при реконструкції.

Інтегральний коефіцієнт коригування K_f дозволяє адаптувати базові нормативи витрат праці до реальних умов виконання робіт, враховуючи комбіновану дію впливових зовнішніх та внутрішніх чинників. Його впровадження забезпечує підвищення точності розрахунків, об'єктивність нормування та можливість оперативного коригування нормативів у проектних і виробничих умовах.

Отже, враховуючи загальну модель технологічної схеми організації та механізації технологічного процесу монтажу елементів підсилення конструкцій каркасів TP_{pr} та базову мікроелементну модель часу $T_0(e)$ узагальнена функція норми часу на елемент в люд-годинах виглядає наступним чином:

$$H_h(e) = 0.01667 \cdot \frac{1}{V_e} \cdot T_0(e) \cdot N_w(e) \cdot K_r \cdot K_{rev} \cdot K_f(e) \cdot K_{M,P}(e) \cdot K_{om} \cdot K_{ovlp} \quad (3.7)$$

де K_r – коефіцієнт регламентних витрат [234, 235, 255, 259, 260], що враховує потреби на вільний час та власні потреби виконавців процесу, витрати часу на підготовчі та завершальні дії, $K_r = 1,15 \dots 1,25$;

V_e – одиниця виміру продукції. Для підсилення конструкцій – одна конструкція;

0,0167 – коефіцієнт переведення люд-хв у люд-год;

K_{rev} – коефіцієнт реверсування рухів $K_r=1.5$ [18];

$K_f(e)$ – інтегральний коригувальний коефіцієнт умов виконання (індекс очікуваних втрат/ризиків (простої, переробки, дефекти, очікування тощо), що залежить від впливу зовнішніх факторів (TTP, PSW, SPOF, EF, WRL), формується на основі експертної оцінки впливу факторів, з використанням коефіцієнтів корекції для кожної групи (див. табл. 3.5). Він дозволяє врахувати технологічні, організаційні та виробничі умови виконання робіт.

Таблиця. 3.5

Орієнтовні коефіцієнти корекції за групами впливу

Група факторів	Позначення	Діапазон коефіцієнтів	Приклад впливу
TTP	K_{TTP}	1,00 – 1,10	Складна технологія або конструкція
PSW	K_{PSW}	1,00 – 1,15	Надважкі умови праці
SPOF	K_{SPOF}	1,00 – 1,10	Низька кваліфікація персоналу
EF	K_{EF}	1,00 – 1,20	Високий рівень шуму, спека
WRL	K_{WRL}	1,00 – 1,25	Часті простої, переробки, дефекти

Інтегральний коефіцієнт визначений як добуток часткових коефіцієнтів за групами:

$$K_f = K_{TTP} \cdot K_{PSW} \cdot K_{SPOF} \cdot K_{EF} \cdot K_{WRL} \quad (3.8)$$

$K_{M,P}(e)$ – коефіцієнти за схемою організації та механізації, які враховують вибір способу подачі (зі складу, «з коліс», укрупнення, місцеве виготовлення) та метод монтажного потоку.

K_{om} – коригувальні коефіцієнти обмежених умов праці (робота на висоті, нічна зміна, обмежений простір).

Для визначення ефективності схеми організації і механізації робіт, як і при новому будівництві, проводиться варіантний аналіз комплекта машин та механізмів. Однак у випадку реконструкції до техніко-економічних показників додаються коригувальні коефіцієнти обмежених умов праці:

$$K_{om} = K_s \cdot K_z \cdot K_b, \quad (3.9)$$

де K_{om} — коефіцієнт обмежених умов праці;

K_s — коефіцієнт зниження продуктивності через стислий простір (0,7...0,9);

K_z — коефіцієнт впливу забудови, що ускладнює під'їзд і складування матеріалів (0,8...0,95);

K_b — коефіцієнт впливу безперервної експлуатації будівлі (0,85...0,95).

Основною машиною для виконання робіт є вантажопідіймальні крани різних типів, проте для реконструкції більш характерне застосування мобільних автомобільних або пневмоколісних кранів малої вантажопідйомності, телескопічних підйомників, а також ручних та механізованих такелажних засобів. Використання баштових кранів обмежене через відсутність можливості їх монтажу на діючих об'єктах. Продуктивність визначається (210):

$$Q = \frac{G_{cp} \cdot K_h \cdot K_{om}}{t_o} \quad (3.10)$$

де G_{cp} — середньозважена маса підсилювального елемента;

K_h — коефіцієнт використання машини за часом (0,75–0,85);

t_o — тривалість робочого циклу.

Витрати часу робітників визначаються з урахуванням додаткових операцій, властивих реконструкції: підсилене стропування, демонтаж перешкод, організація захисних укриттів, додаткове вивіряння геометрії у стиснутих умовах. Це збільшує трудомісткість у середньому на 10–25 % порівняно з аналогічними операціями нового будівництва.

Для оптимізації процесу підсилення доцільним є застосування схем суміщення транспортування, монтажу і підсилення з коліс, використання малогабаритних транспортних засобів і модульних підйомних систем. При цьому вводиться коефіцієнт суміщення операцій:

$$K_{ovlp} = \frac{T_{pos}}{T_{sum}}, \quad (3.11)$$

де K_{ovlp} – коефіцієнт суміщення операцій, що враховує ефекти паралельності й перекриття стадій

T_{pos} — тривалість послідовного виконання операцій;

T_{sum} — тривалість суміщених операцій.

Норма витрат праці на весь процес розраховується за формулою:

$$H_{hw} = \sum_1^n H(e), \text{ люд-год} \quad (3.12)$$

Для зручності та наглядності розрахунків в таблиці 4.9 пропонується матриця складових норми витрат праці.

Запропонована методика нормування витрат праці процесів підсилення конструкцій забезпечує системне поєднання мікроелементного підходу, факторного аналізу умов виконання робіт та параметрів організації і механізації процесів. Формалізація структури витрат часу та введення інтегрального коригувального коефіцієнта дозволяють адаптувати нормативи до реальних виробничих умов реконструкції, підвищуючи їх об'єктивність і точність.

Таблиця 3.6

Матриця складових норми витрат праці

Найменування операції (комплексу дій)	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
W_1											
...											
W_n											
											$\sum Q_{wi}$

Отримані залежності та модель нормування створюють методичну основу для подальшого синтезу конструктивно-технологічних рішень, варіантного аналізу схем організації робіт і інтеграції результатів у конструктивно-технологічну систему (КТС) забезпечення якості підсилення. Це забезпечує перехід від локального розрахунку норм часу до системного управління

трудомісткістю, ресурсами та ефективністю процесів підсилення в умовах реконструкції.

Висновки по третьому розділу

1. Досліджено комплекс методів оцінювання технічного стану конструкцій каркасу будівлі — від візуального огляду до інструментального контролю із застосуванням сучасних засобів вимірювань. Встановлено, що точність результатів обстеження істотно залежить від обґрунтованого вибору методик з урахуванням матеріалу конструкцій, характеру дефектів і умов експлуатації. З метою забезпечення достовірної оцінки технічного стану каркасу та ухвалення обґрунтованих проєктних рішень або рішень щодо подальшої експлуатації окремо виділено методи інструментального обстеження з визначенням досліджуваних параметрів, способів випробувань і прикладів відповідного обладнання. Систематизація методів інструментального контролю за функціональними ознаками формує надійну інформаційну основу для подальших розрахунків і обґрунтування конструктивно-технологічних рішень з підсилення каркасних будівель.

2. Розроблено багатofакторну систему нормування, у якій усі чинники впливу структуровано за п'ятьма групами (TTP, SPOF, EF, PSW, WRL), які враховують техніко-технологічні, організаційні, ергономічні та зовнішні фактори. Це дозволяє розмежувати продуктивні та непродуктивні витрати часу та оцінити вплив виробничих ризиків. Запропоновано декомпозицію витрат часу на механізовані та немеханізовані складові з урахуванням оперативного, підготовчо-завершального та непродуктивного часу, що забезпечує системний підхід до формування нормативів. Визначено, що впровадження ергономічної моделі робочого процесу дозволяє врахувати вплив фізіологічного стану працівників та умов праці на продуктивність, що підвищує достовірність нормування. Запропонована система факторів впливу дозволяє диференційовано оцінювати продуктивний і непродуктивний час, ідентифікувати втрати та формувати обґрунтовані норми, адекватні реальним умовам виконання робіт з

урахуванням складності, відповідальності й умов виконання операцій, що підвищує достовірність планування процесів підсилення каркасних будівель.

3. Розвинуто методику цілочислового мікроелементного нормування з урахуванням специфіки процесів підсилення та умов реконструкції. Запропоновано базову мікроелементну модель часу $T_0(e)$, яка дозволяє формалізувати трудомісткість процесу підсилення через структуру стадій і комплексів елементарних дій. Вперше введено інтегральний коригувальний коефіцієнт K_f , що враховує комбінований вплив техніко-технологічних, організаційних, фізіологічних, середовищних факторів та виробничих втрат, що забезпечує адаптацію нормативів до реальних умов. Сформовано узагальнену функцію норми часу $H(e)$, яка інтегрує мікроелементну модель, параметри механізації, організаційні рішення, коефіцієнти обмежених умов праці та суміщення операцій.

4. Обґрунтовано доцільність інтеграції методів, де часові заміри (хронометраж) слугують базою для побудови математичних моделей. Такий підхід дозволяє адаптувати стандарти до реальних умов і суттєво підвищити точність нормування. Ключовим елементом є методика цілочислового нормування, яка базується на декомпозиції будівельного процесу до четвертого рівня — рівня окремих технологічних операцій. Це дозволяє встановлювати об'єктивні, технічно обґрунтовані норми часу з урахуванням складності та ступеня відповідальності кожної дії.

Висока точність та адаптивність оцінки трудовитрат досягається завдяки:

- впровадженню матричної системи обліку операцій;
- використанню цілих чисел у розрахунках (цілочислове моделювання);
- врахуванню коригуючих коефіцієнтів, що відображають організаційно-психологічні аспекти праці.

Такий комплексний підхід забезпечує формування гнучких нормативів, що відповідають сучасним вимогам реконструкції каркасних будівель.

5. Основні результати розділу викладені роботах [19, 56, 71, 177, 201, 286].

РОЗДІЛ 4

ВИЯВЛЕННЯ ТА ВІДБІР ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ПІДСИЛЕННЯ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

4.1. Види дефектів і причини їх виникнення.

Якість підсилення каркасних будівель і споруд значною мірою визначається не лише обраними конструктивно-технологічними рішеннями, а й сукупністю факторів, що проявляються через дефекти та пошкодження конструкцій, сформовані на різних етапах їх життєвого циклу. Під дефектами будівельних конструкцій розуміють їхню невідповідність вимогам стандартів, технічних умов, нормативам проєктування та проєктній документації.

Питанням дослідження дефектів будівельних конструкцій присвячені роботи таких учених, як В. Т. Гроздов [186], Е. А. Дмитренко [187], Д. Г. Золотозубов [188], Є. В. Клименко [189], О.С. Молодід [18, 21, 77], С. Я. Орловський [190], Й. А. Фіздель [66], Г. Руфферт [191], В. В. Савйовський [28], М. В. Прядко [56], В. Г. Соловйов [192] та інших.

Дефекти будівельних конструкцій є наслідком комплексу різноманітних факторів, які супроводжують проєктування, виготовлення, монтаж і експлуатацію споруд. Важливе значення має їх класифікація за причинами виникнення, оскільки вона дозволяє не лише встановити джерела пошкоджень, а й визначити шляхи їх усунення та запобігання. Основними чинниками, що призводять до дефектів конструкцій, є прорахунки на стадії проєктування, низька якість виготовлення елементів, порушення технологічних процесів під час будівельно-монтажних робіт, а також неналежна експлуатація будівель.

Окрему групу становлять дефекти, зумовлені недоліками проєктних рішень, які не враховують специфіку виготовлення та монтажу конструкцій, що унеможливорює створення якісного об'єкта навіть за формальної відповідності проєктним вимогам.

Дефекти суттєво впливають на експлуатаційні характеристики будівель і споруд: вони можуть знижувати несучу здатність і довговічність конструкцій, погіршувати умови експлуатації через порушення температурно-вологісного режиму приміщень, зменшувати звукоізоляційні властивості огорожувальних конструкцій, а також сприяти підвищенню експлуатаційних витрат. У найгірших випадках дефекти призводять до часткових руйнувань або аварій. Усі дефекти, за винятком тих, що спричинені стихійними лихами, зазвичай пов'язані з відсутністю належного технічного нагляду, низькою кваліфікацією виконавців або недоліками організації будівельного виробництва.

За характером розташування дефекти поділяються на зовнішні (поверхневі) та внутрішні (глибинні). Зовнішні дефекти, як правило, піддаються відносно простому усуненню, тоді як для ліквідації глибинних дефектів необхідне виконання складних спеціалізованих робіт. Крім того, дефекти можуть бути видимими та невидимими при візуальному обстеженні, легко- або важкоусувними, а також такими, що поступово розвиваються під впливом експлуатаційного середовища й навантажень або не впливають на загальну міцність конструкції.

У будівельній практиці зустрічаються різноманітні види дефектів і вад. Наприклад, під час зведення монолітних залізобетонних конструкцій часто спостерігаються прошарки сміття, ґрунту, порожнин або снігу, особливо у місцях сполучення стін, колон з фундаментами. До поширених дефектів належать грубі й пористі шви, що виникають при перервах у бетонуванні та недостатньому очищенні поверхонь; наявність бетону, який зазнав заморожування на ранніх стадіях або не пройшов необхідної теплової обробки; розшарування та неоднорідність структури бетону внаслідок впливу напірних вод або пересушування.

Основні дефекти бетонних і залізобетонних конструкцій включають: пустоти і раковини (виникають через утруднене ущільнення бетону в місцях скупчення арматури та закладних деталей) (рис. 4.1), каверни і пори (наслідок попадання повітря, неякісного ущільнення, розшарування суміші), нерівності

(через неякісну опалубку або недосконале укладання бетону), оголення арматури (викликане недостатнім захисним шаром або корозією), дефекти робочих швів (через перерви у бетонуванні і забруднення стиків), відколи і відшарування бетону (внаслідок механічних ушкоджень, корозії або замерзання води в пустотах). У збірних конструкціях часто зустрічаються тріщини, сколювання, ексцентриситет опирання, неповне замонолічування та порушення спільної роботи арматури з бетоном. Причинами дефектів є недотримання технології бетонування, перевантаження конструкцій, агресивне середовище і помилки при монтажі або зберіганні.



Рис. 4.1. Раковина у верхньому поясі монолітної залізобетонної підкранової балки внаслідок неякісного виконання бетонних робіт. ВАТ «Донецькгірмаш» [56]

Основні дефекти металевих кроквяних конструкцій – це викривлення та місцеві прогини елементів, ослаблення перетинів, тріщини, корозія і пошкодження з'єднань. Вони виникають через конструктивні особливості (тонкостінні гнучкі стержні, складна конфігурація), помилки виготовлення (зменшення перетинів, викривлення елементів, дефекти зварних швів, пропуски прокладок), неякісний монтаж (викривлення при транспортуванні, відхилення вузлів, пропуски накладок, недбале кріплення) (рис. 4.2), а також порушення експлуатації (перевантаження, підвішування устаткування, скупчення снігу і пилу, температурні впливи, втрата зв'язків). Додатково негативно впливають протікання покрівлі, агресивне середовище та неякісний захист від корозії.

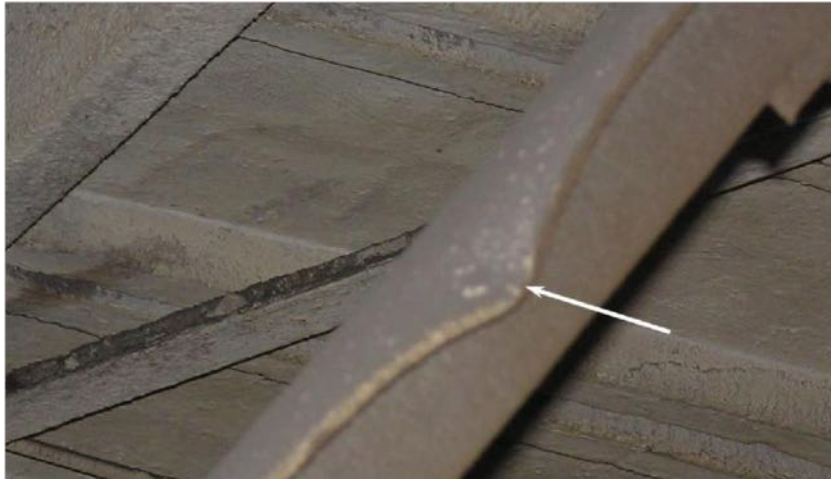


Рис. 4.2. Вм'ятина в розкосі ферми як результат механічного впливу під час монтажу. ВАТ «Донецькгірмаш» [56]

Потужні розвинені перетини колон виробничих будинків працюють у сприятливіших умовах, ніж інші елементи каркаса. Дефекти виготовлення в них (викривлення й вигини окремих елементів, дефекти зварених швів), як правило, незначні й мало впливають на несучу здатність колон. Істотніші дефекти монтажу колон — це відхилення від проектного положення (зсув у плані, відхилення від вертикалі), викривлення колон і слабке затягування анкерних болтів. Ці дефекти змінюють розрахункову схему колон, викликають додаткові моменти внаслідок ексцентричного додатку навантаження від підкранових балок і елементів покриття, що може призвести до передчасної втрати стійкості, погіршує роботу елементів стінового огороження і порушує геометрію підкранових колій, що може заважати їхній нормальній експлуатації.

Для вертикальних зв'язків між колонами характерні дефекти, пов'язані з вирізами в елементах для пропуску трубопроводів або установки обладнання (рис. 4.3).

Однією з причин ушкодження підкранових конструкцій є низька якість зварених з'єднань. Низька якість швів, виконаних вручну або напівавтоматом, створює додаткову концентрацію напруг. Монтаж підкранових конструкцій нерідко виконують з відхиленнями від проектного положення (балки встановлюють на пакет металевих підбивок (рис. 4.4), зазори в обпиранні ребер,

відсутність кріплень, рейки укладають з ексцентриситетом, що призводить до додаткових впливів, які не враховано під час розрахунків). У швах кріплення гальмових конструкцій до балок також є багато дефектів. Часто ці з'єднання виконують переривчастими швами, відсутнє підварювання тощо.



Рис. 4.3. Виріз частини хрестового зв'язку (для устаткування). ВАТ «Донецькгірмаш» [56]



Рис. 4.4. Обпирання підкранових балок на консоль колони через багатошарові металеві підбивки не забезпечує надійного з'єднання. ТОВ «Електросталь», м. Курахово Донецької області [56]

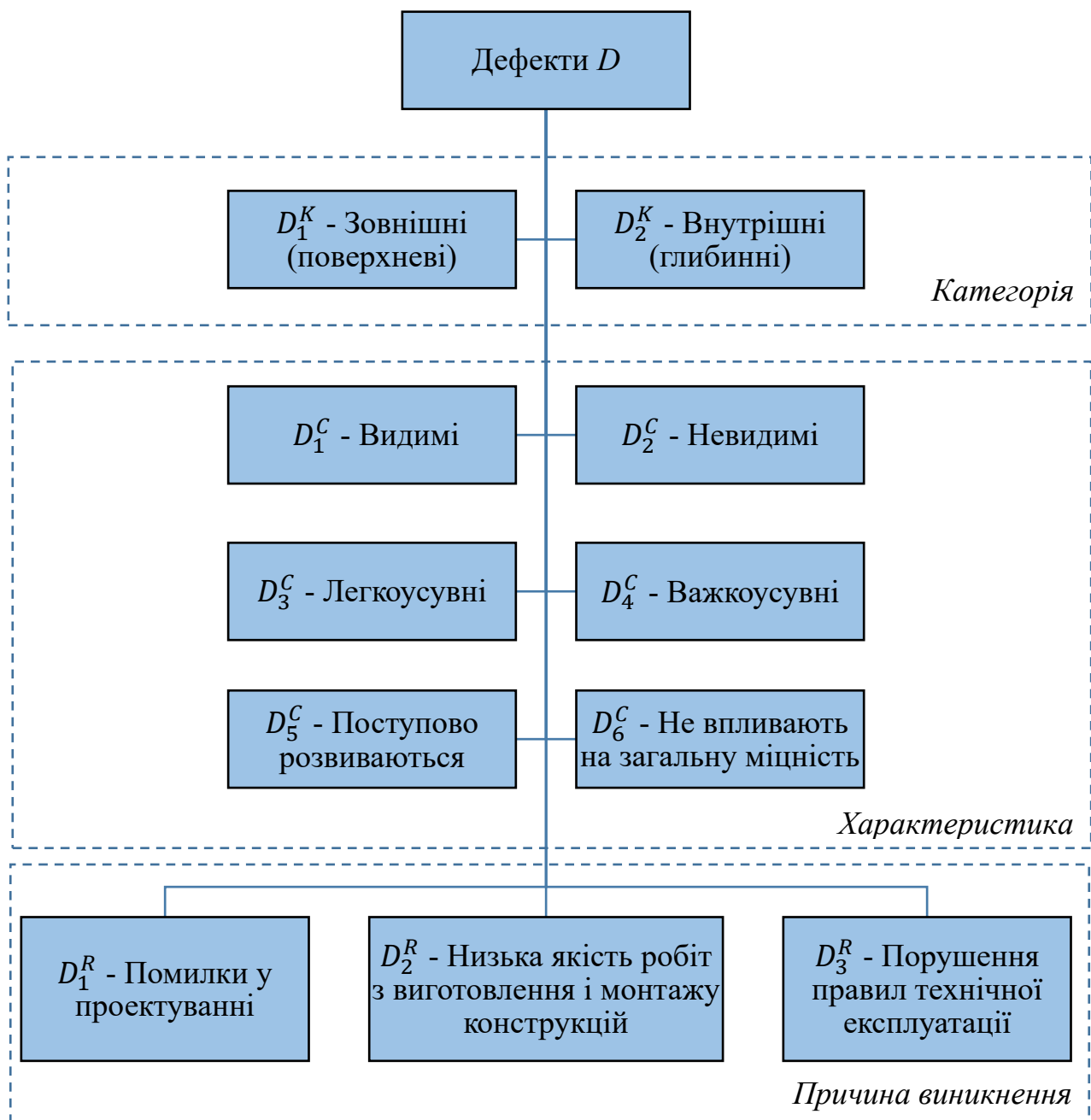


Рис. 4.5. Загальна класифікація дефектів

Кожен дефект характеризується причинами виникнення, розмірами, обсягом ушкоджень і симптомами можливого розвитку. На основі аналізу результатів обстежень різних типів конструкцій [56, 64, 66, 100, 196, 197, 199], а також власних досліджень, було узагальнено типологію дефектів будівельних конструкцій. Рисунок 4.5 подає загальну класифікацію дефектів елементів конструкцій за причинами їх виникнення, категоріями прояву та

експлуатаційними характеристиками. У класифікації враховано основні функціональні групи причин виникнення дефектів (проектні помилки, порушення технології виготовлення та монтажу, недотримання правил експлуатації), які зумовлюють формування внутрішніх або зовнішніх дефектів конструкцій. Дефекти поділяються також за характером прояву: видимі чи приховані, такі, що впливають або не впливають на несучу здатність та загальну експлуатаційну придатність.

Таблиця 4.1

Загальна класифікація функцій дефектів D_i^R каркасів будівель за причинами виникнення з прикладами

Група функцій, пов'язана з причиною виникнення дефекту	Зовнішні дефекти	Внутрішні дефекти
D_1^R - Помилки у проектуванні	• Невідповідність геометрії конструкції: кривизна, дефекти поверхні, неправильне армування • Недостатнє передбачення умов навантаження, що призводить до тріщин та порушень рівності • Руйнування при відсутності температурно-усадочних швів	• Неадекватний розподіл навантаження в межах конструкції, що веде до внутрішніх тріщин • Недостатнє або неправильне армування бетону, що може спричинити відшарування та порушення зчеплення арматури з бетоном
D_2^R - Низька якість виготовлення і монтажу конструкцій	• Нерівності на поверхні бетону або металу (як наслідок неправильного укладання) • Відколи, тріщини, пустоти на поверхні бетону • Сліди корозії, зношення через неправильний догляд під час монтажу	• Погане ущільнення бетонної суміші, пори, порожнини всередині бетонних елементів • Внутрішні тріщини від зусиль, що виникають при неправильному монтажу або деформації конструкцій
D_3^R - Порушення правил технічної експлуатації	• Поверхневі ушкодження (тріщини, деформації, зношення) через неправильне навантаження або вібраційне вплив	• Глибинні тріщини або корозія всередині конструкцій (наприклад, внаслідок агресивних середовищ) • Погіршення якості матеріалів через неправильну експлуатацію

Аналіз видів дефектів і причин їх виникнення дозволяє розглядати дефекти не лише як наслідок порушень, а як індикатори дії певних техніко-технологічних,

організаційних, експлуатаційних та середовищних факторів. Це створює підґрунтя для подальшої ідентифікації та відбору факторів, що безпосередньо впливають на якість підсилення каркасних будівель і використовуються при формуванні узагальненої системи факторів у наступних підрозділах.

Таблиця 4.1 деталізує класифікацію, розподіляючи дефекти на підгрупи функцій, що належать до кожної з головних причин виникнення D_i^R . Такий підхід дозволяє системно пов'язати технічні помилки або недоліки на різних етапах життєвого циклу конструкції з типом пошкоджень і ризиком втрати її цілісності або функціональності [286].

Аналіз інформації щодо дефектів будівельних конструкцій представлено групою функцій, де кожен елемент описує окремий тип дефекту D_i :

$$D_i = f(D_i^K, D_i^C; D_i^R) \quad (4.1)$$

4.2. Аналіз і класифікація пошкоджень будівельних конструкцій

Пошкодження будівельних конструкцій є більш широким поняттям, яке охоплює не лише дефекти, які характеризують початковий стан конструкції, а й наслідки їх розвитку протягом експлуатації під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів. Їх наявність і характер залежать від тривалості використання споруди, а також від інтенсивності і типу зовнішніх впливів, що діють на конструкцію у часі. Основними чинниками, які визначають темпи розвитку ушкоджень, є механічні навантаження, кліматичні умови, хімічні та біологічні впливи, а також впливи, пов'язані з техногенними процесами. У випадках катастроф або вибухів, зокрема в умовах воєнних дій в Україні, руйнується не лише окремі елементи, а й цілий каркас. Найбільш показовими пошкодженнями конструкцій є тріщини, деформації, осідання, перекося і зсуви окремих елементів. Вони призводять до зниження міцності, втрати несучої здатності та стійкості споруди.

У залізобетонних каркасах тріщини найчастіше зумовлені недоліками армування, недостатньою просторовою жорсткістю, усадковими явищами або

корозією арматури через порушення захисного шару. Вони можуть виникати також через нерівномірні осідання фундаментів або перевантаження окремих елементів. Деформації залізобетонних конструкцій проявляються у вигляді прогинів, перекосів рам і колон, викликаних механічними навантаженнями, температурними коливаннями або зволоженням основи.

Металеві каркаси схильні до інших типів пошкоджень — корозії (атмосферної, контактної або піднапруженої), втомних тріщин і локальних пластичних деформацій. Корозія зменшує переріз елементів, що призводить до втрати їх несучої здатності. Втома металу, викликана циклічними навантаженнями чи вібраціями, сприяє утворенню мікротріщин, які з часом переходять у небезпечні руйнування. Локальні деформації можуть виникати через перевантаження, неякісні зварні з'єднання або ослаблення вузлів стиків.

Пошкодження каркасних конструкцій мають накопичувальний характер і їх розвиток залежить від тривалості експлуатації, рівня навантажень, кліматичних умов, агресивного середовища, а також техногенних впливів, таких як вібрація чи перепади температури. Особливо небезпечні комбіновані впливи — наприклад, одночасна дія вологи і механічних навантажень на корозійно вразливі зони металоконструкцій або температурні деформації залізобетону на фоні зниженої міцності арматури.

Пошкодженнями бетонних і залізобетонних каркасних конструкцій є тріщини та деформації, спричинені силовими впливами (статичними і динамічними); корозійні ушкодження бетону, арматури та закладних деталей; ушкодження внаслідок попереминого зволоження, заморожування і відтавання; температурні деформації при невідповідності відстаней між температурно-усадочними швами умовам експлуатації; тріщини в елементах каркаса та огорожувальних конструкціях через нерівномірне осідання фундаментів (зокрема на підроблюваних територіях); а також механічні ушкодження, зокрема від вогню [66; 196].

Залежно від природи зовнішніх впливів пошкодження металевих конструкцій класифікуються наступним чином [196]. До силових (механічних)

пошкоджень належать розриви, тріщини, втрата стійкості, викривлення, місцеві прогини, розлад з'єднань та абразивне зношування. Температурні пошкодження включають жолоблення і руйнування елементів за високих температур, тріщини при низьких температурах, ушкодження захисних покриттів під час нагрівання. Хімічні й електрохімічні ушкодження проявляються у вигляді корозії металу і руйнування захисних покриттів.

Пошкодження від силових впливів виникають через невідповідність розрахункових передумов фактичним умовам експлуатації конструкцій. Основними причинами є: проєктні помилки у визначенні навантажень і доборі перетинів; розбіжності між фактичним і розрахунковим напруженим станом; знижені міцнісні характеристики металу; дефекти, що спричиняють концентрацію напруг і крихке руйнування від втоми; довільні зміни конструктивних параметрів під час виготовлення і монтажу; перевантаження конструкцій у процесі експлуатації; порушення при монтажі, які призводять до появи додаткових навантажень; а також недотримання правил технічної експлуатації — удари вантажів, підвішування блоків, вирізання отворів чи видалення зв'язкових елементів. Часто пошкодження від силових впливів пов'язані з невдалими конструктивними рішеннями вузлів. Значні пошкодження виникають і при порушенні правил експлуатації будівель і споруд.

Найбільш схильними до температурних впливів є елементи, розташовані поблизу джерел тепла. У гарячих цехах значні температурні переміщення призводять до відхилення конструкцій від проєктного положення. За наявності зв'язків, що перешкоджають вільним переміщенням, виникають додаткові циклічні напруги, які можуть спричинити викривлення елементів або тріщини. Під час нагрівання сталевих конструкцій до 100 °C руйнується захисне покриття, при 300–400 °C відбувається жолоблення, особливо тонкостінних елементів. Аварійні ситуації можуть спричинити протікання розплавленого металу, жолоблення та перевитрати елементів перекриттів і колон. Пошкодження від дії низьких температур характерні для відкритих споруд і неопалюваних будівель.

Вони проявляються у вигляді крихких тріщин у місцях концентрації напруг — у зварних швах, зонах різкої зміни перетинів, фасонках ферм.

Ушкодження від дії агресивних середовищ проявляються руйнуванням захисних покриттів і корозією металу. Дефекти протикорозійного захисту мають вигляд лущення, відшаровування, пор, тріщин та інших порушень цілісності покриття. Метал піддається хімічній і електрохімічній корозії. Для сталевих конструкцій виробничих будівель типовою є електрохімічна корозія. Корозійні ушкодження поділяють на загальні (рівномірні або нерівномірні по площі) і місцеві — у вигляді пітингів, виразок, наскрізних уражень. Місцеві ураження виникають за локальних впливів, наприклад, через протікання покрівлі або порушення герметичності трубопроводів.

Загальна поверхнева корозія призводить до зменшення площі поперечного перерізу елементів і підвищення рівня напруг (рис. 4.6), а місцева корозія не тільки послаблює перетин (рис. 4.7), але й сприяє концентрації напруг, що може призвести до руйнування конструкцій. Своєчасне виявлення пошкоджень шляхом систематичних обстежень і технічного нагляду елементів каркасу забезпечує раннє виявлення дефектів, дозволяє запобігти їх прогресуванню та уникнути аварійних ситуацій.

На основі результатів обстежень різних типів конструкцій [56, 64, 66, 93, 100, 196, 197, 199], а також власних досліджень, було проаналізовано пошкодження каркасних будівельних конструкцій. Загальна класифікація пошкоджень за типами впливів (силові, температурні, хімічні, вибухові) є однаковою для залізобетонних і металевих конструкцій (рис.4.8) [286]. Проте характер пошкоджень і механізми їх виникнення суттєво відрізняються залежно від матеріалу каркасу (табл. 4.2) та розбиті в групи функцій, пов'язані з категорією пошкодження та відповідні підгрупи.

Аналіз інформації щодо пошкоджень будівельних конструкцій представлено множиною

$$P_i = (P_1, P_2, \dots P_i) \quad (4.2)$$



Рис. 4.6. Загальна поверхнева корозія металоконструкцій цеху з виробництва титанового порошку на АТЗТ «Титан» у м. Армянськ [56]



Рис. 4.7. Руйнування захисного шару бетону, оголення й корозія робочої арматури із втратою перетину до 30% балки перекриття в результаті тривалого впливу вологи. ВАТ ДМПЗ, м. Донецьк [56]



Рис. 4.8. Загальна класифікація пошкоджень за типами впливів

Таблиця 4.2

Загальна класифікація пошкоджень P_i каркасів будівель за типами впливів

Група функцій пов'язана з категорією пошкодження	Підгрупа функцій для залізобетонних конструкцій $P_{зб}$	Підгрупа функцій для металевих конструкцій P_m
Пошкодження силові (механічні) P_1	Тріщини від перевантажень і нерівномірного осідання фундаментів $P_{зб11}$	Розриви $P_{м11}$
	Деформації від вібрацій, монтажних помилок, ударів $P_{зб12}$	Тріщини, ширина розкриття $\delta=0.1-5$ мм $P_{м12}$
	Осідання, перекося, зсуви елементів $P_{зб13}$	Втрата стійкості $P_{м13}$
	Пошкодження від демонтажу перегородок, прорізів у стінах $P_{зб13}$	Місцеві прогини $P_{м14}$
	Відшарування бетону від арматури (при корозії) $P_{зб14}$	Підвищені розтягуючі напруження $P_{м15}$
	Втрата несучої здатності через розриви арматури $P_{зб15}$	Розлад з'єднань $P_{м16}$
		Викривлення $P_{м17}$
Пошкодження температурні P_2		Абразивне зношування $P_{м18}$
	Тріщини від температурних деформацій (усадка, розширення, заморожування-відтавання) $P_{зб21}$	Жолоблення $P_{м21}$
	Пошкодження від попереминого зволоження, заморожування-відтавання $P_{зб22}$	Руйнування елементів за високих температур $P_{м22}$
	Тріщини або руйнування при відсутності температурно-усадочних швів $P_{зб23}$	Тріщини за мінусових температур $P_{м23}$
Пошкодження хімічні й електрохімічні P_3	Відшарування бетону $P_{зб24}$	Додаткові напруження від температурних деформацій $P_{м24}$
	Корозія арматури $P_{зб31}$	Загальна і місцева корозія металу $P_{м31}$
	Руйнування бетону від агресивних середовищ (хімія, солі) $P_{зб32}$	Руйнування захисних покриттів $P_{м32}$ (лущення, тріщини)
Вибухові P_4	Руйнування від циклів зволоження-висушування $P_{зб33}$	Електрохімічна корозія (особливо у виробничих будівлях) $P_{м33}$
	Раптові тріщини і руйнування елементів каркасу $P_{зб41}$	Розриви, втрата стійкості, викривлення елементів $P_{м41}$
	Часткові або повні обвалення каркасу (внаслідок вибуху) $P_{зб42}$	Руйнування з'єднань $P_{м42}$
	Руйнування з'єднань $P_{зб43}$	Обвалення каркасу або окремих вузлів $P_{м43}$
	Втрата стійкості каркасу після вибуху (раптове або прогресуюче) $P_{зб44}$	Нерівномірного деформування каркасу від осідання і зсуву фундаментів та основ, перекося $P_{м44}$

де кожен елемент описує окремий тип пошкодження P_i , зафіксований під час обстеження. Для кожної групи функцій $P_1, P_2, \dots, P_i$ виділено підгрупи головних функцій P_{ij} , які пов'язані з функцією головних категорій пошкоджень. Такий підхід дозволяє формалізувати процес діагностики стану конструкцій і забезпечити систематизацію отриманої інформації для подальшої оцінки технічного стану, прогнозування залишкового ресурсу та прийняття рішень щодо підсилення або ремонту.

Далі, на прикладі металевих каркасів, систематизовано і класифіковано основні характерні види дефектів та пошкоджень конструкцій каркасів залежно від типу конструктивного елементу. Така класифікація дозволяє деталізувати особливості прояву ушкоджень у різних частинах каркасу (балки, колони, ферми, з'єднувальні вузли тощо) та враховувати специфіку їхніх напружено-деформованих станів і експлуатаційних умов. Це, своєю чергою, забезпечує більш точну діагностику технічного стану, підвищує ефективність планування ремонтно-відновлювальних заходів і дозволяє обґрунтувати вибір оптимальних методів підсилення або заміни пошкоджених елементів.

К1 - Конструкції покриття. Аналіз стану конструкцій покриттів промислових будівель показав, що ферми з елементами з парних куточків є чутливими до механічних, температурних і корозійних впливів, а також до дефектів виготовлення та монтажу. Найпоширеніші дефекти включають викривлення стиснених елементів, зменшення перетинів, нерівномірність зварних швів, порушення геометрії вузлів та пропуск сполучних прокладок. Крім того, недоліки монтажу, як-от відхилення ферм від вертикалі, позавузлове обпирання прогонів, а також недостатнє кріплення до колон, створюють додаткові напруження, що знижують надійність і довговічність конструкцій.

Основними видами пошкоджень ферм під час експлуатації є викривлення, місцеві прогини елементів і ослаблення перетинів (рис. 4.9), що часто виникають через початкові дефекти виготовлення або монтажу. Причинами таких ушкоджень є перевантаження конструкцій, порушення правил експлуатації (наприклад, підвішування блоків або кріплення комунікацій), а також

невідповідність розрахункової схеми реальним умовам роботи. Додаткові ушкодження можуть спричиняти температурні впливи (пожежі в гарячих цехах) або накопичення пилю, снігових відкладень і надмірної ваги покрівельних матеріалів. Особливо небезпечні пропуски розпірок, перевантаження нижніх поясів і відсутність зв'язків, що підвищують ризик втрати стійкості елементів.

Основними ушкодженнями ферм через значні снігові навантаження є викривлення, місцеві прогини елементів і ослаблення перетинів, що можуть призводити до втрати стійкості або обвалення конструкцій (рис. 4.10-4.12). Перевантаження покриттів від снігових мішків, пилю чи надмірної ваги матеріалів спричиняє залишкові прогини прогонів і зниження просторової жорсткості каркаса, особливо за недостатнього кріплення або видалення зв'язків. Корозійні ураження (рис. 4.13), зумовлені протіканням покрівлі, агресивним середовищем чи накопиченням вологи, найчастіше виникають у вузлах кріплення та в місцях обпирання ферм. Особливо небезпечними є дефекти монтажу, такі як недостатня площа обпирання плит покриття та відсутність приварювання панелей, що збільшують ризик аварійних ситуацій.

У таблиці 4.3 наведено класифікацію характерних дефектів і пошкоджень конструкцій покриття, які можуть впливати на вибір способів їх підсилення [196]. Значна площа поверхні решітчастих конструкцій та обмежений доступ до окремих елементів, особливо до верхніх поясів ферм, ускладнюють якісну підготовку поверхні та нанесення захисних покриттів під час експлуатації. Унаслідок цього вже через два-три роки після повторного фарбування захисні покриття руйнуються, що призводить до прискорення корозійних процесів.

К2 - Колони, вертикальні зв'язки. Колони виробничих будинків працюють у сприятливіших умовах, ніж інші елементи каркаса, завдяки потужним перетинам і слабкому впливу динамічних навантажень.



Рис. 4.9. Прогини окремих елементів решітки у площині ферми досягають 150 мм. Цех № 24 ВАТ «Донецькгірмаш» [56]



Рис. 4.10. Вигин до 400 мм із площини нижнього пояса ферми.
ВАТ «Донецькгірмаш» [56]

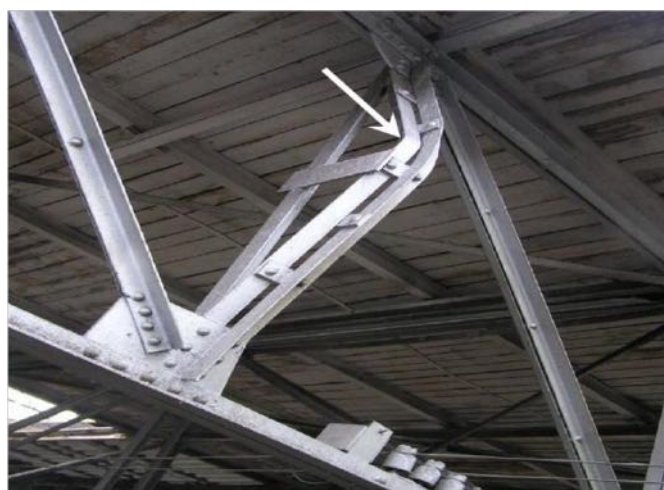


Рис. 4.11. Стійки ферми, перевантажені снігом, підсилені додатковим елементом. Цех № 24 ВАТ «Донецькгірмаш» [56]

Таблиця 4.3

Характерні види дефектів й ушкоджень конструкцій покриття К1

Тип конструктивного елемента	Категорія	Шифр	Вид дефекту або пошкодження
Кроквяні й підкроквяні металеві ферми (КФ)	Дефекти	КФ-D1	Вирізи в елементах, відсутність сполучних прокладок
		КФ-D2	Початкові викривлення і місцеві прогини, що виникають під час виготовлення і монтажу
		КФ-D3	Порушення правил технічної експлуатації (підвішування обладнання, комунікацій тощо)
		КФ-D4	Невідповідність фактичної розрахункової схеми (жорсткість вузлів, позавузлове обпирання, пропуск зв'язків)
	Пошкодження	КФ-P1	Тріщини в елементі, фасонці або у шві кріплення
		КФ-P2	Прогини ферми у вертикальній площині
		КФ-P3	Викривлення стиснених або розтягнутих елементів у площині або із площини ферми
		КФ-P4	Місцевий вигин або вм'ятини елемента чи фасонки
		КФ-P5	Ослаблення або відсутність болтів в опорних вузлах
		КФ-P6	Відхилення ферми від вертикальної площини
		КФ-P7	Температурні пошкодження (вплив пожеж або високих температур)
		КФ-P8	Зсув опорного вузла ферми щодо осі колони
Прогони (П)	Дефекти	П-D1	Позавузлове обпирання прогонів
		П-D2	Ослаблення або відсутність болтів кріплення
	Пошкодження	П-P1	Прогини у вертикальній площині
		П-P2	Місцеві прогини елементів
		П-P3	Скривлення у площині схилу
Зв'язки (З)	Дефекти	З-D1	Вирізи в елементах
		З-D2	Відсутність елементів
	Пошкодження	З-P1	Викривлення елементів у площині або із площини
		З-P2	Місцеві вигини
		З-P3	Ослаблення або відсутність болтів у вузлах кріплення
		З-P4	Кріплення елементів зв'язків поза вузлом ферм



Рис. 4.12. Втрата стійкості опорного розкосу в результаті перевантаження покриття снігом. ВАТ «Донецькгірмаш» [56]

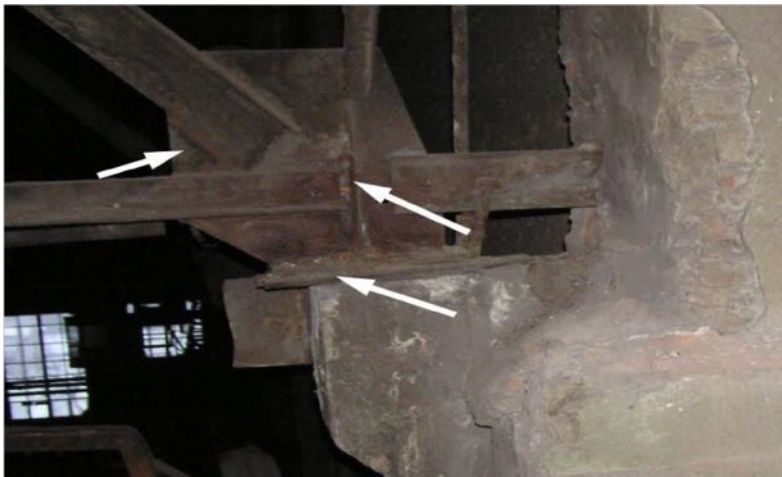


Рис. 4.13. Інтенсивні місцеві корозійні ураження в опорному вузлі кроквяної ферми ковальського цеху. ВАТ «Донецькгірмаш» [56]

Основними дефектами є відхилення від проектного положення, викривлення колон, слабке затягування анкерних болтів, що викликає додаткові моменти та ризик втрати стійкості. Ушкодження під час експлуатації найчастіше спричинені ударами від вантажів, вирізами у стінках для комунікацій без підсилення, а також осіданнями фундаментів у будівлях на просадних ґрунтах. У гарячих цехах підвищені температури викликають значні деформації в нижніх частинах колон, а корозія посилюється у місцях контакту з ґрунтом, пилом або технічними рідинами. Найбільш уразливими є тонкостінні елементи, ребра жорсткості, діафрагми та вузли кріплення вертикальних зв'язків, особливо

розташовані нижче рівня підлоги. Корозійні ушкодження посилюються в зонах зволоження або несправної гідроізоляції, що потребує додаткового захисту баз колон і вузлів кріплення.

Найхарактерніші види дефектів та ушкоджень конструкцій колон і вертикальних зв'язків узагальнено та класифіковано в табл. 4.4 [56, 196].

Таблиця 4.4

Дефекти й ушкодження конструкцій колон і вертикальних зв'язків К2

Тип конструктивного елемента	Категорія	Шифр	Вид дефекту або пошкодження
Колони (К)	Дефекти	K-D1	Неповномірність та інші дефекти зварних швів
		K-D2	Вирізи в елементах
	Пошкодження	K-P1	Тріщини в елементах у місцях кріплення підкранових балок
		K-P2	Викривлення елементів решітки або полиць
		K-P3	Ослаблення анкерних болтів
		K-P4	Зсув колони від проектної осі
Вертикальні зв'язки (ВЗ)	Дефекти	K-P5	Відхилення колони від вертикальної осі
		K-P6	Місцевий вигин елементів
		V3-D1	Виріз в елементі
	Пошкодження	V3-D2	Відсутність елемента
		V3-D3	Неповномірність та інші дефекти швів
		V3-P1	Тріщини в елементі або фасонці
		V3-P2	Викривлення елемента у площині або із площини зв'язків
		V3-P3	Місцевий вигин елемента
		V3-P4	Ослаблення болтів у вузлах кріплення

ПБ - Підкранові конструкції працюють у найскладніших умовах, що значно відрізняються від роботи звичайних балкових. Основні фактори, що призводять до виникнення ушкоджень підкранових конструкцій: зосереджені навантаження, що мають динамічний характер; змінний і знакозмінний багаторазово повторюваний цикл напруг, що призводить до втоми металу.

Найхарактернішими ушкодженнями балок та зварених підкранових балок є тріщини у верхньому поясному шві, в стінці в пришовній зоні, тріщини в швах кріплення ребер жорсткості до верхнього пояса, тріщини в стінці під короткими

ребрами жорсткості, поперечні тріщини у верхньому поясі та місцеві вигини верхнього пояса і ребер жорсткості. У балках з вирізами тріщини в стінці можуть розвиватися від кінця вирізу. Місцеві прогини верхнього пояса виникають від ексцентричного прикладання навантаження або повороту пояса, а інколи — через втрату місцевої стійкості. Під час ремонту кранів домкрати, що опираються на верхні пояси балок, також можуть спричинити місцеві ушкодження. Для гальмових конструкцій характерні тріщини в швах кріплення листків або фасонки до верхнього пояса балок, а також місцеві вигини елементів, частина яких зумовлена порушеннями правил експлуатації, як-то складування вантажів на гальмових майданчиках або вирізування отворів.

У вузлах кріплення підкранових конструкцій до колон часто спостерігаються тріщини й ослаблення болтових з'єднань, ушкодження елементів кріплення, а також ослаблення болтів у місцях взаємного з'єднання балок. Ушкодження підкранових конструкцій часто залежать від стану кранових шляхів: порушення їх геометрії викликає додаткові зусилля, а нерівності шляху та зсув рейки з осі балки збільшують динамічний характер навантаження. Через потужність перетинів та відкритий профіль, що добре обдувається, загальна поверхнева корозія на підкранових конструкціях зазвичай незначна.

Характерною рисою експлуатації робочих майданчиків цехів металургійного циклу є вплив на них високих температур та динамічних рухомих навантажень від завалочних машин і поїздів.

Найбільш характерні дефекти й ушкодження конструкцій балок, підкранових балок і гальмових конструкцій наведено в табл. 4.5 [56, 196].

Запропонована класифікація характерних дефектів і пошкоджень конструкцій включає їх шифрування, категорії та опис проявів, що забезпечує систематизовану ідентифікацію технічного стану елементів каркасу. Така структуризація дозволяє уніфікувати підходи до діагностики пошкоджень для основних конструктивних елементів (кроквяних ферм, прогонів, зв'язків, колон, підкранових балок тощо) та створює інформаційну основу для подальшого формування КТР підсилення або відновлення.

Таблиця 4.5

Дефекти й ушкодження конструкцій балок, підкранових балок і гальмових
конструкцій

Тип конструктивного елемента	Категорія	Шифр	Вид дефекту або пошкодження
Підкранові балки (ПБ)	Дефекти	ПБ-D1	Недоліки обпирання та кріплення підкранових балок
		ПБ-D2	Вирізи в елементах перетину
	Пошкодження	ПБ-P1	Тріщини у верхній зоні стінки або у шві кріплення
		ПБ-P2	Прогини у вертикальній площині
		ПБ-P3	Викривлення балки у горизонтальній площині
Гальмові конструкції (ГК)	Дефекти	ПБ-P4	Неповномірність та інші дефекти швів
		ПБ-P5	Місцеві прогини верхнього пояса, стінки або ребер жорсткості
	Пошкодження	ГК-D1	Вирізи в елементах
		ГК-D2	Відсутність елементів
		ГК-P1	Тріщини в елементі або фасонці
		ГК-P2	Тріщини у шві кріплення до верхнього пояса балки
		ГК-P3	Неповномірність та інші дефекти швів
		ГК-P4	Викривлення елементів
		ГК-P5	Прогин облямовувального елемента

Аналіз інформації щодо дефектів і пошкоджень будівельних конструкцій, наведених у табл. 4.3–4.5, можна подати у формалізованому вигляді. Кожен елемент класифікації (дефект або пошкодження) характеризується типом конструктивного елемента та відповідним ідентифікаційним шифром. У загальному вигляді це можна представити як

$$E_i = f(K_i, S_i) \quad (4.3)$$

де E_i — i -й елемент класифікації (дефект або пошкодження);

K_i — тип конструктивного елемента (ферми, прогони, зв'язки, колони, підкранові балки тощо);

S_i — шифр дефекту або пошкодження відповідно до класифікації, наведеної у табл. 4.3–4.5.

Сукупність усіх дефектів і пошкоджень будівельних конструкцій можна представити множиною

$$E = \{E_1, E_2, \dots, E_i\} \quad (4.4)$$

Систематизація дефектів і пошкоджень є важливим етапом формування КТС забезпечення якості підсилення, оскільки дозволяє встановити причинно-наслідкові зв'язки між технічним станом конструкцій, вибором моделей КТР і організаційно-технологічними умовами їх реалізації. У результаті забезпечується обґрунтований вибір технологій підсилення з урахуванням вимог надійності, ефективності та сталості експлуатації каркасних будівель.

4.3. Випадки недосконалого застосування матеріалів і виробів для підсилення конструкцій

Недосконале застосування матеріалів та виробів для підсилення конструкцій, навіть найсучасніших, у більшості випадків зумовлюється людським фактором. До таких чинників належать: недостатній аналіз умов експлуатаційного середовища, помилки у розрахунках навантажень, неякісне виготовлення елементів підсилення, порушення технологій монтажу та недотримання вимог нормативних документів щодо захисту конструкцій. Для забезпечення ефективного функціонування підсиленої конструкції необхідною умовою є комплексна оцінка усіх етапів підсилення – від інженерного обґрунтування до реалізації – з урахуванням специфіки об'єкта та ретельним добром відповідних матеріалів [55, 56, 77, 201].

У сучасній практиці підсилення будівельних конструкцій застосовуються як традиційні матеріали (зокрема сталь), так і високотехнологічні інженерні рішення – зокрема, високоміцні сталі, фіброармовані полімери (FRP), а також спеціалізовані вироби для забезпечення з'єднань і анкерування. Ці матеріали широко використовуються завдяки своїм високим механічним характеристикам,

гнучкості застосування та можливості адаптації до різних умов експлуатації. Проте результати технічного нагляду та наукові дослідження свідчать, що навіть при використанні матеріалів нового покоління, типові помилки, пов'язані з порушеннями технологічних регламентів, недотриманням вимог до поверхневої підготовки, або ігноруванням впливу агресивного середовища, можуть суттєво знижувати ефективність, довговічність і надійність підсиленних конструкцій.

Нижче систематизовано найбільш поширені випадки недосконалого застосування металевих пластин, високоміцних гнучких матеріалів (FRP) і з'єднувальних елементів у процесі підсилення конструкцій. Аналіз проведено з урахуванням впливу основних факторів, відповідно $F_{1,1}^M \dots F_{k,n}^M$, $F_{1,1}^F \dots F_{k,n}^F$, $F_{1,1}^B \dots F_{k,n}^B$, що визначають технічну ефективність, надійність та довговічність підсилення [286].

Фактор F^M охоплює особливості використання металевих елементів (сталі, алюмінії), які застосовуються для підсилення конструкцій. Недоліки у виборі матеріалів, технології монтажу, захисті від корозії, втомній міцності з'єднань, врахуванні механічних навантажень і геометричних особливостей безпосередньо впливають на надійність і довговічність металевих підсилень [56, 66, 196, 197, 199].

Об'єднуючі технічні та технологічні причини помилок при підсиленні металевими елементами F^M можна систематизувати за узагальненими категоріями та представити наступними факторами:

F_1^M – низька якість матеріалів і витратних компонентів;

F_2^M – недостатній захист від впливів середовища (волога, корозія);

F_3^M – недостатній захист від вогню / температур;

F_4^M – низька якість монтажу і з'єднань;

F_5^M – неврахування механіки навантаження та напружень;

F_6^M – неврахування геометричних і конструктивних особливостей;

F_7^M – недотримання вимог до сумісності матеріалів.

F_8^M – неврахування монтажних обмежень.

З кожної групи факторів $F_{k,n}^M$ виділено підгрупи факторів (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

Фактори типових технічних помилок та наслідків при використанні
підсилювальних елементів з металу $F_{k,n}^M$

Група факторів	Підгрупа факторів	Опис типової технічна помилки	Наслідки / ризики U
F_1^M	$F_{1,1}^M$	Низькоякісна або несертифікована сталь	Зниження довговічності
	$F_{1,2}^M$	Використання неякісних електродів або зварювальних матеріалів	Зниження якості з'єднань
F_2^M	$F_{2,1}^M$	Встановлення в солоному/вологодому середовищі без належного антикорозійного захисту (грунтовок, фарб чи металізації)	Корозійне руйнування
	$F_{2,2}^M$	Недостатня герметизація стиків, без урахування проникнення вологи до межі бетон/метал	Корозія прихованих ділянок
F_3^M	$F_{3,1}^M$	Недостатній або відсутній вогнезахист	Втрата несучої здатності
	$F_{3,2}^M$	Немає компенсації температурних деформацій, ігнорування різниці коефіцієнтів температурного розширення металу і бетону	Додаткові напруження, відшарування, тріщини
	$F_{3,3}^M$	Неврахування повзучості бетону у спільній роботі з металевими елементами	Втрата контакту або локальних пошкоджень
F_4^M	$F_{4,1}^M$	Неврахування концентрації напружень у зварних швах в зонах з високим циклічним навантаженням	Місцева втома
	$F_{4,2}^M$	Неправильне зварювання та відсутність контролю за якістю зварних швів призводить до дефектів швів (неповне проплавлення, пори, шлакові включення)	Утворення втомних тріщин, втомне руйнування
F_5^M	$F_{5,1}^M$	Надмірна товщина підсилювальних сталевих пластин	Локальні напруження, тріщини в основному металі
	$F_{5,2}^M$	Жорстке закріплення підсилень без можливості деформації	Додаткові напруження під час експлуатації
	$F_{5,3}^M$	Недостатня якість контакту між металевим елементом і бетоном (відсутність анкерування або зсувних з'єднань)	Зниження або відсутність спільної роботи елементів
F_6^M	$F_{6,1}^M$	Встановлення прямих сталевих підсилень на криволінійні або складні поверхні без попереднього формування	Неповний контакт і недостатня передача зусиль
	$F_{6,2}^M$	Неправильне розташування підсилюючих пластин на тонкостінних елементах	Руйнування конструкції

Продовження таблиці 4.6

	$F_{6,3}^M$	Неправильне розташування анкеровок чи дюбелів	Розшарування бетону або локального руйнування
F_7^M	$F_{7,1}^M$	Відсутність належної підготовки бетонної поверхні (очищення, нанесення адгезивів)	Зниження зчеплення і довговічності
	$F_{7,2}^M$	Поєднання різних металів (наприклад, алюмінію зі сталлю) без діелектричних прокладок	Гальванічна корозія
F_8^M		Неврахування монтажних обмежень	Риск дефектів

Фактор F^F відображає специфіку застосування високоміцних гнучких матеріалів (FRP), для яких характерні висока вартість, складність технології монтажу, ризики відшарування, низька втомна міцність та вплив умов експлуатації (температура, вологість, агресивне середовище). У дослідженні А. Shaat і А. Fam [202] виявлено зони відшарування — всередині FRP, на межі клею і FRP, а також на межі клею та основи (рис. 4.14). Невдале підсилення балок або плит, які зазнають циклічних навантажень, може призвести до поступового розшарування або розриву FRP-композитів під дією втомних навантажень [84, 202, 203].

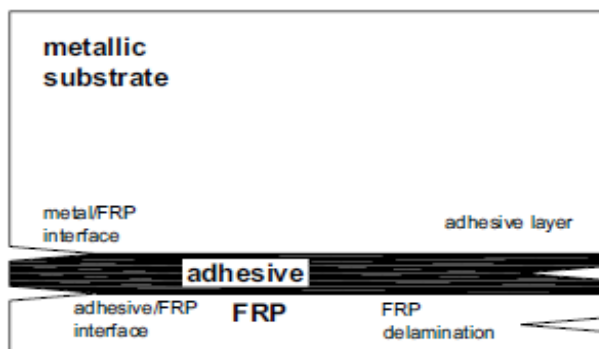


Рис. 4.14. Типи відшарування або руйнування FRP-матеріалу при підсиленні елементів каркасу будівлі

Причини помилок при підсиленні FRP-матеріалами можна систематизувати за узагальненими категоріями та представити наступними факторами [55, 77, 84, 89, 128, 201, 216, 202-204, 214, 215]:

F_1^F — низька якість матеріалів і витратних компонентів;

F_2^F – неправильна підготовка або умови монтажу;

F_3^F – порушення відповідності матеріалу геометрії конструкції;

F_4^F – недостатній захист і профілактика при експлуатаційних впливах.

З кожної групи факторів $F_{k,n}^F$ виділено підгрупи факторів (табл. 4.7).

Таблиця 4.7

Фактори типових технічних помилок та наслідків при використанні
підсилювальних елементів з FRP $F_{k,n}^F$

Група факторів	Підгрупа факторів	Опис типової технічна помилки	Наслідки / ризики U
F_1^F	$F_{1,1}^F$	Несертифіковані FRP або дешеві клеї	Втрата ефективності зчеплення
	$F_{1,2}^F$	Відсутність контролю товщини клею	Відшарування
F_2^F	$F_{2,1}^F$	Наклеювання на вологу/запилену поверхню	Відшарування
	$F_{2,2}^F$	Монтаж при низькій температурі/високій вологості	Низька адгезія
F_3^F	$F_{3,1}^F$	Надмірна товщина FRP без адаптації	Концентрація напружень, розрив
	$F_{3,2}^F$	Плоскі FRP на криволінійні поверхні	Втрата зчеплення
F_4^F	$F_{4,1}^F$	Немає вогнезахисту	Втрата міцності при пожежі
	$F_{4,2}^F$	Нанесення FRP на бетон з карбонізацією	Втрата адгезії, деградація
	$F_{4,3}^F$	Відсутній захист в агресивному середовищі	Прискорене руйнування
	$F_{4,4}^F$	Неврахування втомної поведінки	Поступове розшарування

Фактор F^B охоплює недоліки використання готових з'єднувальних виробів — анкерів, болтів, металевих пластин — з урахуванням підготовки основи, захисту від корозії, монтажу, експлуатаційних умов і впливу геометрії конструкції.

Типові технічні помилки при використанні готових з'єднувальних виробів при підсиленні конструкцій можна систематизувати за узагальненими категоріями та представити наступними факторами [93, 204, 209, 211-213]:

F_1^B – недотримання технології монтажу;

F_2^B – недостатній захист від впливу середовища (корозія, волога);

F_3^B – неврахування геометричних та конструктивних особливостей;

З кожної групи факторів $F_{k,n}^B$ виділено підгрупи факторів (табл. 4.8).

Таблиця 4.8

Фактори типових технічних помилок та наслідків при використанні готових з'єднуючих виробів $F_{k,n}^B$

Група факторів	Підгрупа факторів	Опис типової технічна помилки	Наслідки / ризики U
F_1^B	$F_{1,1}^B$	Монтаж анкерів без очищення / знежирення	Втрата зчеплення
	$F_{1,2}^B$	Встановлення на вологу поверхню	Ослаблення або зрив з'єднання виробів
	$F_{1,3}^B$	Неякісні або несумісні клеї	Погана адгезія
	$F_{1,4}^B$	Болти без натягу / неправильне затягування	Послаблення з'єднання
	$F_{1,5}^B$	Повторне використання болтів	Ризик втомного руйнування
	$F_{1,5}^B$	Зварювання без контролю	Місце утворення тріщин
F_2^B	$F_{2,1}^B$	Контакт різномірних металів без ізоляції	Гальванічна корозія
	$F_{2,2}^B$	Відсутність герметизації стиків	Проникнення вологи, корозія
F_3^F	$F_{3,1}^B$	Встановлення на тонкі елементи без перевірки	Продавлювання, деформації
	$F_{3,2}^B$	Встановлення на криволінійні поверхні без формування	Неповний контакт
	$F_{3,3}^B$	Встановлення без врахування арматури	Ослаблення конструкції

Типовий наслідок (ризик) у вигляді функціонально-структурної моделі підсилення елементу конструкції можна представити функцією [286]:

$$U_i = f(F_{1,1}^M \dots F_{k,n}^M; F_{1,1}^F \dots F_{k,n}^F; F_{1,1}^B \dots F_{k,n}^B | D_i^R; D_i^K, D_i^C; P_i) \quad (4.5)$$

де:

- U_i — типовий ризик/наслідок (наприклад, відшарування, корозія, втрата несучої здатності),
- $F_{k,n}^M$ — типові технічні помилки / фактори для металу,
- $F_{k,n}^F$ — типові технічні помилки / фактори для FRP,

- $F_{k,n}^B$ — типові технічні помилки / фактори для готових з'єднуючих виробів,
- D_i — функціональна група, пов'язана з причиною виникнення дефекту,
- D_i^K — Категорія дефекту (внутрішній чи зовнішній),
- D_i^C — Характеристика (наприклад, видимі чи невидимі, розвиваються або не впливають на загальну міцність),
- P_i — тип пошкодження (наприклад, P_1 — механічне).

Залежність ефективності підсилення конструкцій каркасу будівлі від зазначених факторів накопичення або ймовірності ризиків можна умовно описати множиною:

$$R = G(U_1, U_2, \dots, U_n) \quad (4.6)$$

де R — загальна ефективність, U_n — типовий ризик/наслідок.

Ця функція показує, як різні фактори взаємодіють і впливають на ефективність використання матеріалів для підсилення конструкцій. Оптимізація цих параметрів дозволить забезпечити найкращу якість та стійкість підсилення конструкцій і тривалі терміни експлуатації.

4.4. Ефективність підсилення конструкцій гнучкими високоміцними матеріалами

У сучасних умовах зношеності будівельного фонду, обмежень територіального розвитку міст та зростання вимог до енергоефективності і сталості будівництва, реконструкція каркасних будівель розглядається як пріоритетний напрям інженерної діяльності [29, 30]. Підвищення експлуатаційної надійності таких об'єктів шляхом підсилення несучих конструкцій, як правило, є більш раціональним рішенням порівняно з повною заміною або новим будівництвом.

Разом із тим, аналіз наявних наукових і нормативних джерел свідчить, що ефективність підсилення конструкцій, зокрема із застосуванням гнучких високоміцних композитних матеріалів (FRP), у більшості випадків оцінюється фрагментарно — переважно з позицій механічної міцності або довговічності. При цьому недостатньо враховуються організаційно-технологічні умови виконання робіт, параметри робочих місць, трудомісткість, тривалість монтажу, а також їх вплив на якість реалізації конструктивно-технологічних рішень у реальних умовах реконструкції.

Відсутність комплексного підходу до оцінювання ефективності застосування FRP у складі конструктивно-технологічних рішень призводить до того, що вибір таких методів підсилення значною мірою базується на емпіричних міркуваннях або окремих показниках, без урахування системних взаємозв'язків між умовами середовища, технологією монтажу та досягненням цільових результатів реконструкції.

У зв'язку з цим у даній роботі ефективність підсилення конструкцій гнучкими високоміцними матеріалами розглядається як складова розроблюваної конструктивно-технологічної системи (КТС), у межах якої враховуються не лише фізико-механічні властивості FRP, але й організаційно-технологічні параметри виконання робіт, показники трудомісткості, тривалості, якості підсилення та критерії сталості протягом життєвого циклу конструкції.

Одним із найбільш перспективних напрямів підсилення каркасних конструкцій у межах реконструкції є застосування волоконно-армованих полімерів (FRP), які поєднують високі механічні характеристики з малою власною вагою та корозійною стійкістю [55, 77, 201]. Такі матеріали забезпечують можливість підвищення несучої здатності конструкцій без збільшення навантаження на існуючі елементи, що є критично важливим для будівель зі зниженою несучою здатністю або обмеженими резервами міцності.

Композитні матеріали на основі полімерної матриці, армованої скловолокном, вуглецевим або арамідним волокном, характеризуються стабільністю фізико-механічних властивостей, стійкістю до дії агресивних

середовищ та відсутністю схильності до корозійного руйнування. Це дозволяє розглядати FRP як ефективну альтернативу традиційним металевим елементам підсилення, особливо в умовах підвищеної вологості, хімічної агресивності або обмеженого доступу до конструкцій.

Важливою перевагою підсилення за допомогою FRP є можливість мінімального втручання в існуючу конструктивну та архітектурну схему будівлі. Тонкошарові композитні системи практично не змінюють геометрію перерізів і не потребують значного додаткового простору, що дозволяє застосовувати їх у реконструкції будівель із жорсткими просторовими обмеженнями, зокрема в умовах щільної міської забудови або при збереженні архітектурної автентичності об'єктів.

Разом із тим ефективність використання FRP значною мірою залежить від технологічних умов реалізації конструктивно-технологічних рішень. Порушення вимог до підготовки поверхні, вибору адгезивних матеріалів, режимів твердіння або умов монтажу може призводити до зниження фактичної несучої здатності та довговічності підсилених елементів. У зв'язку з цим застосування композитних систем потребує чіткої регламентації технологічних процесів та контролю якості на всіх етапах виконання робіт.

З організаційно-технологічної точки зору використання FRP дозволяє скоротити тривалість ремонтно-відновлювальних робіт, зменшити трудомісткість монтажу та мінімізувати потребу в застосуванні важкої будівельної техніки. Це особливо актуально для об'єктів промислового та громадського призначення, де зупинка основних виробничих або експлуатаційних процесів є небажаною або економічно невиправданою.

З екологічної позиції застосування FRP сприяє зниженню сукупного впливу реконструкційних заходів на довкілля [55, 98]. Виробництво та експлуатація композитних матеріалів, зокрема отриманих методом пултрузії, характеризуються нижчими енергетичними витратами порівняно з металургійними процесами, а відсутність потреби в антикорозійному захисті додатково зменшує використання хімічно активних речовин. Окремі типи FRP

можуть виготовлятися з використанням вторинної сировини, що відповідає сучасним принципам сталого розвитку та циркулярної економіки [30].

У сучасних міжнародних проєктах реконструкції дедалі більшого значення набувають вимоги щодо скорочення як капітальних (CapEx), так і експлуатаційних витрат (OpEx), що відповідає концепції оцінювання ефективності за повним життєвим циклом конструкцій та критерію RE_s . Традиційні рішення з підсилення каркасів сталевими елементами на етапі впровадження можуть сприйматись як економічно привабливі, однак значна власна вага сталі, необхідність антикорозійного захисту та подальшого технічного обслуговування зумовлюють зростання сукупних витрат протягом експлуатації [98].

Натомість застосування волоконно-армованих полімерів для підсилення несучих елементів характеризується істотним зменшенням маси підсилювальних систем, зниженням трудомісткості монтажу та мінімальними витратами на обслуговування. Сукупність цих факторів створює передумови для потенційного зниження як CapEx, так і OpEx порівняно з традиційними металевими рішеннями. Водночас реалізація таких переваг у конкретних умовах реконструкції потребує кількісного обґрунтування та врахування організаційно-технологічних, конструктивних і експлуатаційних чинників [55].

Ефективність підсилення конструкцій гнучкими високоміцними матеріалами значною мірою визначається дотриманням технологічних, експлуатаційних і нормативних вимог, регламентованих чинними національними та міжнародними документами. Основні підходи до розрахунку та проєктування підсилення елементів наведено в роботах і нормативних рекомендаціях [89, 94, 128, 133, 204-205]. Зокрема, підсилення залізобетонних конструкцій фіброармованими полімерними матеріалами (FRP) здійснюється відповідно до положень Американського інституту бетону (ACI) [94], а металевих конструкцій — згідно з рекомендаціями Національної дослідницької ради Італії (CNR-DT 202/2005) [204], які визначають основні вимоги до розрахунку, проєктування та контролю якості виконання робіт.

Разом із тим, незважаючи на наявність нормативної бази та значний обсяг досліджень у сфері підсилення конструкцій із використанням фіброармованих полімерних матеріалів, чинні рекомендації переважно орієнтовані на перевірку несучої здатності та граничних станів окремих елементів і не забезпечують комплексного врахування організаційно-технологічних, економічних та експлуатаційних чинників реконструкції. Зокрема, у наявних нормах і методиках відсутній формалізований підхід до порівняльної оцінки альтернативних конструктивно-технологічних рішень із урахуванням трудомісткості, тривалості виконання робіт, впливу на CAPEX і OPEX, просторових обмежень та критеріїв якості протягом життєвого циклу. Це зумовлює необхідність розроблення інтегрованої КТС, яка поєднує нормативні вимоги з кількісними показниками ефективності та дозволяє обґрунтовано оцінювати доцільність застосування FRP-підсилення в умовах реальних проєктів реконструкції.

У зв'язку з цим у даному розділі ефективність підсилення конструкцій гнучкими високоміцними матеріалами розглядається не лише з позицій підвищення несучої здатності, але й у контексті розроблюваної КТС, яка інтегрує технічні, організаційно-технологічні, економічні та експлуатаційні показники. Такий підхід дозволяє сформулювати обґрунтовані критерії порівняльної доцільності застосування FRP у складі конструктивно-технологічних рішень для підсилення каркасних будівель.

У сучасних умовах оцінювання ефективності підсилення конструкцій дедалі частіше здійснюється з позицій повної вартості життєвого циклу, з урахуванням як капітальних, так і експлуатаційних витрат (CAPEX/OPEX). Зменшення CAPEX досягається за рахунок малої маси підсилювальних елементів, скорочення обсягу монтажних робіт, зменшення потреби в робочій силі та відсутності необхідності у складних допоміжних конструкціях і антикорозійному захисті. Зниження OPEX забезпечується відсутністю корозійних ушкоджень, спрощенням обслуговування, зменшенням ризиків пошкодження суміжних елементів та зниженням витрат на ремонти протягом життєвого циклу.

У випадку металевих конструкцій ефективно застосування FRP передбачає належну підготовку поверхні в зоні підсилення, нанесення фіброармованих систем (ФАС) у кілька шарів на епоксидному клеї, забезпечення сумісності матеріалів з навколишнім середовищем (температура, вологість, УФ-випромінювання), а також запобігання виникненню гальванічних струмів. Надзвичайно важливим є також правильний вибір адгезиву, сумісного з металевою основою, що безпосередньо впливає на довговічність та надійність підсилювальної системи [204].

До основних цілей підсилення належать: збільшення або відновлення межі міцності на розтяг та згин, покращення втомної витривалості, а також — у перспективі — підвищення несучої здатності тонких елементів, що працюють на стиск [102, 162]. Проте останній напрямок потребує подальших теоретичних та експериментальних досліджень через відсутність узгоджених розрахункових підходів.

Системи підсилення реалізуються шляхом наклеювання композитних ламінатів або листів, виготовлених переважно з пултрузійного вуглецевого або склопластикового волокна. Розрахунок підсилення виконується для зони розтягування (Рис.4.15), оскільки ефективність FRP у зоні стиску наразі не підтверджена. Важливими умовами надійності підсилення є захист клеєвого шва від вологи, забезпечення температурного режиму, що відповідає умовам полімеризації, та уникнення гальванічної корозії при прямому контакті вуглецевого волокна з металом. У разі дії циклічних або теплових навантажень рекомендовано додатково застосовувати механічні фіксатори в зонах анкерування. Для конструкцій, що зазнали корозії, обов'язковим є ретельне очищення до металевих блисків з відновленням початкового профілю. Крім того, підсилення може бути здійснене лише за умови, що вихідна конструкція відповідає вимогам граничного стану по міцності (ULS) при основному навантаженні [5, 6, 43, 50, 74, 131, 132, 179, 217].

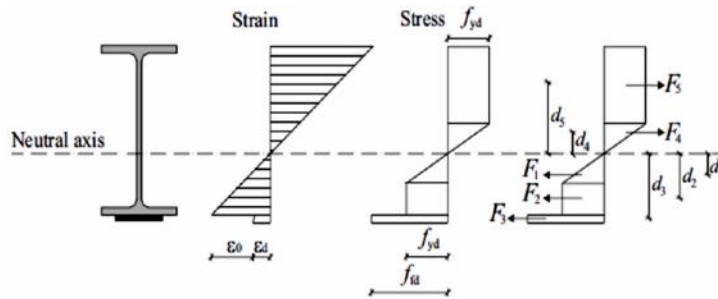


Рис.4.15. Принцип підсилення металевих елементів з схемою розподілу деформацій та напружень [104]

Надійність експлуатації FRP-підсилення забезпечується завдяки постійному моніторингу та періодичному технічному огляду. При цьому, оскільки довготривала поведінка композитних матеріалів у реальних умовах недостатньо досліджена, рекомендується регулярна оцінка стану системи протягом усього строку служби. Підготовка поверхні — ключовий етап, що включає очищення від фарби, шлаку і продуктів корозії, знежирення, шліфування, сушіння та можливе хімічне травлення. Перший шар клею слід наносити не пізніше ніж через дві години після підготовки основи, з урахуванням температурного та вологісного режимів. У зонах кінцевих ділянок підсилення для зменшення відшарування рекомендується або поступове зменшення товщини пластини (Рис. 4.16b, c), або встановлення механічних фіксаторів (Рис. 4.16a, 4.17) [201, 204], особливо при використанні техніки попереднього напруження, враховуючи явище повзучості клею. Для запобігання гальванічній корозії застосовують ізолюючі прошарки, наприклад, з склопластику GFRP [204].

Контроль якості є невід'ємною частиною процесу монтажу підсилюючих систем і значною мірою визначає ефективність функціонування систем FRP-підсилення. Він здійснюється за допомогою напівруйнівних та неруйнівних методів. Вибір методики контролю залежить від типу застосовуваної FRP-системи, умов експлуатації та вимог нормативних документів [201, 204].

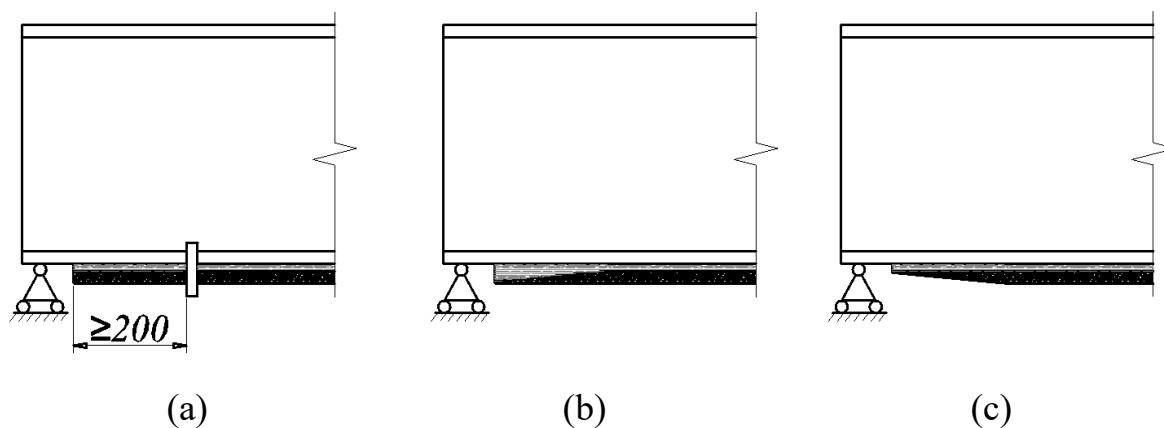


Рис.4.16. Типова деталізація крайніх ділянок FRP-системи підсилення, що дозволяє зменшити напруження відшаровування.

У разі використання попередньо затверділих FRP-систем виробничі випробування матеріалів мають бути забезпечені виробником. Якщо ж підсилення здійснюється за допомогою систем, що затвердівають безпосередньо на об'єкті, обов'язковими є лабораторні дослідження, зокрема оцінка міцності зразків на розшарування, що репрезентують якість адгезії клею до основи.

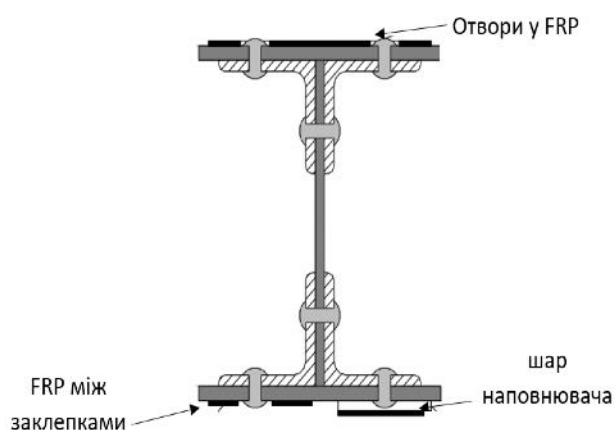


Рис.4.17. Підсилення балки, яка працює на згин, при наявності заклепок або болтів.

Для виконання напівруйнівного контролю повинні бути підготовлені спеціальні випробувальні зони, що піддаються тим самим умовам навколишнього середовища та процедурі нанесення, як і основна система підсилення. Загальна

площа таких зон має становити щонайменше 0,5% від загальної підсиленої площі, а геометрія контрольних ділянок — прямокутники розміром 500×200 мм.

Напівруйнівні методи контролю застосовуються для безпосередньої оцінки механічної взаємодії між FRP-системою та основою. Вони виконуються в спеціально підготовлених або некритичних ділянках з частотою не менше одного випробування на кожні 5 м² підсиленої площі, але щонайменше двічі для кожного типу тесту. А саме:

- Випробування на відрив є ефективним методом оцінки якості підготовки поверхні та сумісності адгезиву з металевою основою. Використовується кругла сталеві пластина товщиною 20 мм і діаметром не менше 40 мм, яка кріпиться до FRP-композиту. Зразок висвердлюється корончатим свердлом із частотою обертання не менше 2500 об/хв, уникаючи перегріву матеріалу.

- Випробування на розрив при зсуві дозволяє оцінити зчеплення між FRP-композитом і металом у площині контакту. Метод застосовується за умови можливості механічного вилучення фрагмента системи поблизу краю відшарування.

- Випробування на розрив при крученні проводиться за допомогою спеціального пристрою, здатного прикладати крутний момент до приклеєного сегмента FRP. Цей метод дозволяє виявити слабкі місця в з'єднанні, зокрема при наявності внутрішніх напружень або нерівномірної адгезії.

Неруйнівні методи контролю дозволяють виявити дефекти без пошкодження системи підсилення, зберігаючи її експлуатаційні властивості. Наступні методи застосовуються для діагностики суцільності, однорідності нанесення та наявності внутрішніх дефектів:

- Ультразвуковий контроль високої частоти використовується для виявлення дефектів у клеєвому шарі, таких як порожнечі чи локальне розшарування. Ультразвукові хвилі змінюють свій час проходження залежно від типу дефекту, що дозволяє ідентифікувати зони з порушеною адгезією. Метод вимагає наявності високоточних приладів та підготовленого персоналу.

- Стимульоване акустичне випробування базується на аналізі відгуку матеріалу на імпульси низької частоти, що дозволяє виявити пустоти чи відшарування за характерними відбитими хвилями.
- Акустико-емісійні методи полягають у виявленні пружних хвиль, що утворюються внаслідок пошкоджень під час навантаження конструкції. Ці методи є особливо ефективними для моніторингу пасивних систем підсилення в реальних умовах експлуатації та виявлення дефектів, які можуть проявлятися лише під дією навантажень.

Попри ефективність зазначених неруйнівних методів, слід враховувати їх обмеження. Зокрема, сучасні технології поки не дозволяють ідентифікувати ослаблене зчеплення FRP з металом, спричинене, наприклад, корозією або наявністю жирних забруднень на поверхні. Це підкреслює важливість ретельної підготовки поверхні перед нанесенням системи та поєднання різних методів контролю для досягнення високої якості підсилення.

Підсилення залізобетонних конструкцій є значно більш розповсюдженим і технічно обґрунтованим у порівнянні з підсиленням металевих конструкцій. Це пояснюється не лише широкою поширеністю залізобетонних споруд у будівельній практиці, а й вищою ефективністю застосування сучасних композитних систем у поєднанні з бетоном [159]. Більшість загальних технічних вимог до підсилення є подібними незалежно від типу конструкцій, однак для залізобетонних елементів існує низка специфічних обмежень, що зумовлені особливостями матеріалу основи — бетону.

Ефективне підсилення залізобетонних конструкцій за допомогою гнучких високоміцних композитних матеріалів (ФАС) передбачає дотримання низки ключових вимог. Зокрема, температурний режим експлуатації має бути нижчим за температуру склування полімерної матриці композиту, яка зазвичай становить 60–150 °C [94, 218]. Крім того, мінімальна допустима міцність бетону на стиск для більшості типів підсилення повинна бути не меншою за 15 МПа. Винятком є підсилення стиснених елементів із замкненим армуванням (наприклад,

обгортання колон бандажами), де допускається використання бетонів із міцністю від 10 МПа.

Проектування підсилення виконується згідно з методологією граничних станів із урахуванням сумісності деформацій між матеріалами конструкції та композитної системи (рис. 4.18). Система FRP має бути здатною ефективно сприймати та передавати розтягуючі зусилля на бетонну основу без втрати зчеплення. Це вимагає забезпечення високої якості підготовки бетонної поверхні, яка повинна відповідати геометричним, механічним та фізико-хімічним вимогам. Для досягнення надійної адгезії використовуються спеціальні технологічні засоби: ґрунтовки, шпаклівки, епоксидні або поліуретанові адгезиви, які мають бути сумісними з армуючими стрічками або ламінатами.

Композитні системи FRP особливо доцільно використовувати в умовах, коли традиційні методи підсилення (наприклад, зварні металеві обойми або сталеві накладки) пов'язані з високими трудовими витратами, значним збільшенням маси конструкції, необхідністю демонтажу існуючих елементів або зупинкою експлуатації об'єкта.

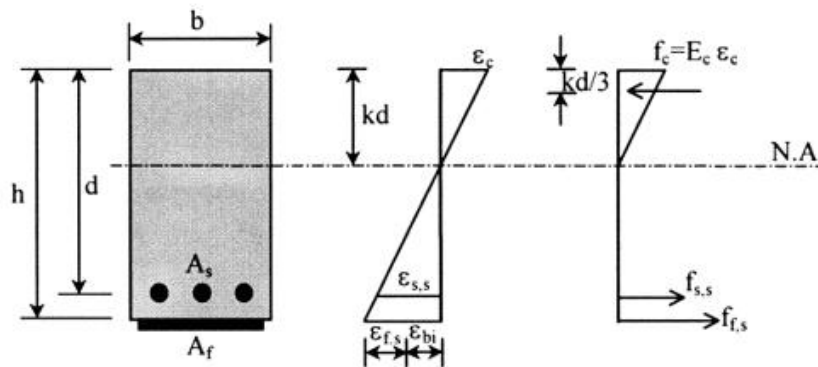


Рис. 4.18. Принцип підсилення залізобетонних конструкцій із розподілом деформацій і напружень [94]

Принципові схеми підсилення залізобетонних елементів демонструють доцільність орієнтації волокон композитного армування у напрямку основних напружень. У колонах застосовується обгортання бандажами з волокнами, орієнтованими перпендикулярно до осі (рис. 4.19), а у балках що працюють на

згин — наклеїтка підсилюючих стрічок уздовж нижнього пояса та поперечні хомути у приопорних зонах (рис. 4.20).

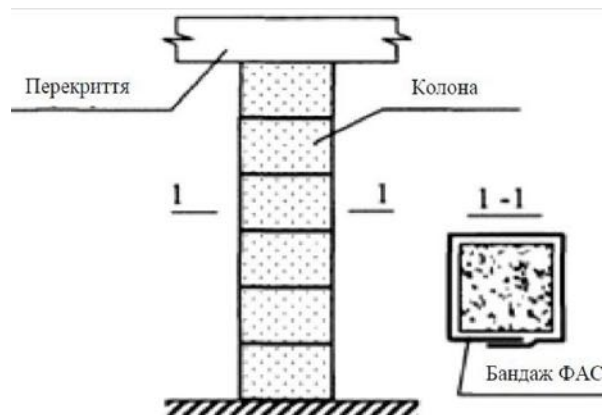


Рис.4.19. Принципова схема підсилення колони

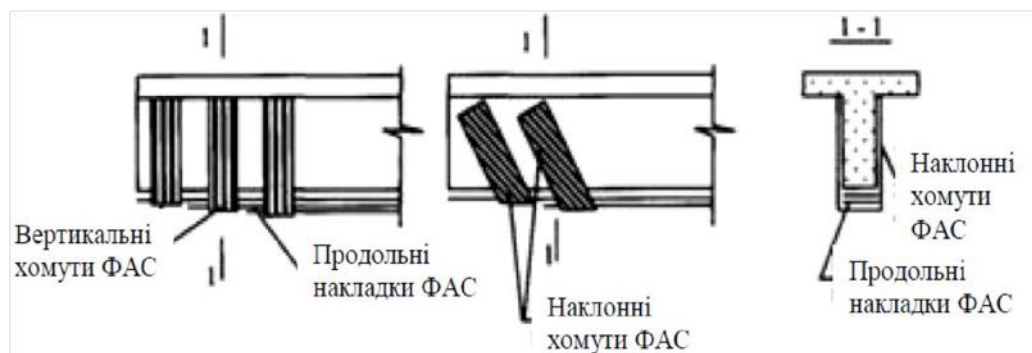


Рис.4.20. Принципові схеми підсилення балок

Належна підготовка бетонної поверхні включає: попереднє шліфування, видалення пилу, жиру, цементного молока; створення шорсткості шляхом обробки механічними засобами; нанесення розмітки згідно з проектом; вирівнювання дефектів за допомогою ремонтних полімерцементних сумішей; антикорозійна обробка арматури та відновлення захисного шару в разі його втрати; ін'єктування або герметизація тріщин.

Для ефективної реалізації системи підсилення необхідно враховувати не лише механічні характеристики матеріалів, а й експлуатаційні умови, технологію нанесення, сумісність компонентів системи та довготривалу адгезію на межі розділу матеріалів. Наявність дефектів у підготовці основи або порушення технології нанесення FRP може призвести до втрати зчеплення або передчасного

руйнування підсилювального елементу, зниження загальної ефективності підсилення або навіть до аварійних ситуацій.

Протягом останніх 25 років спостерігається стрімкий розвиток комп'ютерної техніки та інженерного програмного забезпечення, що істотно розширив можливості аналізу, проектування та оптимізації підсилення конструкцій. Інструменти моделювання, засновані на методі скінченних елементів, зокрема ABAQUS, ANSYS, DIANA, SCAD, LIRA, SolidWorks, Autodesk Robot Structural Analysis, TEKLA Structures, а також середовища типу MATLAB або REVIT, дозволяють проводити точні розрахунки ефективності підсилення конструкцій як традиційними способами, так і за допомогою композитного зовнішнього армування (FRP).

Сучасне програмне забезпечення дає змогу враховувати не лише ідеальні геометричні параметри, але й реальний стан конструкцій: наявні дефекти, пошкодження, нерівномірність міцності матеріалів, корозію та інші деградаційні явища. Це дозволяє створювати більш реалістичні інженерні моделі та з високою точністю визначати місця концентрації напружень і потенційних зон руйнування. На основі отриманих результатів можна обґрунтовано обирати типи зовнішнього підсилення, які гарантують досягнення заданої міцності, жорсткості та стійкості конструкції впродовж усього періоду експлуатації.

У рамках одного з досліджень було змодельовано сталеву балку, підсилену фіброармованою системою методом наклеювання. Розрахунки виконані у програмному середовищі ABAQUS/CAE, з використанням тривимірної скінченно-елементної моделі, яка включала формування геометрії, побудову сітки, завдання граничних умов та прикладення рівномірно розподіленого навантаження ($Q = 15000 \text{ Н/м}^2$) (рис. 4.21) [97]. Порівняння результатів до і після підсилення (рис. 4.2) демонструє істотне зменшення максимальних деформацій і перенапружень, що підтверджує ефективність FRP-підсилення.

Окремий напрям досліджень присвячено підсиленню великопрольотних покриттів, зокрема підвісних покрівель стадіонів. Такі конструкції характеризуються високою гнучкістю, значними деформаціями і чутливістю до

динамічних навантажень. Було проведено дослідження підсилення висячих згинально-жорстких ниток зовнішнім армуванням із вуглецевих волокон. В рамках дослідження застосовано інтегрований підхід, що об'єднує ВІМ-модельовання та принципи сталого піходу.

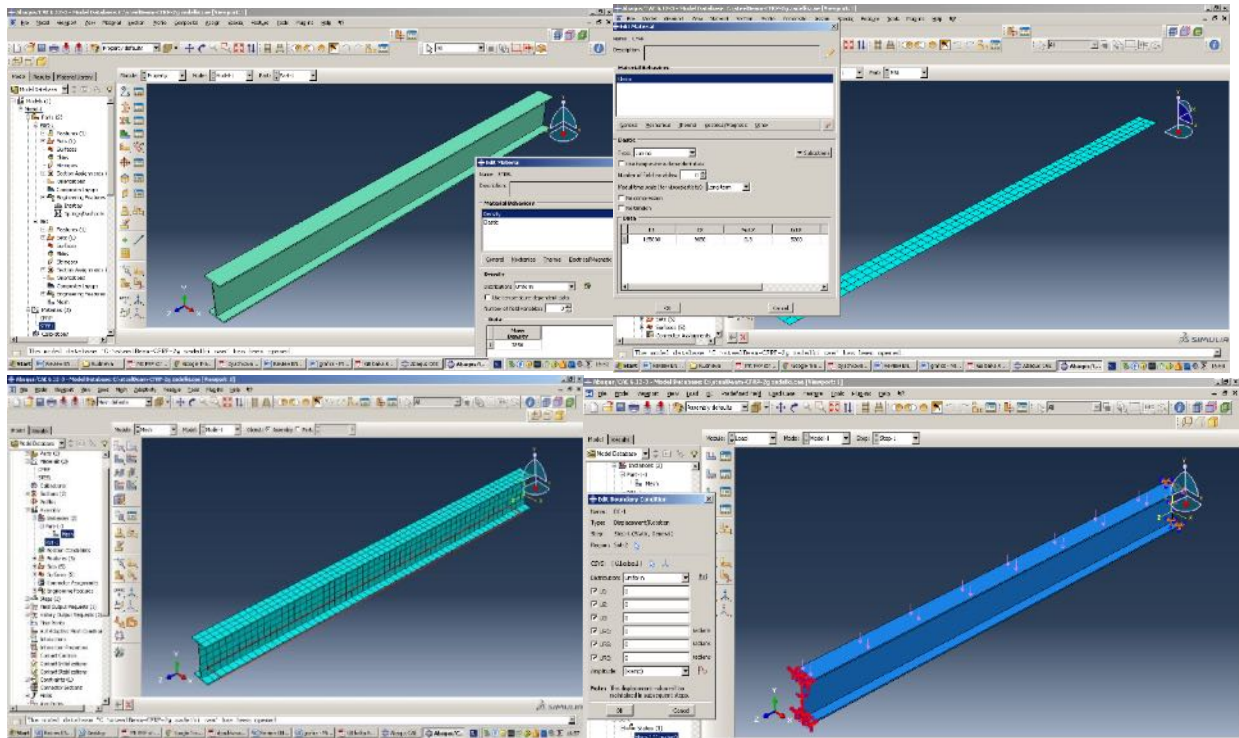


Рис. 4.21. Моделювання, побудова сітки, граничні умови та навантаження сталевій балки у ПЗ ABAQUS

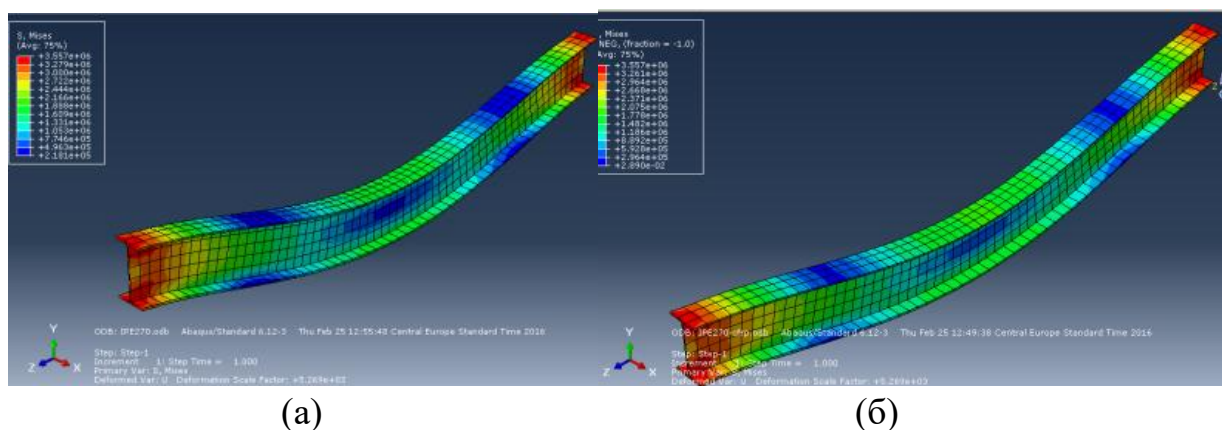


Рис. 4.22. Результати розрахунку сталевій балки у ПЗ ABAQUS:
(а) до підсилення FRP; (б) після підсилення FRP

Первинне створення моделі здійснено в AutoCAD, після чого конструкцію імпортовано в ABAQUS/CAE для макроаналізу напружено-деформованого

стану. Для детального аналізу стикових вузлів застосовано SolidWorks, а результати знову оброблено в ABAQUS із урахуванням контактної взаємодії та локальної жорсткості (рис. 4.23) [97].

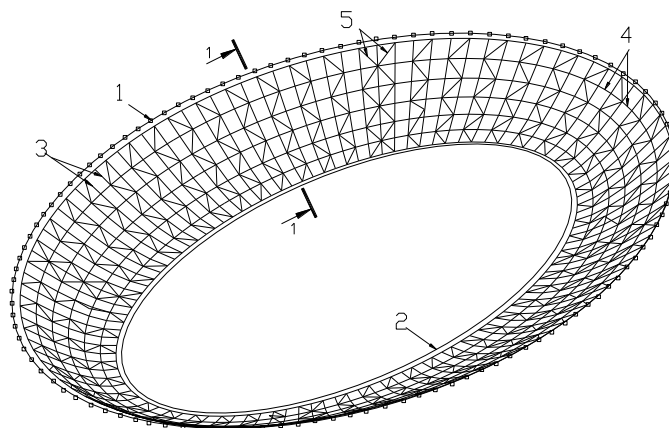


Рис.4.23. Конструктивна схема просторової стрижневої підвісної покрівлі:
1, 2 – зовнішній та внутрішній контури, 3, 4, 5 – радіальна, кільцева та
діагональна складові

Об'єктом дослідження є покриття стадіону з геометричними параметрами: $a = 186$ м, $b = 136$ м, $a_1 = 123$ м, $b_1 = 85$ м (рис. 4.23), де основними несучими елементами виступали: зовнішній контур, підтримуваний колонами або несучими стінами; внутрішній безопорний контур, що функціонує за рахунок тягових зусиль; висячі згинально-жорсткі нитки наскрізного перерізу (рис. 4.24).

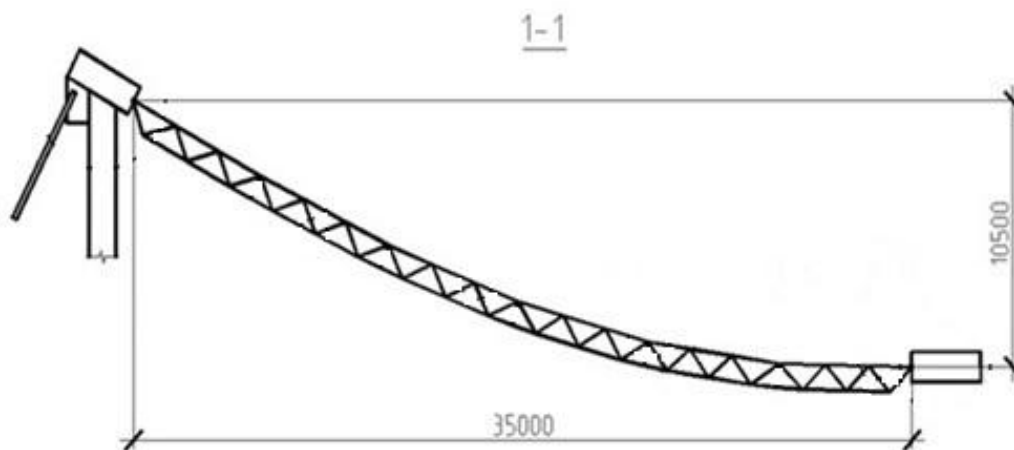


Рис.4.24. Схема перерізу просторової стрижневої покрівлі.

Для конструкції використано сталеві зварні коробчасті профілі. Після наклеювання вуглецевих стрічок відзначено зменшення прогину конструкцій, зниження питомих деформацій у ключових зонах, а також підвищення несучої здатності на 20–35 % залежно від конфігурації армування.

Проектування таких високовідповідальних споруд вимагає: оптимізації форми несучих елементів відповідно до архітектурних вимог; гармонізації матеріалів, технологій виготовлення та монтажу; досягнення балансу між надійністю, ефективністю та економічною доцільністю; урахування екологічних та соціальних факторів протягом усього життєвого циклу споруди.

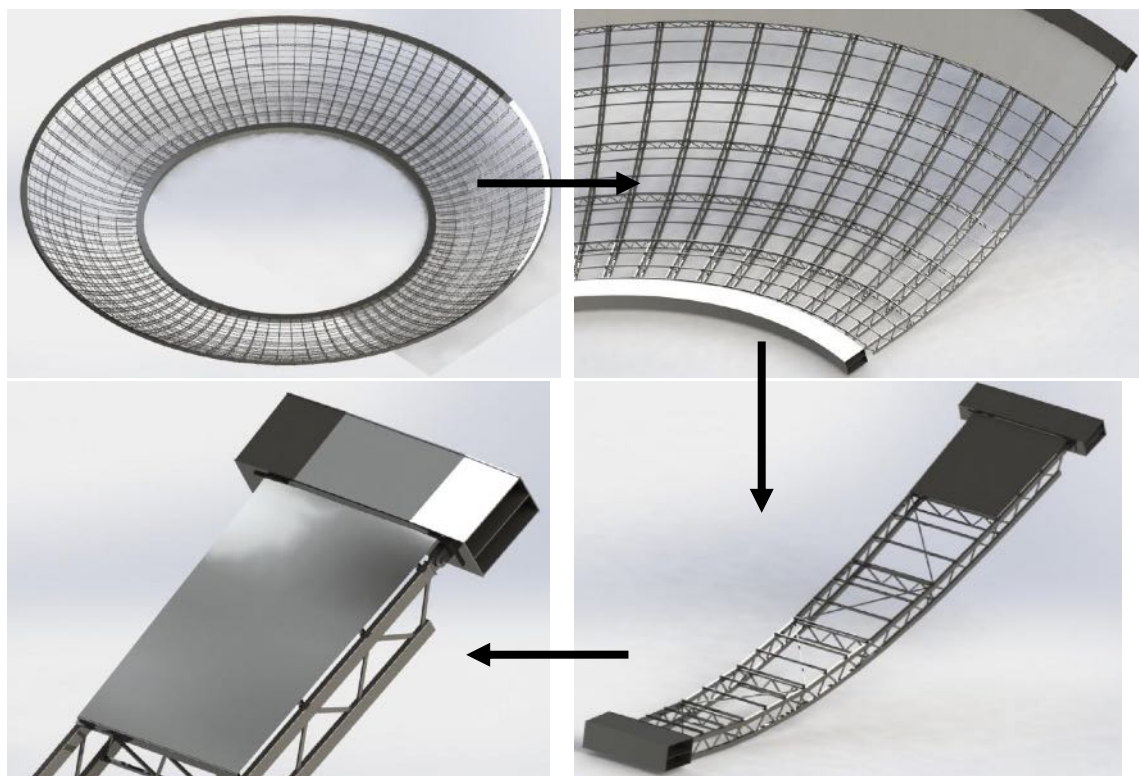


Рис.4.25. Підвісний дах стадіону з розрізом на еліптичному плані: перехід від стрижневої схеми до 3D моделі.

Одним із найважливіших аспектів у підсиленні гнучких просторових конструкцій є перехід від спрощених розрахункових моделей до детального тривимірного моделювання, що дозволяє глибше аналізувати просторову роботу елементів, особливо в критичних ділянках. Поступовий перехід до детальної 3D-моделі покрівлі стадіону з еліптичним планом (рис. 4.25) включав такі етапи:

формування геометрії висячих згинально-жорстких ниток; накладення фіброармованих бандажів на металеві елементи наскрізного перерізу; проведення макроаналізу напружено-деформованого стану за допомогою FEM у середовищі ABAQUS/CAE; розрахунок внутрішніх сил та деформацій; зіставлення моделей до і після підсилення.

Особливістю цієї конструкції є застосування зовнішнього армування на основі вуглепластика, яке реалізується шляхом наклеювання бандажів на всю поверхню згинально-жорстких ниток, зокрема на верхні та нижні пояси і розкоси ферм (рис. 4.26). Завдяки високій міцності та жорсткості вуглецевих волокон, така система підсилення ефективно протидіє згинаючим та розтягувальним силам, які зосереджуються переважно в приопорних зонах [97].

Для аналізу напружено-деформованого стану було розглянуто два типи розрахункових навантажень: постійне та Тимчасове (снігове навантаження зі значенням 160 кг/м^2).

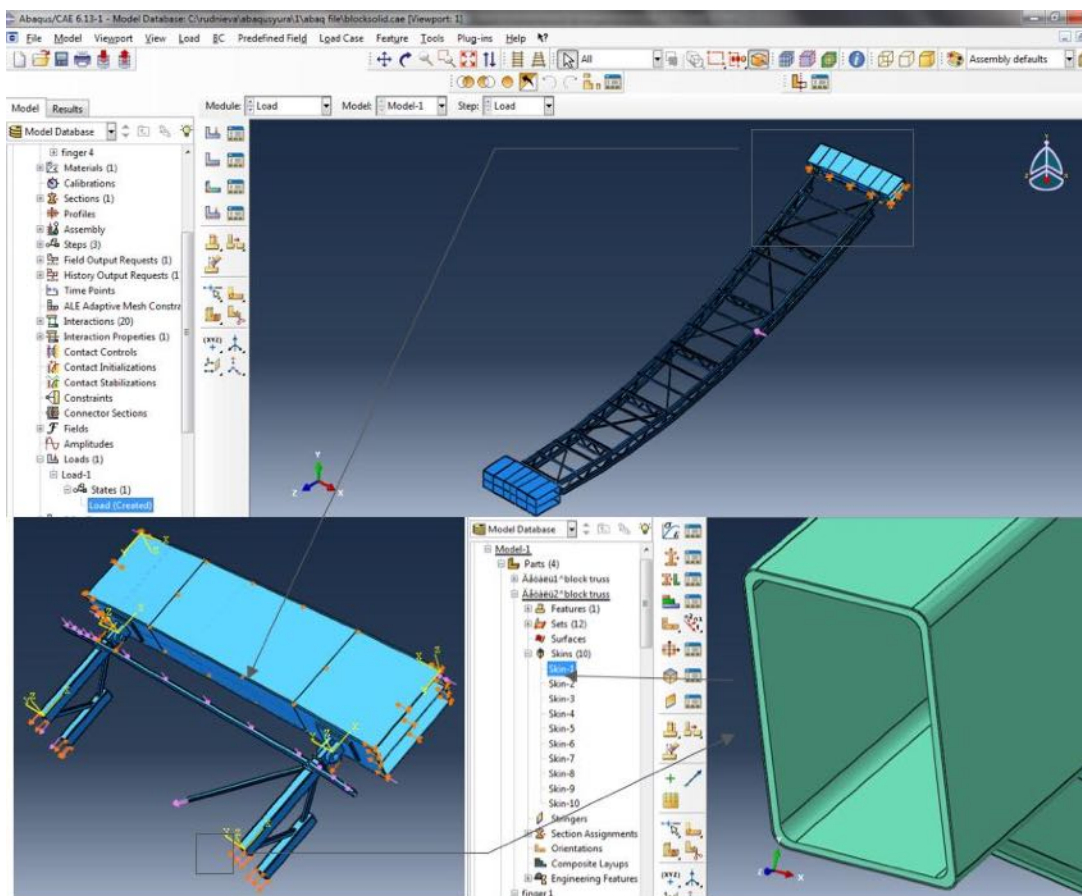


Рис. 4.26. Моделювання та навантаження згинально-жорстких ниток наскрізного перерізу, підсиленого вуглепластиком, у програмі ABAQUS

Результати аналізу напружень наведено на рис. 4.27, де можна порівняти стан конструкції до та після підсилення. Очевидно, що найбільші напруження локалізуються у зонах поблизу зовнішнього опорного контуру. Після впровадження фіброармованої системи спостерігається значне зниження рівня максимальних напружень. Подібна тенденція спостерігається і у розподілі деформацій (Рис. 4.28), вони істотно зменшилися, що свідчить про покращення загальної жорсткості конструкції. Зменшення максимальних переміщень у критичних зонах підтверджує ефективність фіброармованої системи в умовах дії як постійного, так і тимчасового навантаження.

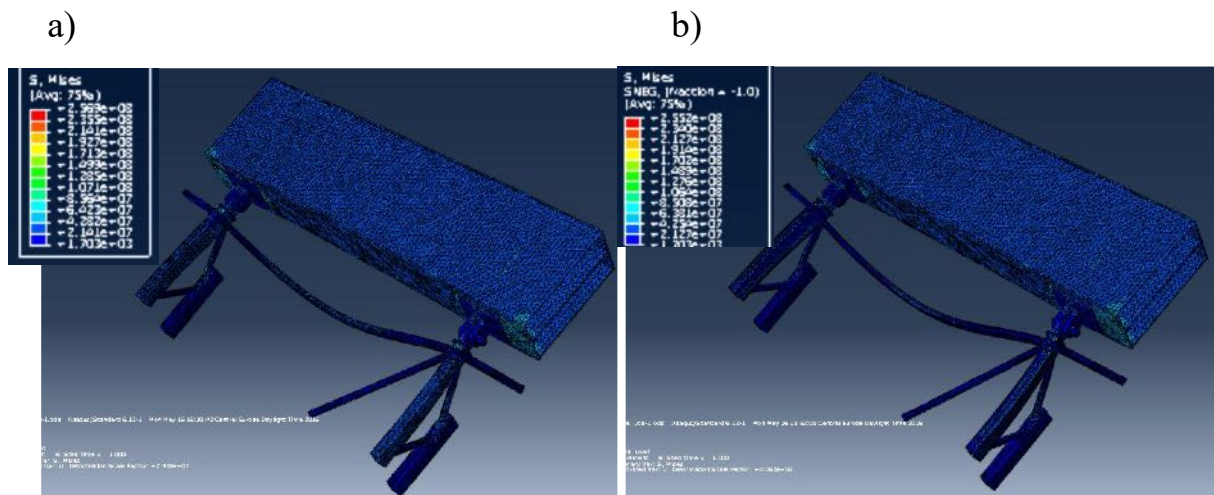


Рис. 4.27. Результати розрахунку висячих згинально-жорстких волокон у програмі ABAQUS (напруження): а – до підсилення вуглепластиком; (б) після підсилення вуглепластиком

Результати дослідження демонструють, що застосування зовнішнього підсилення згинально-жорстких ниток вуглепластиком є високоефективним способом покращення несучої здатності великопрольотних гнучких систем. Особливо важливо, що такий метод дозволяє локально підсилити найбільш навантажені ділянки без значного збільшення маси або втручання в основну геометрію конструкції. Це забезпечує довговічність, економічну доцільність і функціональну надійність системи в умовах складного навантаження і тривалої експлуатації.

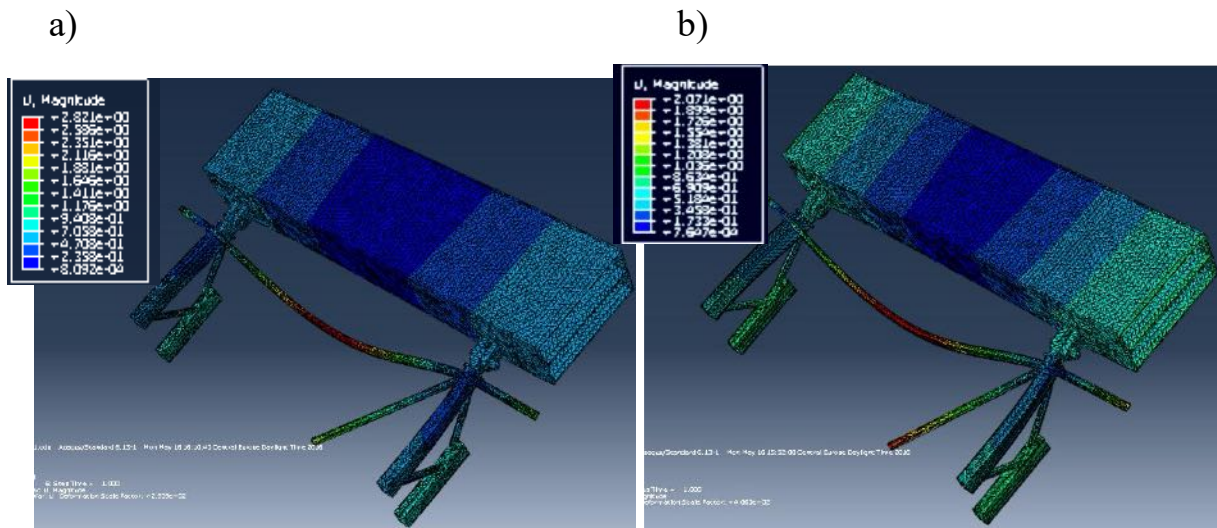


Рис. 4.28. Результати розрахунку висячих згинально-жорстких волокон у програмі ABAQUS (деформації): а – до підсилення вуглепластиком; (б) після підсилення вуглепластиком

4.5. Систематизація факторів, що впливають на технічний стан елементів каркасу будівлі

Сучасні методи оцінювання технічного стану будівельних конструкцій та вибору заходів з їх підсилення переважно орієнтовані на локальну перевірку несучої здатності елементів або на аналіз окремих експлуатаційних показників. Такі підходи, як правило, не забезпечують системної узгодженості КТР та ОТР у межах цілісної КТС, а також не враховують комплексного впливу факторів протягом життєвого циклу будівлі.

У даній роботі виходять з положення, що вибір КТР для підсилення елементів каркасу має базуватися не лише на розрахункових характеристиках конструкцій, але й на системному врахуванні внутрішніх і зовнішніх факторів, які змінюють умови експлуатації, технологію виконання робіт та ефективність прийнятих рішень. Саме відсутність формалізованого зв'язку між такими факторами та критеріями якості КТР є одним з ключових обмежень існуючих методик.

Будівельні конструкції зазнають змін протягом усього життєвого циклу будівлі, починаючи з моменту введення в експлуатацію. Ці зміни мають

багатофакторний характер і зумовлені одночасним впливом внутрішніх та зовнішніх чинників, які по-різному проявляються на різних етапах експлуатації. Відповідно, технічний стан елементів каркасу не може розглядатися як сталий параметр і потребує системного аналізу в межах концепції життєвого циклу будівлі.

Несвоєчасне виявлення дефектів і пошкоджень елементів каркасу призводить до скорочення життєвого циклу будівлі та зростання сумарних витрат на її утримання. Тому оцінювання технічного стану та обґрунтування заходів підсилення повинні здійснюватися з урахуванням умов експлуатації, конструктивних і технологічних особливостей, якості виконання робіт, взаємодії різнорідних матеріалів, а також організаційних і середовищних чинників. Зміни також відбуваються в будівлі різними іншими способами: внутрішніми і зовнішніми факторами, такими як деградація компонентів будівлі або збільшення вартості будівельного фонду [30].

Існуючі методи оцінювання технічного стану та вибору рішень з підсилення, як правило, орієнтовані на локальні показники міцності, жорсткості або зносу окремих елементів [55, 56, 77, 201]. Такі підходи не забезпечують реалізацію принципів вибору КТР у складі КТС, оскільки:

- не враховують комплексного впливу внутрішніх і зовнішніх факторів;
- не забезпечують узгодження конструктивних, організаційних і технологічних рішень;
- не дозволяють формалізувати вибір КТР за сукупністю критеріїв надійності, ефективності та сталості.

У зв'язку з цим основною метою даного дослідження є розробка науково обґрунтованого підходу до систематизації факторів, що впливають на технічний стан елементів каркасу будівель, з подальшою інтеграцією цих факторів у процес вибору КТР та ОТР на основі критеріїв оцінки якості (розділ 2.3).

Прогнозування змін технічного стану каркасу будівлі є складним завданням, оскільки довговічність конструкцій визначається не лише нормативними строками служби матеріалів, а й характером їхньої взаємодії,

умовами експлуатації, якістю виконання робіт та впливом навколишнього середовища. Несвоєчасне виявлення пошкоджень або неправильний вибір рішень з підсилення призводить до прискореного зменшення життєвого циклу будівлі та зростання сукупних витрат (LCC, WLC) [24].

З позицій КТС, елементи каркасу мають розглядатися не ізольовано, а як частина багаторівневої системи, в якій:

- внутрішні фактори визначають поточний технічний стан і функціональні обмеження;
- зовнішні фактори формують умови, обмеження та вимоги до вибору КТР і ОТР.

фактори впливу

Технічний стан елементів каркасу будівлі формується та змінюється протягом усього життєвого циклу під впливом сукупності взаємопов'язаних чинників [56]. На кожному з етапів життєвого циклу — від планування і проєктування до експлуатації та реконструкції — необхідно враховувати ефективність застосованих матеріалів, рівень споживання ресурсів (трудових, матеріальних, енергетичних), організаційно-технологічні умови виконання робіт, а також екологічні наслідки прийнятих рішень.

Найбільший потенціал впливу на вартість життєвого циклу будівлі зосереджений на етапах планування та проєктування, тоді як на наступних етапах можливості коригування технічних і економічних показників є істотно обмеженими [177]. Водночас прогнозування довгострокової поведінки каркасу ускладнюється багатофакторністю процесів деградації конструкцій та неможливістю повного передбачення умов експлуатації. На зміну технічного стану елементів каркасу одночасно впливають внутрішні фактори (фізичний знос матеріалів, функціональні зміни, потреба у підсиленні) та зовнішні фактори (кліматичні умови, нормативні вимоги, економічні та соціальні обмеження) [23].

На рисунку 4.29 наведено узагальнену залежність тривалості життєвого циклу будівлі від витрат на її реконструкцію та експлуатацію. Зі зростанням інвестицій у якісні матеріали, енергоефективні технології та стійкі конструктивні

рішення спостерігається подовження строку експлуатації будівлі. Разом з тим, характер цієї залежності є нелінійним, що свідчить про необхідність економічно обґрунтованого вибору конструктивно-технологічних рішень з урахуванням принципів раціонального використання ресурсів.

Обґрунтування рішень з підсилення каркасу вимагає комплексного врахування не лише технічної надійності застосовуваних методів, а й умов їх реалізації, зокрема впливу тривалих зупинок експлуатації, обмежень доступу до об'єкта, особливостей виготовлення та транспортування матеріалів. Такі чинники безпосередньо впливають на ефективність прийнятих рішень і можуть прискорювати процеси деградації конструкцій за відсутності належного технічного супроводу.

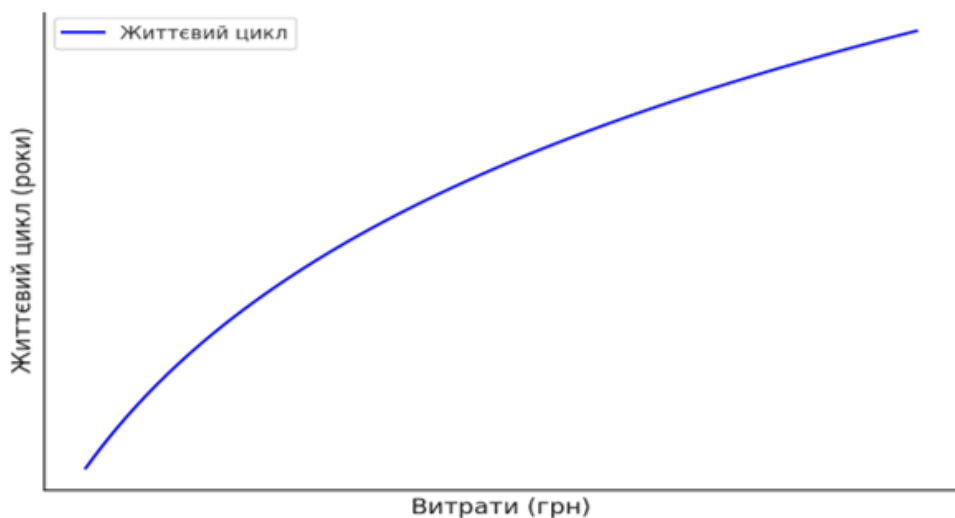


Рис. 4.29. Загальна залежність тривалості життєвого циклу будівлі від витрат на її реконструкцію та експлуатацію

Важливу роль у формуванні технічного стану каркасу відіграють також екологічні та логістичні фактори. Зокрема, вибір матеріалів для підсилення (традиційні металеві елементи або полімерні композити, армовані волокнами) визначає не лише експлуатаційні характеристики конструкцій, але й екологічні показники протягом усього життєвого циклу. У ряді випадків застосування композитних матеріалів забезпечує кращі експлуатаційні результати порівняно з

традиційними методами підсилення [50, 201, 216], однак може супроводжуватися підвищеними непрямыми витратами та екологічними навантаженнями, пов'язаними з виробництвом і транспортуванням.

Внутрішні фактори характеризують процеси змін, зумовлені функціональними, технологічними, естетичними та економічними особливостями будівлі, і безпосередньо визначають поточний технічний стан елементів каркасу. Їх систематизація дозволяє виділити ключові параметри, що потребують пріоритетного врахування при виборі методів підсилення та формуванні конструктивно-технологічних рішень.

Таблиця 4.9

Внутрішні фактори впливу на зміну каркасу будівлі

	Групи факторів		Параметри факторів
C_1	Технологія	C_{12}	Знос та заміна інженерних комунікацій. Здебільшого від цього фактору залежить вибір геометричної форми та матеріалу підсилюючої конструкції;
		C_{12}	Погіршення стану каркасу будівлі;
		C_{13}	Інтенсивна експлуатація будівлі або споруди;
		C_{14}	Заміна внутрішнього оздоблення;
		C_{15}	Об'ємно-планувальні параметри споруд. Комерційний простір може змінюватися кожні три роки; звичайні будівлі можуть залишатися без змін протягом тридцяти років.
		C_{16}	Заміна зовнішнього оздоблення;
		C_{17}	Матеріальна ємність будівельних елементів
		C_{18}	Технічні характеристики будівельних елементів
C_2	Естетичний	C_{21}	Мода
		C_{22}	Деградація матеріалу
C_3	Економічний	C_{31}	Перехід права власності
		C_{32}	Стан бізнесу

З метою подальшого аналізу та обґрунтування рішень з підсилення каркасних будівель у роботі виконано систематизацію внутрішніх і зовнішніх факторів впливу, результати якої наведено відповідно у таблицях 4.9 та 4.10. Зазначені фактори у подальших розділах розглядаються як вхідні параметри для формування системи критеріїв оцінювання надійності, ефективності та сталості конструктивно-технологічних рішень.

Для збору і аналізу інформації за визначеними внутрішніми факторами технічного стану конструкцій каркасу будівлі застосовується функція:

$$C = (C_1, C_2, \dots, C_r) \quad (4.7)$$

Для кожної групи функцій $C_1, C_2, \dots, C_r$ виділено підгрупи головних функцій C_{rs} , які пов'язані з функціями внутрішніх факторів змін.

Таблиця 4.10

Зовнішні фактори впливу на зміну будівлі

	Групи факторів		Параметри факторів
E_1	Навколишнє середовище	E_{11}	Військові дії
		E_{12}	Людське сприйняття катастрофи
		E_{13}	погода/клімат, навколишнє середовище.
E_2	Економічні аспекти	E_{21}	Потреби ринку
		E_{22}	стан ринку, економічний, вартість землі
		E_{23}	Вартість майна
E_3	Правові аспекти	E_{31}	Будівельні норми
		E_{32}	нормативно-правові акти, пожежні вимоги
		E_{33}	Нормативно-правові акти
E_4	Політика	E_{41}	Оподаткування
		E_{42}	Культурні та естетичні
		E_{43}	Стейкхолдери *
		E_{44}	Історичне значення місця розташування будівлі або споруди
E_5	Конструктивно-технологічний	E_{51}	Типи матеріалів, їхня довговічність, стійкість до зовнішніх впливів.
		E_{52}	Використані технології, особливості монтажу.
		E_{53}	Стан інженерних систем, їхня модернізація.
		E_{54}	Інфраструктура, транспорт, комунікації, доступність об'єкта.

Зовнішні фактори, представлені в таблиці 4.10, відіграють визначальну роль у формуванні вимог і обмежень при виборі конструктивно-технологічних рішень з підсилення елементів каркасу. Вони безпосередньо впливають на доцільність застосування певних методів підсилення, організацію виконання робіт та вибір засобів механізації. Ці фактори можуть значно впливати на довговічність і

ефективність експлуатації будівлі, а також визначати потребу в її реконструкції або підсиленні.

Збір і аналіз інформації щодо зовнішніх факторів змін подається у вигляді множини:

$$E = (E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6 \dots E_k) \quad (4.8)$$

Для кожної групи функцій $E_1, E_2, \dots E_k$ виділено підгрупи головних функцій E_{kl} , які пов'язані з функціями зовнішніх факторів змін.

Варто зазначити, як саме внутрішні та зовнішні фактори безпосередньо впливають на формування критеріїв оцінювання КТР у межах КТС. Отже:

- Критерій N_i (надійність) формується під впливом деградації матеріалів каркасу, фізичного зносу та пошкоджень елементів, впливу інженерних систем і перепланувань, агресивних середовищ, кліматичних і техногенних факторів. В цьому випадку фактори $C_{12}, C_{13}, E_{13}, E_{51}$ безпосередньо впливають на вибір типу підсилювальної конструкції та методів монтажу, які забезпечують відновлення або підвищення несучої здатності.

- Критерій R_i (ефективність) визначається трудомісткістю та технологічною складністю робіт, економічними обмеженнями, доступністю об'єкта та організацією виконання робіт. Так, фактори $C_{31}, C_{32}, E_{21}, E_{22}, E_{54}$ обумовлюють доцільність застосування тих чи інших організаційно-технологічних рішень (ОТР), що мінімізують простої, витрати ресурсів та тривалість реконструкції.

- Критерій A_i (сталість) пов'язаний із довговічністю матеріалів, можливістю адаптації будівлі до майбутніх змін, екологічними та соціальними аспектами. Отже, фактори $C_{15}, C_{17}, E_{42}, E_{44}$ визначають вибір таких КТР, які забезпечують довгострокову експлуатаційну придатність будівлі з мінімальними втручаннями в майбутньому.

Поряд із систематизацією внутрішніх і зовнішніх факторів, що визначають поточний технічний стан елементів каркасу та умови вибору КТР і ОТР,

доцільним є окремий розгляд чинників, які безпосередньо впливають на строк експлуатації будівлі та її конструктивних компонентів. У межах КТС ці чинники формують довготривалу експлуатаційну поведінку каркасу та визначають інтенсивність процесів його деградації.

Особливу роль відіграють умови навколишнього середовища, які, хоча й задаються на етапі проєктування, можуть істотно змінюватися в процесі експлуатації. Для окремих зон будівлі, що характеризуються відмінними параметрами мікросередовища, необхідним є диференційований аналіз впливів, оскільки швидкість зношення та характер пошкоджень елементів каркасу можуть суттєво відрізнятися.

Чинники впливу на строк експлуатації розглядаються окремо від внутрішніх і зовнішніх факторів змін, хоча між ними існує тісний взаємозв'язок. Такий підхід зумовлений тим, що оцінювання строку служби конструкцій передбачає не лише фіксацію змін технічного стану, а й прогнозування довговічності матеріалів, ефективності застосованих технологічних рішень та їх здатності забезпечувати необхідний рівень експлуатаційної надійності протягом усього життєвого циклу будівлі.

На основі положень стандарту ISO 19208 [219] систематизовано чинники впливу на строк експлуатації каркасу будівлі, які узагальнено та наведено в таблиці 4.11. На відміну від узагальненого поділу факторів на внутрішні та зовнішні, дана система дозволяє деталізувати механізми впливу на конструкції за їх фізичною природою (механічні, температурні, хімічні, біологічні тощо) та оцінити їхній внесок у процеси старіння, деградації матеріалів і втрати несучої здатності протягом життєвого циклу будівлі.

Збір і аналіз інформації щодо основних чинників впливів на строк експлуатації будівлі та її компонентів I подається у вигляді множини:

$$I = (I_1, I_2, I_3, \dots, I_i) \quad (4.9)$$

Для кожної групи функцій $I_1, I_2, \dots, I_i$ виділено підгрупи головних функцій I_{ik} , які пов'язані з функціями умов експлуатації.

Таблиця 4.11

Чинники впливів на строк експлуатації каркасу будівлі

Характер		Клас		Приклади
Механічні впливи	I_1	Сила тяжіння	$I_{1,1}$	Снігові навантаження, навантаження від дощових опадів
		Силові навантаження, деформаційні впливи від прикладених навантажень та вимушених переміщень	$I_{1,2}$	Обледеніння, розширення та стискання, зсув ґрунту, повзучість
		Кінетична енергія	$I_{1,3}$	Удари, піщана буря, гідроудар
		Вібраційні та шумові навантаження	$I_{1,4}$	Тунельний прокоп, вібрація внаслідок дорожнього руху чи роботи побутових приладів. Ризик послаблення з'єднань і накопичення мікропошкоджень.
Електромагнітні впливи	I_2	Випромінювання	$I_{2,1}$	Сонячне або ультрафіолетове випромінювання, радіоактивне випромінювання
		Електроенергія	$I_{2,2}$	Електролітичні реакції, блискавка
		Магнетизм	$I_{2,3}$	Магнітні поля
Температурні впливи	I_3	Екстремальні рівні або різкі перепади температури	$I_{3,1}$	Спека, мороз, термічний удар, пожежа
Хімічні впливи	I_4	Вода і розчинники	$I_{4,1}$	Вологість повітря, ґрунтові води, спирт
		Окислювачі	$I_{4,2}$	Кисень, дезінфікуючий засіб, відбілювач
		Відновники	$I_{4,3}$	Сульфіді, аміак, паливні речовини
		Кислоти	$I_{4,4}$	Вугільна кислота, пташиний послід, оцет
		Луги (основи)	$I_{4,5}$	Вапно, гідроксиди
		Солі	$I_{4,6}$	Нітрати, фосфати, хлориди
		Хімічно нейтральні речовини	$I_{4,7}$	Вапняк, жир, олія, чорнило
Біологічні впливи	I_5	Рослинне середовище та живі організми	$I_{5,1}$	Бактерії, цвілі, грибки, коріння
		Тварини	$I_{5,2}$	Гризуни, терміти, хробаки, птахи

На рис. 4.30 сформувано систему внутрішніх та зовнішніх факторів зміни, а також інших факторів, які впливають на технічний стан елементів каркасу

будівлі, яка є критично важливою для вибору стратегій реконструкції та забезпечення якості підсилення конструкцій.

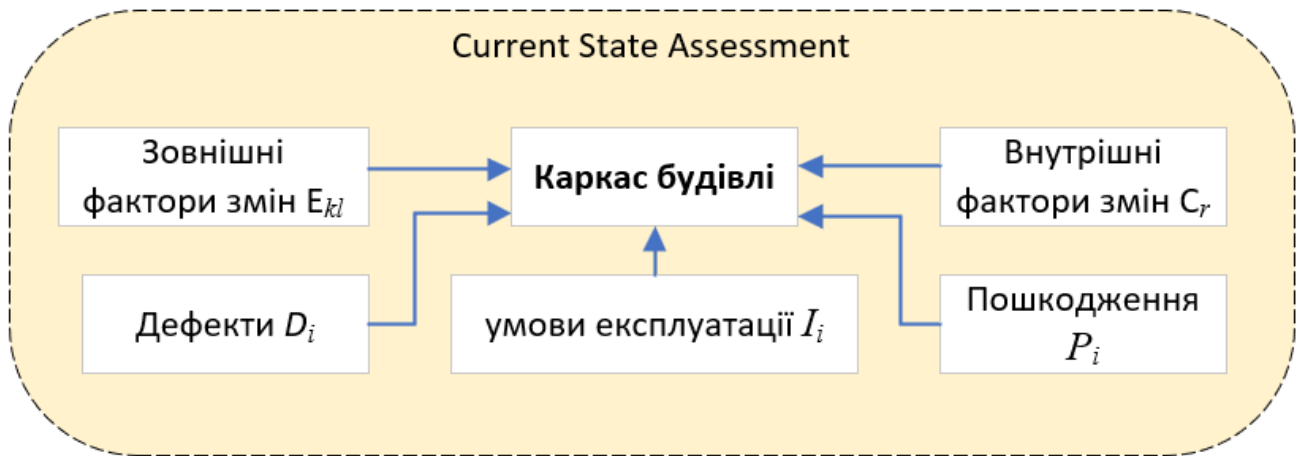


Рис.4.30. Система внутрішніх та зовнішніх факторів зміни, а також інших факторів, які впливають на технічний стан елементів каркасу будівлі

4.6. Вибір факторів, що впливають на формування конструктивно-технологічної системи забезпечення якості підсилення каркасних будівель

Вибір моделі технологічного процесу реконструкції каркасу визначає технічну надійність, безпеку, економічну ефективність і довговічність підсилення. Формування конструктивно-технологічної системи (КТС) повинно враховувати технічний стан будівлі, мету реконструкції, ресурсні обмеження та вимоги нормативних документів.

Ключовим фактором є причина ініціювання реконструкції, яка визначає пріоритети та вибір технологій підсилення. Вона може бути зумовлена зниженням несучої здатності, зміною функціонального призначення, модернізацією виробництва, підвищенням вимог до безпеки або впровадженням принципів сталого розвитку. Кожна з цих причин формує різні вимоги до конструктивних рішень, технології виконання робіт і організації процесу.

До основних факторів, що впливають на вибір технологічної моделі підсилення, належать:

- Мета реконструкції – відновлення або підвищення несучої здатності, продовження строку експлуатації, енергоефективність, відповідність сучасним нормам.
- Фактичний технічний стан конструкцій – характер і ступінь дефектів та пошкоджень (механічних, температурних, корозійних, вибухових).
- Бюджетні та часові обмеження – необхідність оптимізації вартості та строків виконання робіт.
- Умови виконання робіт – можливість зупинки експлуатації або виконання підсилення без переривання виробничих процесів.
- Майбутнє функціональне призначення – зміна навантажень, перепланування, інтеграція нового обладнання.

Ключовим вихідним параметром є причина ініціювання реконструкції V_j , яка формує вимоги до рівня надійності, допустимих витрат, строків реалізації та допустимих технологічних втручань. Систематизація таких причин подана в табл. 4.12, яка структурує причини підсилення каркасу за чотирма функціональними групами:

V_1 – технічні причини, пов'язані зі станом конструкцій каркасу, їх надійністю та відповідністю чинним нормативним вимогам;

V_2 – функціональні зміни, пов'язані зі зміною призначення, експлуатації або обладнання;

V_3 – безпека та сталий розвиток, що охоплюють вимоги до екологічності, охорони праці та зниження ризиків;

V_4 – комфорт та інновації, пов'язані з сучасними стандартами зручності, ергономіки, інклюзивності та технологічності експлуатаційного середовища.

Представлена класифікація дозволяє формалізувати множину причин ініціювання реконструкції:

$$V = (V_1, V_2, V_3, \dots V_j) \quad (4.10)$$

Таблиця 4.12

Систематизація причин ініціювання робіт з підсилення каркасу при
реконструкції будівель V_j

V_j	Групи функцій		Підгрупи функцій
V_1	Технічні причини	V_{11}	Технічні дефекти
		V_{12}	Ушкодження
		V_{13}	Зниження несучої здатності каркасу через старіння або перевантаження
		V_{14}	Потреба у підвищенні надійності конструкцій для довгострокової експлуатації
		V_{15}	Виявлена невідповідність сучасним будівельним нормам і стандартам
		V_{16}	Подовження терміну експлуатації будівлі понад первинний проектний ресурс
		V_{17}	Необхідність підвищення просторової жорсткості для забезпечення стійкості
V_2	Функціональні зміни	V_{21}	Зміна навантажень у зв'язку зі зміною функціонального призначення будівлі
		V_{22}	Перепланування, що впливає на конструктивну схему і вимагає підсилення
		V_{23}	Інтеграція нових інженерних систем або технологічного обладнання
		V_{24}	Адаптація будівлі до спеціальних потреб (інклюзія, медичні або освітні функції)
V_3	Безпека та сталий розвиток	V_{31}	Забезпечення безпеки працівників під час виконання будівельних робіт
		V_{32}	Сейсмічне підсилення згідно з оновленими нормами регіону
		V_{33}	Необхідність модернізації з урахуванням принципів сталого розвитку (зниження впливу на довкілля)
V_4	Комфорт та інновації	V_{41}	Високий рівень зносу через інтенсивну експлуатацію (промислові, громадські об'єкти)
		V_{42}	Підвищення комфорту користувачів (мікроклімат, шумозахист, освітлення)
		V_{43}	Забезпечення ергономіки та безпечного середовища праці для будівельників
		V_{44}	Впровадження інноваційних рішень або «розумних» технологій у будівництві

Для кожної групи функцій $V_1, V_2, \dots, V_j$ виділено підгрупи головних функцій V_{jk} , які пов'язані з функціями причини ініціювання робіт.

Проект реконструкції може починатися з різних стратегічних підходів, залежно від визначених цілей, таких як зниження операційних витрат під час майбутньої експлуатації будівлі, підвищення надійності чи адаптація будівлі до

нових функціональних завдань. Для досягнення оптимальних моделей КТР і ОТР важливо враховувати широкий спектр аспектів. Окрім надійності, слід брати до уваги соціальну, культурну, економічну та екологічну цінність об'єкта.

Підходи до реконструкції повинні бути адаптовані до специфіки кожного проекту, беручи до уваги стан несучих конструкцій будівлі, місцеві умови (розташування, навколишнє середовище, історичні та культурні фактори), нормативні вимоги та вимоги органів місцевого самоврядування.

У практиці реконструкції підсилення існуючих каркасів будівель нерідко виконується незалежно від наявності явних дефектів або пошкоджень конструкцій. У таких випадках ключовим є чітке визначення причин підвищення несучої здатності (ПНЗ), які виступають вихідною передумовою для обґрунтованого вибору відповідних КТР підсилення. Формалізація причин підвищення несучої здатності дозволяє уникнути надлишкових або неадекватних технічних рішень, забезпечити відповідність обраної технології реальним цілям реконструкції, а також узгодити технічні, експлуатаційні та економічні вимоги до підсилення.

У таблиці 4.13 наведено систематизацію основних причин підвищення несучої здатності каркасних конструкцій B_j , які розглядаються як функціональні групи, що визначають спрямованість та характер втручання в конструктивну систему будівлі.

Збір і аналіз інформації щодо причини підвищення несучої здатності каркасу будівлі подається у вигляді множини:

$$B = (B_1, B_2) \quad (4.11)$$

Важливу роль у визначенні критеріїв вибору методів реконструкції будівлі відіграють також особливі умови проекту, серед яких: бюджет, тривалість виконання робіт, склад і досвід учасників проекту. Таким чином, кожен проект реконструкції вимагає унікальної стратегії, яка враховує весь спектр технічних, економічних та соціальних факторів для створення ефективних і стійких рішень.

Тому, наступним важливим фактором, що впливає на формування КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель, є Критерій підходу T_x . Він безпосередньо залежить від причин ініціювання робіт V_j , які визначають ключові напрямки реконструкції.

Таблиця 4.13

Систематизація причин причини підвищення несучої здатності каркасу будівлі B_j

B_j	Групи функцій		Підгрупи функцій
B_1	Збільшення життєвого циклу каркасу		-
B_2	Підвищення несучої здатності	B_{21}	Підвищення просторової жорсткості
		B_{22}	Підвищення надійності конструкції
		B_{23}	Збільшення навантажень на балку

Проект реконструкції часто стартує з розробки стратегії мінімізації операційних витрат на етапі експлуатації будівлі. Проте для досягнення оптимальної якості підсилення каркасу необхідно врахувати широкий спектр факторів, таких як технічна, економічна, культурна, соціальна та екологічна цінність будівлі. Підхід до реконструкції має варіюватися залежно від конкретного проекту, враховуючи не лише стан несучих конструкцій, але й місцеві умови, включаючи розташування, навколишнє середовище, історичні фактори, нормативні вимоги та потреби місцевих органів влади. Також важливим є врахування бюджету, тривалості виконання проекту та його учасників, що безпосередньо впливає на визначення критеріїв вибору методів і ступеня підсилення надійності конструкцій.

Підхід до підвищення експлуатаційної надійності каркасів залежить від мети проекту. Він може бути орієнтований на максимізацію терміну експлуатації, підвищення міцності, жорсткості та стійкості конструкцій або мати бізнес-орієнтовану або кінцево-користувацьку спрямованість. Цей підхід охоплює всі етапи життєвого циклу будівлі, починаючи від планування до знесення: I –

планування; *II* – проектування; *III* – виробництво; *IV* – будівництво; *V* – обслуговування; *VI* – знесення будинку.

Тому, вибір підходу до реконструкції є ключовим завданням, яке визначає ефективність проекту. Цей вибір залежить від мети реконструкції: чи фокусується вона на бізнес-орієнтованій перспективі, забезпеченні довговічності конструкцій або на задоволенні очікувань кінцевих користувачів. Кожен із підходів орієнтується на різні етапи життєвого циклу будівлі — від початкового планування до знесення. На кожному етапі життєвого циклу необхідно враховувати низку факторів, зокрема: використання енергії та води, внутрішнього середовища з урахуванням здоров'я і благополуччя користувачів, забруднення, транспорту, матеріалів, відходів, екології та процесів управління. Для ефективного вибору методів і стратегій реконструкції в табл. 4.14 наведено набір критеріїв, що дозволяють адаптувати рішення під специфічні потреби проекту [30, 72].

Таблиця 4.14

Критерії підходів при виборі типу конструктивного-технологічного
забезпечення під час реконструкції

T_x	Критерій		Підгрупа
T_1	Оцінка показників життєвого циклу будівлі	T_{11}	Аналіз вартості вартості життєвого циклу
		T_{12}	Аналіз життєвого циклу
T_2	Інструменти екологічної оцінки		
T_3	Планування терміну служби		
T_4	Збереження історичної споруди та забезпечення сталості		
T_5	Бізнес-орієнтований підхід		
T_6	Орієнтований на користувача підхід		

T_1 - Оцінка показників життєвого циклу будівлі (Life Cycle Performance Assessment) [30, 72, 220] — це методологія системного аналізу, яка охоплює всі етапи життєвого циклу об'єкта будівництва — від добування сировини, виробництва матеріалів, будівництва, експлуатації до демонтажу та утилізації.

Цей підхід дозволяє оцінити сукупний екологічний, енергетичний і ресурсний вплив обраних конструктивно-технологічних та організаційних рішень, забезпечуючи прийняття оптимальних рішень на всіх стадіях проєкту. В контексті реконструкції він допомагає зрозуміти довгострокові наслідки використання певних матеріалів і технологій.

T_{11} - Аналіз вартості життєвого циклу (АВЖЦ, англ. Life Cycle Cost Analysis, LCC) [221] є підходом, що дозволяє оцінити не тільки початкові капітальні витрати на реконструкцію, а й довгострокові експлуатаційні витрати — включаючи витрати на опалення, електроенергію, технічне обслуговування і заміну компонентів протягом усього строку служби об'єкта, реконструкцію та демонтаж.. Під час вибору конструктивно-технологічного забезпечення при реконструкції LCC дозволяє порівняти альтернативні варіанти не лише за початковими капітальними витратами, а й з урахуванням витрат на енергію, ремонт, обслуговування та утилізацію, що дає змогу обрати економічно найдоцільніше рішення з мінімальними сумарними витратами на весь період експлуатації об'єкта.

T_{12} – Аналіз життєвого циклу (АЖЦ, англ. Life Cycle Assessment, LCA) фокусується на кількісному оцінюванні екологічних впливів на кожному етапі існування будівельного об'єкта. Він включає збір і аналіз даних про споживання енергії, викиди забруднюючих речовин, використання ресурсів і утворення відходів протягом усіх фаз життєвого циклу. Згідно з EN 15978 [185], АЖЦ є ключовим інструментом для прийняття екологічно доцільних рішень, оскільки дозволяє порівнювати альтернативні варіанти реконструкції, підтримує довгострокові інвестиції і стимулює сталий розвиток галузі. Водночас метод має певні обмеження, серед яких — недостатність вихідних даних, складність опису багатокомпонентних об'єктів і орієнтація переважно на оцінку енергоспоживання в експлуатаційний період.

Використання критеріїв АЖЦ та АВЖЦ дозволяє формувати ефективну конструктивно-технологічну систему реконструкції каркасних будівель, яка відповідає сучасним вимогам сталого розвитку та економічної доцільності.

T_2 – Інструменти екологічної оцінки – це системи сертифікації та аудиту, які дозволяють оцінити екологічні характеристики будівель і будівельних проектів відповідно до міжнародно визнаних стандартів сталого розвитку (наприклад, BREEAM [135], LEED [222], DGNB [134]). Вони забезпечують комплексну перевірку відповідності екологічним критеріям, таким як енергоефективність, управління водними ресурсами, якість внутрішнього середовища та використання матеріалів. Ці інструменти створюють додаткову екологічну цінність, що підвищує комерційну привабливість об'єкта — сертифіковані будівлі краще позиціонуються на ринку, легше залучають орендарів і мають вищу вартість. Також вони можуть виступати орієнтиром для архітекторів і інженерів при розробці екологічно орієнтованих проектів. Найбільш ефективними такі інструменти є у великих інвестиційно-будівельних проектах, тоді як їх застосування у дрібних реконструкціях або ремонтах менш виправдане через складність адаптації до локальних умов, таких як ділянка, існуюча забудова чи біорізноманіття.

Головна відмінність Інструментів екологічної оцінки від LCA полягає в їхньому призначенні та підході: LCA — це аналітичний метод, спрямований на кількісну оцінку сукупного екологічного впливу конкретного матеріалу, продукту чи технології на всіх стадіях життєвого циклу. Натомість Інструменти екологічної оцінки — це стандартизовані системи сертифікації, які перевіряють відповідність цілого об'єкта встановленим екологічним критеріям і надають сертифікат на основі незалежної експертної оцінки. LCA є більш гнучким інструментом аналізу альтернатив на етапі проектування чи реконструкції, тоді як системи сертифікації надають формалізоване підтвердження екологічної якості готового проєкту або будівлі.

T_3 - Планування терміну служби (Service Life Planning) є комплексним процесом проектування, спрямованим на забезпечення довговічності будівлі, яка відповідає або перевищує запланований проєктний строк експлуатації, із одночасною оптимізацією сукупних витрат протягом життєвого циклу об'єкта. Цей підхід базується на інтеграції методів аналізу життєвого циклу LCA,

прогнозування строків технічного обслуговування, планування реконструкцій, а також стратегій демонтажу, повторного використання і переробки конструкційних компонентів. Відповідно до ISO [126, 127, 137], планування повинно враховувати початковий вибір матеріалів, експлуатаційні навантаження, умови середовища та сценарії зміни функціонального призначення об'єкта. У випадку каркасних будівель, які підлягають багаторазовим реконструкціям унаслідок старіння або пошкоджень (зокрема, спричинених воєнними діями), застосування прогнозування строку служби дозволяє не лише підвищити ефективність реконструкції, а й мінімізувати екологічний вплив та забезпечити довготривалу експлуатацію з раціональним ресурсоспоживанням (Рис. 4.31).

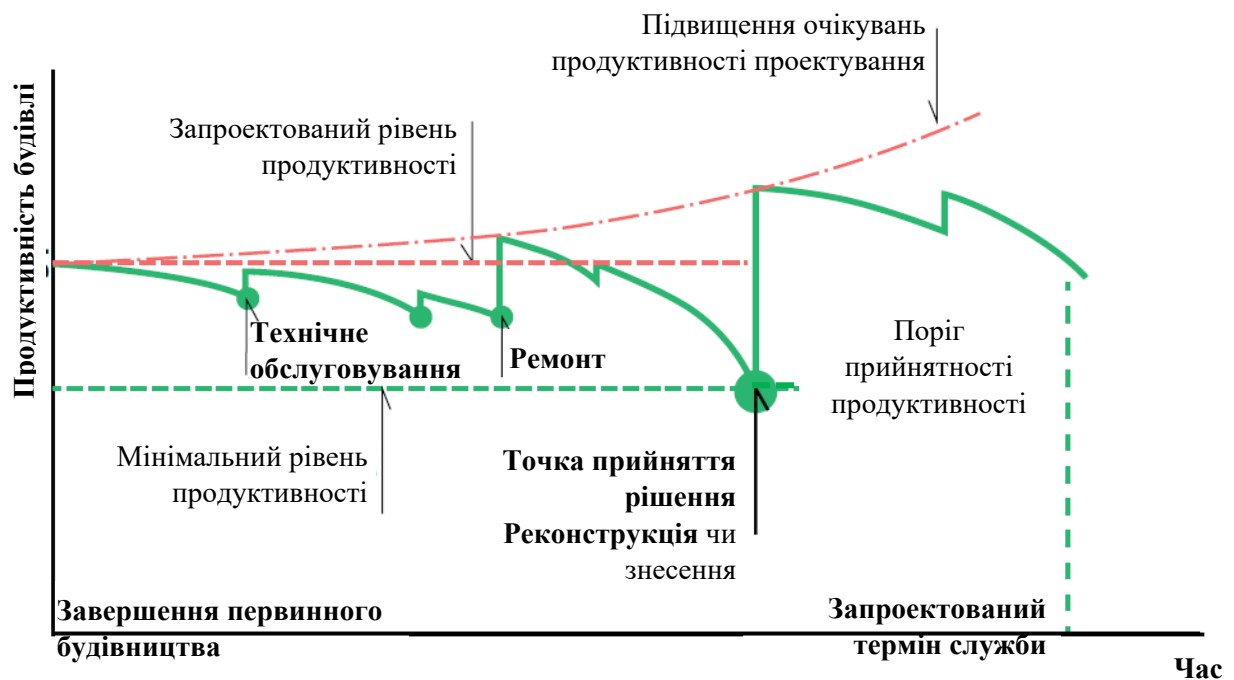


Рис. 4.31. Життєвий цикл будівлі [29]

Попри наявність нормативних засад, зокрема положень та рекомендацій ISO та ДСТУ [96, 126, 127, 137, 139, 146, 223-224], чинні стандарти здебільшого встановлюють загальні принципи без надання детальних алгоритмів, що враховують специфіку конкретних конструкцій і умов експлуатації. Врахування широкого спектра чинників — таких як варіативність властивостей матеріалів, кліматичні впливи, експлуатаційні режими та прогнозовані сценарії змін — істотно ускладнює точне прогнозування строку служби. Для підвищення

точності прогнозів доцільно застосовувати інтегроване проектування, яке включає: передбачення доступності технічного обслуговування [126, 127, 137], модульність конструктивних систем, а також можливість демонтажу й повторного використання матеріалів (відповідно до принципів циркулярної економіки, викладених у ISO [96]. Це потребує міждисциплінарної взаємодії проєктувальників, експлуатуючих організацій і інженерів уже на стадії проєктної документації для узгодження довговічності, технічного обслуговування та стратегій реконструкції об'єкта.

T₄– Збереження історичної споруди та забезпечення сталості. Реконструкція історичних споруд із каркасною конструктивною системою є надзвичайно складним завданням, що потребує поєднання принципів культурного збереження, структурної безпеки та сталого будівництва. Основною метою підсилення каркасів є забезпечення довговічності, експлуатаційної надійності та сейсмостійкості об'єкта при мінімізації втручань, що можуть порушити його автентичність. Відповідно до положень Венеційської хартії [225] та рекомендацій ICOMOS [226], підсилення конструкцій має ґрунтуватися на принципах мінімального впливу, оборотності втручань і сумісності нових матеріалів із історичними. При цьому критично важливо проводити всебічну технічну діагностику та оцінку залишкової несучої здатності каркасу за стандартами ISO [88] і ДСТУ [178, 227].

Підсилення може здійснюватися шляхом використання сучасних композитних матеріалів, сталевалюмінієвих елементів або бетонних ін'єкцій. Для каркасних систем зі значними ушкодженнями доцільно також застосовувати методи з'єднання нових несучих елементів із наявними за принципами ISO [96], що забезпечує можливість майбутнього демонтажу або повторного підсилення.

Крім структурної безпеки, проєкт підсилення повинен враховувати екологічні й соціальні аспекти відповідно до ISO [136]. Це включає використання матеріалів із низьким вуглецевим слідом, можливість повторного використання автентичних компонентів, а також захист місцевої екосистеми під час будівельно-монтажних робіт. Комплексне підсилення каркасів дозволяє досягти гармонії між

збереженням культурної спадщини, забезпеченням експлуатаційної придатності та довготривалої стійкості об'єкта.

T₅ – Бізнес-орієнтований підхід у сфері реконструкції будівель, зокрема під час підсилення каркасних конструкцій, полягає у стратегічному поєднанні економічної ефективності, управління життєвим циклом об'єкта та впровадження принципів сталого розвитку. Сучасна практика демонструє, що компанії дедалі частіше інтегрують екологічні, соціальні та управлінські (ESG) критерії у процес ухвалення інвестиційно-будівельних рішень, оскільки відповідальне ставлення до навколишнього середовища стає критично важливим чинником конкурентоспроможності. Особливо це актуально для реконструкції каркасних будівель, де важливо ефективно використовувати ресурси, мінімізувати будівельні відходи та знижувати екологічне навантаження через модернізацію існуючих конструкцій. Водночас власники комерційних і промислових об'єктів часто орієнтуються на короткострокову вигоду, уникаючи витрат на сталі рішення. Однак підсилення наявного каркаса сучасними технологіями може бути економічно доцільним — це дозволяє уникнути витрат на знесення і нове будівництво, водночас підвищуючи експлуатаційні характеристики об'єкта.

У цьому контексті застосування підсилюючих технологій, таких як композитні матеріали, зовнішнє армування полімерними волокнами (FRP) або використання високоміцного бетону, дозволяє продовжити строк служби каркасних систем без повного демонтажу чи заміни. Крім того, застосування принципів аналізу життєвого циклу LCA дозволяє оцінити вплив обраних підсилюючих рішень на експлуатаційні витрати, вуглецевий слід і можливості майбутньої утилізації.

Впровадження екологічно орієнтованих практик у процес підсилення каркасів має декілька бізнесових переваг. По-перше, це оптимізація витрат на матеріали, енергію та утилізацію завдяки мінімізації демонтажних робіт. По-друге, підвищення вартості об'єкта нерухомості завдяки покращеним експлуатаційним характеристикам і відповідності сучасним стандартам

енергоефективності. По-третє, об'єкти, модернізовані за принципами сталого розвитку, легше підлягають сертифікації за міжнародними екологічними стандартами (наприклад, BREEAM або LEED), що підвищує їхню інвестиційну привабливість.

T₆ – Орієнтований на користувача підхід реконструкції каркасних будівель полягає в адаптації конструкцій до змінюваних потреб користувачів, забезпечуючи комфорт, безпеку та функціональність протягом усього життєвого циклу об'єкта. При підсиленні каркасів враховуються не лише статичні вимоги, а й гнучкість для подальших змін планування та експлуатації: адаптивність і демонтаж [96], планування строку служби [88] та людиноорієнтоване проєктування. Це підвищує довговічність, ремонтпридатність і знижує експлуатаційні витрати. Вибір технологій підсилення має відповідати вимогам ДСТУ [69, 126, 178, 227] і Єврокод [74, 132, 133, 227], які регламентують оцінку стану і підсилення конструкцій з урахуванням безпеки та надійності.

Усі критерії підходів при виборі типу конструктивного-технологічного забезпечення під час реконструкції представлено множиною

$$T_i = (T_1, T_2, \dots T_i) \quad (4.12)$$

Усі критерії підходів при виборі типу КТР під час реконструкції безпосередньо впливають на формування чинників пріоритетів, які визначаються характером завдань реконструкції та обраною стратегією підсилення конструкцій. Зокрема, у контексті підсилення каркасних будівель, ці чинники є визначальними для оптимізації техніко-економічних і експлуатаційних показників об'єкта відповідно до ДСТУ [126], Єврокод [74, 132, 133, 227] та принципів життєвого циклу, викладених у ISO [137]. Чинники пріоритетів P_i :

P_1 – Надійність: забезпечення несучої здатності та довговічності підсилених конструкцій [5].

P_2 – Мінімізація експлуатаційних витрат: оптимізація технічного обслуговування та ремонтпридатність згідно з ISO [137].

P_3 – Мінімізація капітальних витрат: ефективність застосування технологій підсилення та матеріалів відповідно до Eurocode [50].

P_4 – Вплив на навколишнє середовище: зниження екологічного навантаження за рахунок екологічно обґрунтованих матеріалів і технологій [223].

P_5 – Естетичність і зовнішній вигляд: забезпечення гармонійної інтеграції підсиленних елементів у будівлю.

P_6 – Менша трудомісткість і потреби в обладнанні: вибір технологій підсилення, що мінімізують обсяги робіт і потребу в спеціалізованому устаткуванні.

P_7 – Найнижча загальна вартість: урахування вартості проектування, реалізації, експлуатації та демонтажу протягом життєвого циклу [182].

Збір і аналіз інформації щодо чинників пріоритетів подається у вигляді множини:

$$P_i = (P_1, P_2, \dots, P_i) \quad (4.13)$$

Процеси реконструкції, зокрема пов'язані із підсиленням несучих каркасів будівель, супроводжуються значною кількістю невизначеностей, які суттєво впливають на якість проєктних рішень, технологічне забезпечення та економічну ефективність заходів. Відповідно до положень ISO [228, 229] ідентифікація та оцінка ризиків є критично важливою на всіх етапах життєвого циклу інвестиційно-будівельного проєкту, особливо при втручанні в існуючі конструкції. Основні категорії ризиків невизначеності, характерні для реконструкції із підсиленням каркасів, включають:

F_1 – Ризики, пов'язані з вибором та застосуванням матеріалів і виробів для підсилення. Включають невідповідність фізико-механічних властивостей матеріалів проєктним вимогам, недостатню довговічність або обмежену

сумісність із існуючими конструкціями. Зазначені ризики можуть призводити до зниження надійності підсилення та скорочення терміну експлуатації будівлі.

F₂ – Технічні ризики, зумовлені недостатньою достовірністю обстеження конструкцій. Пов'язані з невизначеністю фактичного технічного стану існуючих елементів каркасу, наявністю прихованих дефектів, пошкоджень або деградації матеріалів, а також обмеженим досвідом застосування сучасних технологій підсилення [178]. Дані фактори ускладнюють коректне формування проєктних і технологічних рішень.

F₃ – Організаційно-технологічні ризики, пов'язані з порушенням ритмічності будівельного процесу. Виникають унаслідок змін технологічних рішень, затримок постачання спеціалізованих матеріалів, обмеженого доступу до конструкцій або недостатньої координації між учасниками процесу. Відповідно до ISO [231], зазначені ризики мають враховуватися на етапі планування графіків виконання робіт.

F₄ – Ризики недооцінки обсягів робіт обумовлені недостатнім обсягом вихідних даних та поверхневим характером обстеження, що може призводити до помилок у визначенні обсягів демонтажу, підготовчих операцій або необхідного ступеня підсилення. При виявленні прихованих пошкоджень виникає потреба у додаткових втручаннях, що впливає на вартість і строки реалізації проєкту.

F₅ – Ризики змін вимог до об'єкта реконструкції пов'язані зі змінами технічного завдання, функціонального призначення будівлі або експлуатаційних навантажень (наприклад, збільшення навантажень на перекриття чи інтеграція нових інженерних систем). Відповідно до ISO [137], ці фактори зумовлюють необхідність забезпечення адаптивності та гнучкості проєктних і технологічних рішень у довготривалій перспективі.

F₆ – Нормативно-правові та екологічні ризики включають зміни законодавчих і нормативних вимог щодо матеріалів, впровадження нових вимог з екологічного аудиту, технологій утилізації та повторного використання демонтованих конструкцій. Зокрема, впровадження положень Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності» (№ 3038-VI) [231] та ДСТУ ISO

14001:2015 [232] може впливати на технологічні рішення, вартість і організацію процесу реконструкції.

F_7 – Фінансово-економічні ризики зумовлені інфляційними процесами, коливанням вартості матеріалів і ресурсів, а також змінами умов фінансування проєкту. Відповідно [233] до фінансові ризики також включають можливі затримки постачань матеріалів (зокрема спеціалізованих анкерних систем, волоконних композитів тощо), які можуть призводити до зростання бюджету реконструкції.

Виділені фактори ризику формують систему обмежень і умов, у межах яких здійснюється формування та оптимізація конструктивно-технологічних схем підсилення каркасних будівель. Їх урахування є передумовою застосування формалізованих алгоритмів прийняття рішень, імітаційного моделювання та багатокритеріальної оцінки ефективності, надійності та сталості технологічних процесів. Фактори ризиків невизначеності представлено у вигляді множини:

$$F_i = (F_1, F_2, \dots, F_i) \quad (4.14)$$

Крім вищенаведеного, на вибір моделі технологічного процесу для конкретного випадку реконструкції каркасу впливають також:

SPP – Просторово-планувальні параметри (характеристики) зон підсилення каркасу (Spatial Planning Parameters). У подальшому вони розглядаються як узагальнена система параметрів SPP, яка формує середовище виконання робіт $\Omega_{\text{КТР}}$ і визначає умови реалізації техніко-технологічних (Т), організаційних (О), соціально-економічних (S_e) та природних (Р) факторів. Зазначена система параметрів використовується як вхідна інформація при формуванні та виборі моделей КТР підсилення каркасних будівель, тоді як її формалізація, кількісний опис і аналітичні залежності наведені у розділі 5.

Z – Вимоги замовника, які нерідко конфліктують з вимогами законодавства, однак компроміс може бути отримано за допомогою параметричних методів нормування в будівництві [130, 140];

Y – Нормативні вимоги, які включають регламентовані обмеження, функціональні та технічні вимоги по показників реконструйованого каркасу будівлі, вимоги до безпеки для життя і здоров'я всіх стейкхолдерів, зокрема пожежної;

$O_{\text{тех}}$ – Складність технічного обслуговування, що вплине на необхідність наявності додаткового персоналу, час та вартість, які будуть потрібні на виконання оглядів та ремонтів;

$X_{\text{жц}}$ – Вартість життєвого циклу;

J – Тривалість життєвого циклу;

S – Енергетичні та водні ресурси, що будуть витрачатись на протязі не тільки експлуатації, але і на час виконання будівельно-монтажних робіт з реконструкції.

На рис. 4.32 представлено систематизацію основних факторів, що впливають на формування технологічних моделей підсилення каркасних будівель з метою забезпечення якості під час реконструкції.

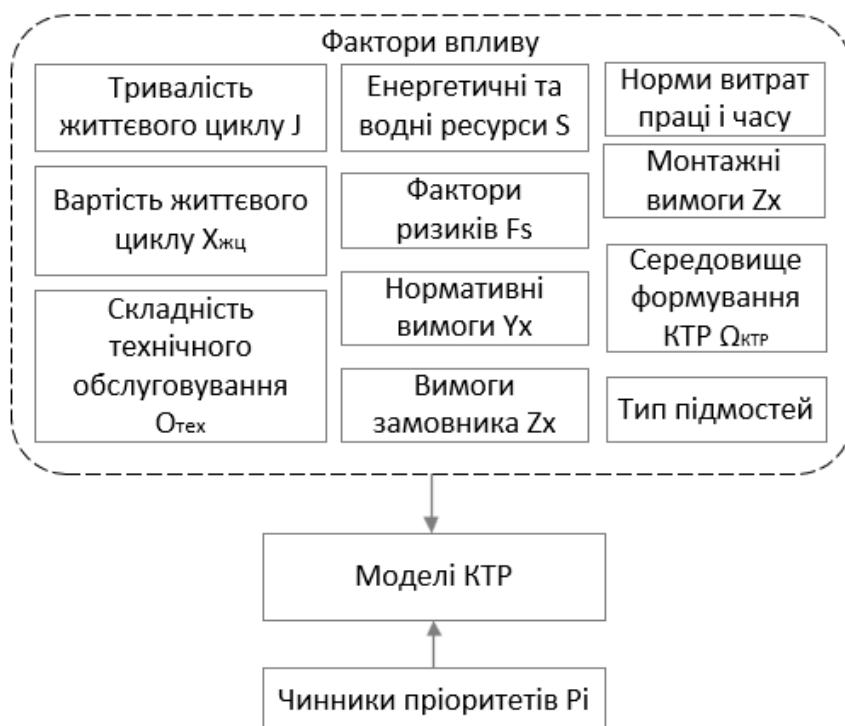


Рис.4.32. Системетизація факторів, що впливають на формування моделей КТР для забезпечення якості підсилення каркасних будівель

Висновки по четвертому розділу

1. У результаті проведеного аналізу встановлено, що дефекти та пошкодження елементів каркасних будівель формуються під впливом сукупності проєктних, технологічних, монтажних і експлуатаційних факторів, які проявляються на різних етапах життєвого циклу об'єкта. Показано, що дефекти є не лише наслідком окремих порушень, а індикаторами системних недоліків у проєктуванні, організації будівельного виробництва та експлуатації. Систематизовано основні види дефектів бетонних, залізобетонних і металевих конструкцій, а також встановлено їхній вплив на несучу здатність, жорсткість, довговічність і експлуатаційну придатність каркасів. Обґрунтовано доцільність класифікації дефектів за причинами виникнення, характером прояву (зовнішні та внутрішні, видимі та приховані), а також за ступенем впливу на безпеку та працездатність конструкцій. Запропонований функціональний підхід до опису дефектів у вигляді системи функцій D_i^R дозволяє пов'язати конкретні типи пошкоджень із відповідними техніко-технологічними, організаційними та експлуатаційними чинниками. Це створює методичну основу для подальшої ідентифікації факторів, що визначають якість підсилення каркасних будівель, та їх формалізації у вигляді системи критеріїв і показників для обґрунтованого вибору КТР у процесі реконструкції.

2. Пошкодження будівельних конструкцій є результатом розвитку дефектів у процесі експлуатації під дією механічних, температурних, хімічних і техногенних впливів та безпосередньо визначають втрату несучої здатності, жорсткості й стійкості каркасів. Систематизовано найбільш характерні прояви пошкоджень каркасів та обґрунтовано, що механізми пошкоджень істотно різняться залежно від матеріалу каркасу: для залізобетону домінують тріщиноутворення, деградація захисного шару та корозія арматури, а для металу – корозійне зменшення перерізів, втомні тріщини, локальні пластичні деформації та пошкодження вузлів і з'єднань. Запропоновано класифікацію пошкоджень за типами впливів (силові P_1 , температурні P_2 , хімічні/електрохімічні P_3 , вибухові P_4) із виділенням функціональних груп і підгруп для різних матеріалів каркасу.

Формалізація пошкоджень у вигляді множини P_i та їх систематизація за конструктивними елементами забезпечують уніфіковану діагностику технічного стану й створюють основу для прогнозування залишкового ресурсу та обґрунтованого вибору методів підсилення під час реконструкції.

3. Встановлено, що недосконале застосування матеріалів і виробів для підсилення конструкцій має системний характер і зумовлене людським фактором, недостатнім урахуванням умов експлуатації, порушеннями технології монтажу, а також недотриманням вимог щодо сумісності матеріалів і захисту конструкцій. Проведена систематизація типових технічних помилок при використанні металевих елементів, FRP-матеріалів і готових з'єднувальних виробів дозволила виділити основні групи факторів ризику, пов'язані з якістю матеріалів, умовами монтажу, впливом середовища, геометрією конструкцій та особливостями спільної роботи підсилення з основним елементом. Показано, що навіть застосування сучасних високоефективних матеріалів не гарантує позитивного результату без комплексного інженерного обґрунтування та контролю всіх етапів підсилення. Запропонована функціонально-структурна модель опису типових ризиків U_i та узагальнена залежність ефективності підсилення R дозволяють формалізувати вплив дефектів, пошкоджень і технологічних помилок на результат реконструкції. Це створює основу для інтеграції в систему підтримки прийняття рішень, спрямовану на мінімізацію ризиків, підвищення якості підсилення та забезпечення сталого функціонування каркасних конструкцій упродовж життєвого циклу будівлі.

4. Досліджено основні фактори, що впливають на ефективність і надійність високоміцних гнучких матеріалів, зокрема FRP, при їх застосуванні для посилення конструкцій. Визначено, що ключовими обмеженнями є відносно висока вартість, необхідність вогнезахисту, ризик відшарування, втомна міцність, особливості механічних навантажень, геометрія конструкцій та вплив агресивного середовища. Фактори класифіковано за їхнім впливом на довговічність, структурну цілісність та економічну доцільність використання

FRP-матеріалів. Оптимізація цих параметрів дозволяє підвищити ефективність та довговічність посиленних конструкцій.

5. Систематизовано внутрішні фактори, зокрема технологічні, естетичні та економічні, що визначають довговічність та ефективність експлуатації будівлі. Також класифіковано зовнішні фактори, серед яких екологічні, економічні, правові, політичні та конструктивно-технологічні аспекти, що формують стратегії підходу до підсилення каркасних конструкцій. Виявлено та систематизовано чинники, що впливають на строк експлуатації будівлі, включаючи оцінку змін конструкцій, прогнозування довговічності матеріалів та ефективності технологічних рішень. Розгляд цих факторів як сукупності функцій дозволяє прогнозувати довгострокову поведінку каркасу будівлі протягом всього життєвого циклу та необхідність у підсиленні його елементів. Сформувано систему факторів, які впливають на технічний стан елементів каркасу будівлі, яка є критично важливою для вибору стратегій реконструкції та забезпечення якості підсилення конструкцій.

6. Відібрано основні фактори, що впливають на формування КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель, які забезпечують стабільність, безпеку та комфорт усіх учасників процесу, мінімізують негативний вплив на довкілля та здоров'я людей, сприяють сталому розвитку будівельної галузі, а також враховують економічну ефективність, надійність і екологічну безпеку технологічних рішень. Важливими критеріями є оцінка життєвого циклу будівлі, використання екологічних інструментів, збереження історичних споруд та економічна ефективність. Оптимальний вибір технологій забезпечує безпечні умови праці, зменшення експлуатаційних витрат і підвищення якості реконструкції, що потребує індивідуального підходу для створення стійких і ефективних рішень.

7. Основні результати розділу викладені роботах [23, 55, 56, 77, 97, 98, 201, 249, 286].

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ФОРМУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПІДСИЛЕННЯ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ

5.1. Організація процесів обстеження, проєктування та виконання робіт по підсиленню каркасних будівель

Процеси обстеження, проєктування та виконання робіт з підсилення каркасних будівель у межах реконструкції належать до складних багатоетапних систем, що характеризуються високою невизначеністю вихідних даних, обмеженими просторово-планувальними умовами та необхідністю виконання робіт у функціонуючому або частково функціонуючому середовищі. За таких умов ефективність реалізації реконструкційних проєктів значною мірою визначається не окремими технічними рішеннями, а рівнем організаційно-технологічної узгодженості між етапами обстеження, проєктування та виконання робіт.

Аналіз існуючих підходів [34-38, 48, 56, 178] свідчить, що у практиці реконструкції каркасних будівель зазначені етапи, як правило, розглядаються відокремлено: результати обстеження використовуються переважно як вхідні дані для проєктування, а організація виконання робіт формується вже на стадії будівельно-монтажних процесів. Такий лінійний підхід не забезпечує зворотного зв'язку між етапами, ускладнює адаптацію технологічних рішень до реальних умов об'єкта та призводить до перевитрат трудових, матеріальних і енергетичних ресурсів, а також до зниження продуктивності та подовження строків реконструкції.

В умовах масової реконструкції та відновлення існуючого будівельного фонду, зростання вимог до безпеки, якості та термінів виконання робіт, особливої актуальності набуває необхідність переходу від фрагментарної організації процесів до інтегрованої моделі управління реконструкцією. Така

модель має враховувати взаємозв'язок між результатами обстеження, вибором конструктивно-технологічних рішень, організацією виконання робіт та умовами функціонування об'єкта протягом усього життєвого циклу.

Життєвий цикл каркасної будівлі в умовах реконструкції охоплює взаємопов'язані етапи передінвестиційної підготовки, проєктування, виконання будівельно-монтажних робіт, експлуатації та завершення життєвого циклу (табл. 5.1). У межах інвестиційно-будівельного проєкту реконструкції ключове значення мають етапи обстеження та проєктування, оскільки саме на них формується інформаційна та організаційно-технологічна основа для подальшого вибору методів підсилення каркасу, визначення обсягів робіт, ресурсних потреб і критеріїв якості.

Як показано в табл. 5.1, прийняті на ранніх стадіях рішення безпосередньо впливають не лише на тривалість і вартість виконання робіт, а й на ефективність експлуатації та життєвий цикл будівлі в цілому. Тому процеси обстеження, проєктування і реалізації підсилення доцільно розглядати не ізольовано, а як єдину керовану систему в структурі життєвого циклу реконструкції.

Григоровський П.Є. підкреслює, що важливою складовою отримання об'єктивної інформації для прийняття технічно обґрунтованих рішень є ефективні методи вимірювань [20]. Саме від точності та достовірності цих вимірювань залежать рішення, що впливають на збереження експлуатаційних характеристик будівлі та її подальший строк служби. Якісне обстеження, геодезичні дослідження, випробування конструкцій і матеріалів дають змогу не лише виявити наявні дефекти, а й визначити найдоцільніші шляхи підсилення елементів каркасу.

На відміну від традиційних підходів, у яких організація процесів обстеження, проєктування та виконання робіт розглядається як послідовність незалежних стадій, у даному дослідженні ці процеси інтерпретуються як єдина керована система. Такий підхід передбачає формування організаційно-технологічних рішень на основі формалізованих параметрів середовища, просторово-планувальних характеристик зон підсилення та нормоутворюючих

факторів, що забезпечує можливість адаптації технологічних схем, скорочення тривалості робіт і підвищення ефективності використання ресурсів без зниження рівня надійності та якості підсилення.

Таблиця 5.1

Узагальнена модель життєвого циклу інвестиційно-будівельного проєкту
реконструкції каркасної будівлі

Фази	Етапи життєвого циклу	Опис
Передінвестиційна		• Маркетинг (дослідження) • Концепція (ТЕО) • План управління проєктом • Розрахунок підсумкової вартості життєвого циклу будівлі, що реконструюється, з урахуванням капітальних та операційних витрат • Основні технічні рішення • Уточнення вихідних даних і розробка ТЗ
Інвестиційна	Етап виготовлення продукції	• Вихідна дозвільна документація • Отримання прав на розміщення об'єкта будівництва або реконструкції • Вишукувальні роботи • Розробка проєктної документації стадії П та стадії Р • Постачання сировини • Транспортування • Виробництво • Вибір підрядної організації
	Процес будівництва	• Виконання будівельно-монтажних робіт • Авторський нагляд
Операційна	Експлуатація	• Виконання пуско-налагоджувальних робіт • Введення в експлуатацію • Експлуатація • Технічне обслуговування • Ремонт • Заміна • Реконструкція
Кінець життєвого циклу	Кінець життєвого циклу	• Демонтаж, знесення • Транспортування • Переробка відходів • Утилізація

На підставі попереднього огляду об'єкта формується робоча програма детального обстеження окремих конструктивних елементів і каркасу будівлі в цілому, яка визначає обсяг, послідовність та методи виконання досліджень. На цьому етапі ключового значення набуває обґрунтований вибір технологічних рішень щодо способів проведення обстеження з урахуванням просторово-планувальних умов, доступності елементів та вимог безпеки.

Методи обстеження каркасів, як зазначено в розділі 2.4, поділяються на візуальні та інструментальні (рис. 5.2) [32, 34-36, 56, 178, 196]. Водночас у практиці реконструкції доцільним є застосування комбінованого підходу, за якого обидва типи методів використовуються узгоджено на різних ділянках конструкції. Такий підхід забезпечує підвищення повноти та достовірності отриманої інформації, зокрема щодо дефектів, локалізованих у важкодоступних або прихованих зонах.

У ділянках із забезпеченим доступом, де можливе безпечне встановлення риштувань або підмостей, доцільно поєднувати візуальну оцінку з інструментальними вимірюваннями фізико-механічних характеристик матеріалів та параметрів напружено-деформованого стану. Натомість у важкодоступних зонах каркасу ефективним є застосування спеціалізованих засобів обстеження, зокрема дистанційних та безконтактних методів, лазерного сканування, сенсорних систем і інших сучасних інструментальних технологій, що дозволяють мінімізувати втручання у функціонування об'єкта та підвищити безпеку виконання робіт.

Важливим організаційним кроком у процесі підсилення каркасних будівель є забезпечення безперервності інформаційного супроводу між етапами обстеження, проєктування та виконання робіт. Перерви, зумовлені розробкою проєктно-кошторисної документації, погодженням дозвільної бази або підготовчими заходами, можуть призводити до простоїв на будівельному майданчику та повторної мобілізації ресурсів. У таких умовах ефективно планування логістики і координація дій між учасниками процесу набувають визначального значення, оскільки дозволяють мінімізувати непродуктивні

витрати часу і коштів, пов'язані з неузгодженістю робіт або очікуванням виконання суміжних операцій.

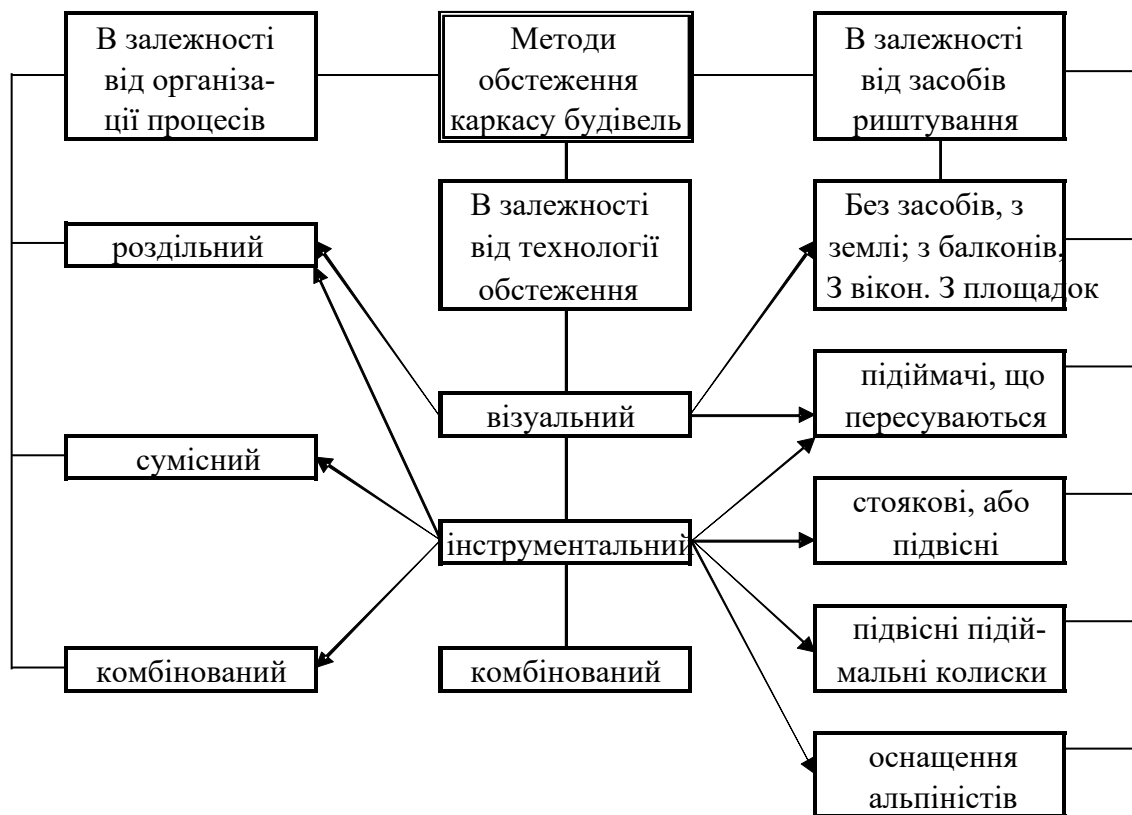


Рис. 5.1. Класифікація методів обстеження каркасу будівель

У практиці реконструкції застосовуються дві основні організаційно-технологічні стратегії — сумісна та роздільна. Сумісна технологія передбачає паралельне виконання окремих етапів обстеження і проектної підготовки з активним використанням інструментальних засобів як базового, так і спеціалізованого рівнів (механічні індикатори, ультразвукові товщиноміри, дефектоскопи, георадарні та термографічні системи). Застосування такого підходу дозволяє досягти імовірності виявлення прихованих дефектів на рівні 70–85%, що істотно підвищує достовірність технічної оцінки та обґрунтованість прийнятих проектних рішень.

Роздільна технологія, навпаки, ґрунтується на послідовному виконанні робіт, за якого повноцінне обстеження передуює проектуванню і подальшій реалізації реконструкційних заходів. У такому випадку доцільним є збереження

тимчасових конструкцій — риштувань або підмостей — на період виконання будівельно-монтажних робіт. Найбільш ефективно цей підхід реалізується за умови залучення однієї спеціалізованої організації для обстеження та ремонту, що забезпечує спадкоємність технічних рішень і зменшує ризик втрати інформації.

Незалежно від обраної стратегії, визначальним чинником якості обстеження є рівень кваліфікації виконавців. Візуальний огляд, який іноді здійснюється експлуатаційними службами, не може розглядатися як самодостатній і допустимий метод оцінювання технічного стану несучих конструкцій. Такі роботи повинні виконуватися виключно фахівцями сертифікованих організацій, що володіють необхідною компетенцією та сучасними засобами контролю, здатними мінімізувати ризик критичних помилок у діагностиці.

Окрему увагу слід приділяти підготовці вимірювальних систем і засобів доступу до конструкцій. У низці випадків замість традиційних риштувань доцільним є застосування альпіністського спорядження з можливістю стаціонарної фіксації на несучих елементах. За умови передбачення таких рішень на етапі обстеження вони можуть бути використані в подальшому для планових інспекцій або виконання ремонтних робіт протягом експлуатації будівлі.

Аналіз результатів повторних обстежень каркасів показує, що ймовірність помилки при виборі організаційно-технологічних рішень може досягати 45% на етапах планування та реалізації реконструкції. Помилки, зокрема, завищення або заниження обсягів підсилення може призвести до зайвих витрат на виготовлення додаткової оснастки, форм і монтажного обладнання, що не лише підвищує вартість реконструкції, а й затягує терміни.

Варіант технології суміщення чи розділення обстеження та ремонту багато в чому залежить від обраних засобів доступу до елементів каркасу, їхньої повторної придатності та ефективності з погляду техніко-економічного аналізу. Водночас, найвищу точність оцінки технічного стану забезпечує інструментальний метод в умовах роздільної технології, оскільки дає змогу

проводити глибокий аналіз впливу дефектів на несучу здатність та довговічність конструкцій, а також врахувати умови подальшої експлуатації.

Таким чином, при розробці ефективних рішень щодо організації та виконання реконструкційних робіт важливо враховувати не лише точність методів обстеження, а й логіку функціонування всієї системи організаційно-технологічних рішень (ОТР). Як зазначено у роботах Черненка В. К. [48, 234, 235], функціонування такої системи визначається її структурою, однак при цьому сама система не зумовлює єдиної структури. Іншими словами, одна й та сама функція може бути реалізована різними організаційно-структурними підходами, залежно від конкретних умов об'єкта та поставлених цілей.

У випадку реконструкції каркасної будівлі, система ОТР виступає як комплексний, багаторівневий процес, що поєднує в собі низку взаємопов'язаних складових. Практичний досвід виконання подібних робіт свідчить, що до ключових елементів цього процесу належать: технологічні процеси обстеження каркасу; підготовка до виконання основних робіт; виготовлення та постачання будівельних матеріалів і конструкцій; безпосереднє виконання робіт з підсилення та реконструкції.

У формалізованому вигляді комплексний процес реконструкції може бути представлений як множина взаємозалежних підпроцесів, які реалізуються у певній послідовності або паралельно, з урахуванням технічних, часових, економічних та просторових обмежень:

$$ОТР = \{O, B, П, TP\} \quad (5.1)$$

де: О – рішення з технології обстеження каркасу будівлі (О_л – обстеження з використанням лазерного сканування, побудова BIM-моделі з індикацією дефектів і пошкоджень; О_о — візуальне (оптичне) обстеження фасадів з землі або з простих риштувань).

В – рішення щодо доставки та підготовки матеріалів, конструкцій, елементів для підсилення;

П – рішення з підготовки до виконання реконструкційних робіт: монтаж/переміщення риштувань, встановлення вантажопідіймальних механізмів тощо;

ТР – рішення з технології підсилення елементів каркасу будівлі під час реконструкції.

Організаційно-технологічні варіанти підсилення елементів каркасу формуються як певні комбінації взаємозалежних підпроцесів: обстеження (О), доставки матеріалів (В), підготовки (П) та безпосереднього підсилення конструкцій (ТР). Конкретні варіанти таких комбінацій відображено на рис. 5.2.

У варіанті (а) процеси обстеження та реконструкції організовані окремо. Зокрема, передбачається дворазове встановлення риштувань – спочатку для обстеження, а потім для виконання ремонтно-будівельних робіт (див. рис. 5.2, а). Такий підхід є малоефективним через підвищення витрат часу та ресурсів, але у деяких випадках (наприклад, при значній невизначеності стану конструкцій) він є доцільним.

У варіанті (б) передбачається сумісна організація процесів обстеження, виробництва і робіт з реконструкції (див. рис. 5.2. б). Таке організаційне рішення можливе, коли наявність дефектів очевидна і без спеціального дослідження, що дозволяє почати разом обстеження і виробництво. Риштування та вантажопідіймальні механізми устанавлюють лише в одному циклі, і за рахунок цього досягається економічний ефект.

У варіанті (в) процес реконструкції передбачає попередній візуальний огляд елементів каркасу із землі або з простих риштувань, після чого всі етапи – обстеження, доставка, підготовка та підсилення – реалізуються суміщено (див. рис. 5.2, в). Такий підхід забезпечує достатню точність, дозволяє ретельно спланувати роботи та мінімізувати витрати.

У варіанті (г) технологія є розвитком підходу, реалізованого у варіанті в, проте всі процеси реконструкції каркасу організовуються у потоковому режимі за захватками — окремими ділянками або смугами каркасу будівлі (див. рис. 5.2, г). Такий підхід забезпечує максимальну виробничу ефективність, дозволяє

скоротити загальну тривалість робіт, оптимізувати використання трудових ресурсів, зменшити витрати та реалізувати чіткий ритм виконання. З точки зору організації виробництва, цей варіант є найраціональнішим.

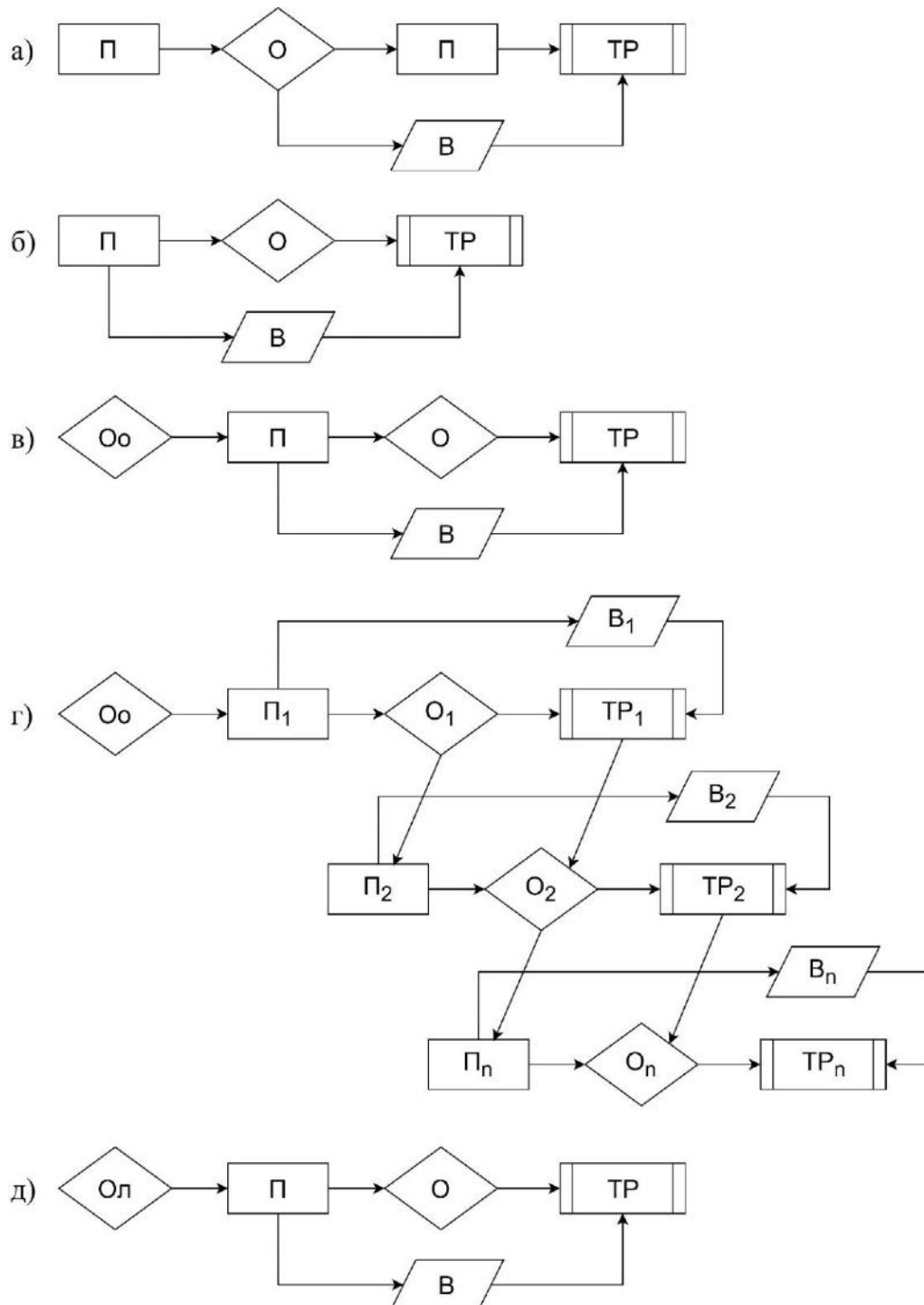


Рис. 5.2. Варіанти ОТР підсилення елементів каркасу при реконструкції будівлі:
а – роздільна технологія; б – суміщена без попереднього аналізу; в – суміщена з попереднім візуальним оглядом; г – суміщена з організацією робіт за захватками; д – з лазерним 3D-скануванням та BIM-моделюванням

У варіанті (д) обстеження здійснюється за допомогою лазерного 3D-сканування з подальшим формуванням BIM-моделі будівлі, яка містить детальну інформацію про стан каркасу та фіксацію дефектів (див. рис. 5.2, д). На цьому етапі рихтування не застосовується — воно планується лише у разі потреби, визначеної за результатами аналізу моделі. Далі, на основі BIM-моделі, оптимізується технологія виконання робіт і підбирається обладнання. Цей варіант забезпечує найвищу точність обстеження, ефективне планування та раціональне використання ресурсів вже на підготовчому етапі, тому вважається найпрогресивнішим і найефективнішим у плануванні та управлінні процесом реконструкції.

При прогнозуванні розвитку технологічного процесу реконструкції завжди виникає так званий інерційний сценарій – найбільш імовірний перебіг подій, який реалізується за умови відсутності активного втручання з боку учасників будівельного процесу. Перехід до більш ефективних, хоча менш імовірних сценаріїв, як правило, потребує цілеспрямованих організаційних і технологічних зусиль.

Для обґрунтованого вибору ефективних ОТР необхідно провести дослідження основних техніко-економічних показників: трудомісткості, тривалості, собівартості виконання робіт, а також експлуатаційних витрат, що виникають при застосуванні різних способів підсилення. Важливим етапом є встановлення впливу факторів, ідентифікованих на попередніх етапах дослідження, на зазначені показники. Зокрема, слід здійснити відбір найбільш значущих чинників та обрати надійне і раціональне КТР, що відповідає умовам конкретного об'єкта.

Для формування ОТР та оцінки ефективності комплексного технологічного процесу доцільно проаналізувати кожен складову частину процесу окремо, зокрема, в аспекті її трудомісткості. Встановлено, що серед техніко-технологічних факторів вирішальне значення мають: характер і тип дефектів або пошкоджень, ступінь їх розвитку, категорія стану несучих конструкцій, а також складність і специфіка застосовуваних технологій.

Розробка ефективної технології підсилення конструкцій повинна базуватися на глибокому аналізі механізмів зношення та пошкоджень, що виникли в процесі монтажу або експлуатації будівлі.

Алгоритм формування структури організаційно-технологічних рішень передбачає формалізацію трьох ключових компонентів, які комплексно впливають на загальний технологічний процес реконструкції будівель M_{Tn} :

M_{KTi} – множина конструктивно-технологічних рішень;

M_{OTj} – множина організаційно-технологічних рішень;

V_{jk} – множина факторів ініціювання підсилення.

$$M_{Tn} = \Psi(V_{jk}), \quad (5.2)$$

Взаємозв'язок між цими множинами формує основу для побудови комплексної моделі управління реконструктивними впливами. Формалізація таких зв'язків доцільна з використанням апарату теорії множин [22].

У випадку трьох множин (M_{KTi} , M_{OTj} і V_{jk}) їх структурну взаємодію можливо наочно представити за допомогою діаграми Венна, де використовуються три кола, які перетинаються, формуючи як унікальні, так і спільні області, як показано на рис. 5.3. Центр перетину множин відображає узагальнений процес, який поєднує:

- чинники ініціювання підсилення конструкцій V_{jk} ,
- та синтез рішень $M_{KTi} \cap M_{OTj}$.

Цей синтез є основою для формування комплексу КРІСТ (Комплекс Рішень Ініціації, Стратегії та Технологій CRIST — Complex of Resolutions for Initiation, Strategy, and Technologies), який забезпечує цілісність і керованість технологічного процесу реконструкції та підсилення будівельних конструкцій:

$$CRIST = M_{KTi} \cap M_{OTj} \cap V_{jk} \quad (5.3)$$

Конструктивно-технологічний процес і організаційно-технологічний процес складаються з множин відокремлених технологічних операцій нижчого рівня:

$$M_{KTi} = \{ u_1, u_2, \dots, u_k \} \quad (5.4)$$

$$M_{OTi} = \{ p_1, p_2, \dots, p_m \} \quad (5.5)$$

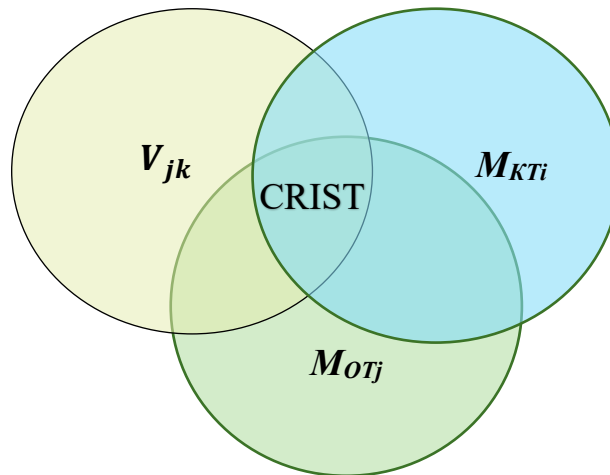


Рис. 5.3. Діаграма структурно-функціональної взаємодії моделей M_{KTi} , M_{OTj} та факторів ініціювання підсилення V_{jk} у складі комплексу КРІСТ

Множина факторів, що ініціюють необхідність виконання робіт з підсилення каркасу будівлі V_{jk} , розглянута в розділі 3.6, включає технічні, функціональні, безпекові та інноваційні групи причин і підстав. Зокрема, до них належать дефекти, ушкодження, зниження несучої здатності, а також функціональні зміни або вимоги безпеки та сталого розвитку. Кожна з груп чинників характеризується відповідними підгрупами, які мають безпосередній вплив на формування структури M_{Tn} :

$$V_{jk} = \{ V_1, V_2, \dots, V_n \} \quad (5.6)$$

де $V_1, V_2, \dots, V_n$ – групи і підгрупи факторів ініціювання підсилення каркасу.

Взаємозв'язок між множинами (V_{jk}) , (M_{kTi}) і (M_{OTj}) формується через відношення R_{ij} , що визначається декартовим добутком:

$$B_{n,m} = V_{jk} \times M_{kTi} \times M_{OTj} = [(v_1, u_1, p_1), (v_2, u_2, p_2), \dots, (v_n, u_k, p_m)] \quad (5.7)$$

Елементами нової множини варіантів рішень $(B_{n,m})$ є впорядковані трійки елементів множин (V_{jk}) , (M_{kTi}) і (M_{OTj}) . Зв'язок між цими множинами ґрунтується на індуктивному підході, що дозволяє формувати відповідні рішення на основі аналізу типу та ступеня ушкодження конструкцій. Для систематизації таких відношень використовується логічна матриця (табл. 5.1), побудована за принципом декартового добутку множин. Така матриця відображає всі можливі комбінації взаємозв'язків між елементами множин і формує ефективну основу для прогнозування оптимальних сценаріїв підсилення каркасу під час реконструкції будівельних.

Таблиця 5.1

Загальний вигляд логічної матриці відношень між факторами причин ініціювання робіт V_{jk} та моделями M_{kTi} і M_{OTi} , при підсиленні каркасу будівлі

V_{jk}	Конструктивно-технологічне рішення (M_{kTi})				Організаційно-технологічне рішення (M_{OTj})			
	u_1	u_2	...	u_k	p_1	p_2	...	p_m
V_1	0	1	...	0	0	1	...	0
V_2	1	0	...	1	1	0	...	1
V_3	0	1	...	0	0	1	...	0
V_4	1	1		1	1	1		1
...	...	...	...	...	...	...	...	...
V_n	1	1	...	0	0	1	...	0

Логічна матриця задається формулою:

$$R(x, y, z) = [(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_n, y_n, z_n)] \quad (5.8)$$

де R - відношення, (x_i, y_i, z_i) - комбінація значень логічних змінних x, y, z , що відповідають елементам множин (V_{jk}) , (M_{KTi}) і (M_{OTj}) , кожна комбінація (x, y, z) представляє один рядок матриці.

Наприклад, якщо ми використовуємо загальний вигляд логічної матриці з попереднього виразу, формула може мати наступний вигляд:

$$R(x, y, z) = [(1, 1, 1), (1, 1, 0), (1, 0, 1), (1, 0, 0), (0, 1, 1), (0, 1, 0), (0, 0, 1), (0, 0, 0)]$$

Зазначена формула використовується для опису структури логічної матриці та представлення відношень між логічними змінними. Залежно від конкретного контексту та потреб, формула може змінюватися.

Для побудови цієї матриці використано логічну змінну, що фіксує наявність або відсутність відповідності між конкретними варіантами M_{KTi} та M_{OTj} :

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{коли } (u_i, p_j) \in R, \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (5.9)$$

$R[i][j] = x \wedge y \wedge z$, де $\wedge$ - позначає операцію кон'юнкції (логічне І), тобто $R[i][j]$ буде *True* (1), якщо всі змінні x, y і z мають значення *True* (1), і *False* (0) в іншому випадку.

Для ефективної організації процесів обстеження, проектування та виконання робіт із підсилення каркасних будівель застосовується формалізований підхід, що ґрунтується на системному аналізі множини факторів ОТР. У результаті дослідження встановлено 11 основних груп чинників, кожна з яких містить відповідні параметри, що характеризують їхній вплив на формування технологічних моделей реконструкції. МОТ не формують стратегічні цілі реконструкції, а забезпечують реалізацію обраної структури КТР на операційному рівні. За характером впливу на процес реконструкції моделі МОТ доцільно поділити на дві узагальнені групи (рис. 5.4) з відповідними множинами моделей M_{OTj} .

M_{OT1} – моделі реалізації КТР. Ця група охоплює організаційно-технологічні моделі, що безпосередньо забезпечують реалізацію методів підсилення, відновлення або заміни елементів несучого каркасу будівлі (Рис. 5.5):

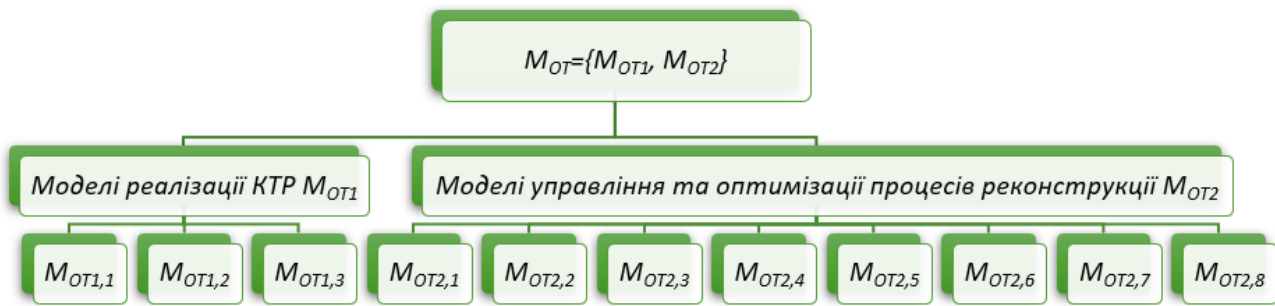


Рис. 5.4. Систематизація моделей ОТР при підсиленні каркасних конструкцій

$M_{OT1,1}$ – модель технологічної реалізації систем підсилення, яка забезпечує обґрунтування способів виконання робіт із використанням обраних сталевих або композитних систем підсилення з урахуванням технічного стану конструкцій, умов виконання робіт, технологічних обмежень, трудомісткості та ефективності процесу реконструкції.

$M_{OT1,2}$ – модель проєктування нового або модифікованого несучого каркасу, що застосовується у випадках повної або часткової заміни елементів каркасу, ліквідації окремих конструкцій або зміни конструктивної схеми будівлі. Модель базується на результатах технічного обстеження, розрахункового аналізу, оцінці надійності, довговічності та відповідності нормативним вимогам і забезпечує формування раціональної конструктивної схеми реконструйованого об'єкта.

$M_{OT1,3}$ – модель керованого зниження навантажень на конструкції, що передбачає реалізацію тимчасових або постійних конструктивних, технологічних та організаційно-експлуатаційних заходів з метою продовження ресурсу конструкцій, забезпечення безпечної експлуатації та підвищення ефективності процесів підсилення.

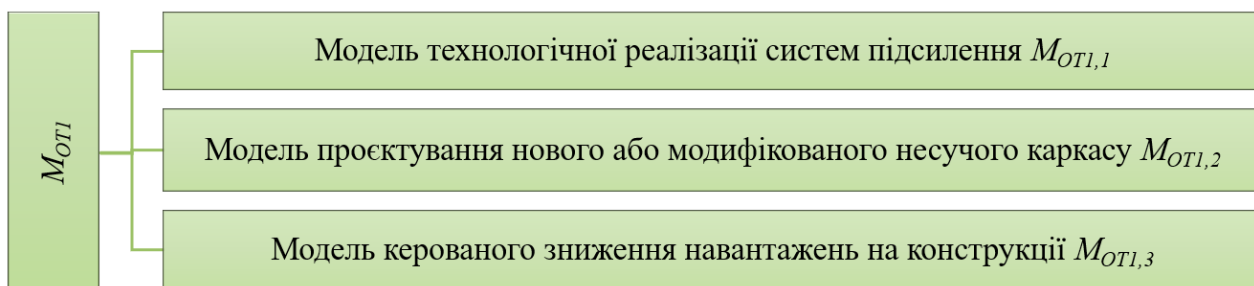


Рис. 5.5. Структурна схема систематизації моделей реалізації КТР у процесі реконструкції M_{OT1}

M_{OT2} – моделі управління та оптимізації процесів реконструкції. Ця група охоплює моделі, спрямовані на оптимізацію техніко-економічних показників, управління якістю, ризиками та ресурсними потоками (Рис. 5.6):

$M_{OT2,1}$ – модель проектування та планування включає в себе обстеження, проектування та планування робіт з реконструкції, визначення необхідного обладнання та матеріалів, а також координацію робіт на будівельному майданчику.

$M_{OT2,2}$ – модель управління проектом, що забезпечує координацію учасників, контроль строків, бюджету та досягнення заданих показників ефективності.

$M_{OT2,3}$ – модель управління якістю, спрямована на забезпечення відповідності робіт і матеріалів нормативним та проектним вимогам, контроль технологічних параметрів і надійності результатів підсилення. $M_{OT2,3}$ гарантує, що всі процеси реконструкції відповідають встановленим нормативним та якісним вимогам, і може бути інтегрована або накладена на інші моделі як контрольний механізм.

$M_{OT2,4}$ – модель управління ризиками, яка базується на аналізі факторів ризику F_s , оцінці ймовірності та наслідків небажаних подій і формуванні заходів їх мінімізації.

$M_{OT2,5}$ – модель впровадження Lean-технологій, орієнтована на оптимізацію виробничих потоків, скорочення втрат часу, матеріалів та ресурсів, а також підвищення продуктивності праці.

$M_{OT2,6}$ – модель системного техніко-економічного аналізу, що дозволяє порівнювати альтернативні організаційно-технологічні рішення за показниками вартості, тривалості, трудомісткості та співвідношення CAPEX/OPEX.

$M_{OT2,7}$ – BIM-орієнтована модель, яка забезпечує створення інформаційної моделі каркасу будівлі, аналіз альтернативних сценаріїв реконструкції, просторово-часову координацію робіт та оцінку впливу прийнятих рішень протягом життєвого циклу.

$M_{OT2,8}$ – модель застосування технологій «людина–машина», що передбачає використання інтелектуального обладнання, механізованих і роботизованих засобів для підвищення безпеки, точності та продуктивності виконання робіт.

Моделі M_{OT} застосовуються не ізольовано, а у вигляді гнучких комбінацій, що адаптуються до складності об'єкта, масштабу втручання, вимог до термінів, бюджету та рівня технічного ризику. Одна і та сама функція може реалізовуватися різними комбінаціями моделей M_{OT} , що формує множину допустимих альтернатив організації реконструктивного процесу.

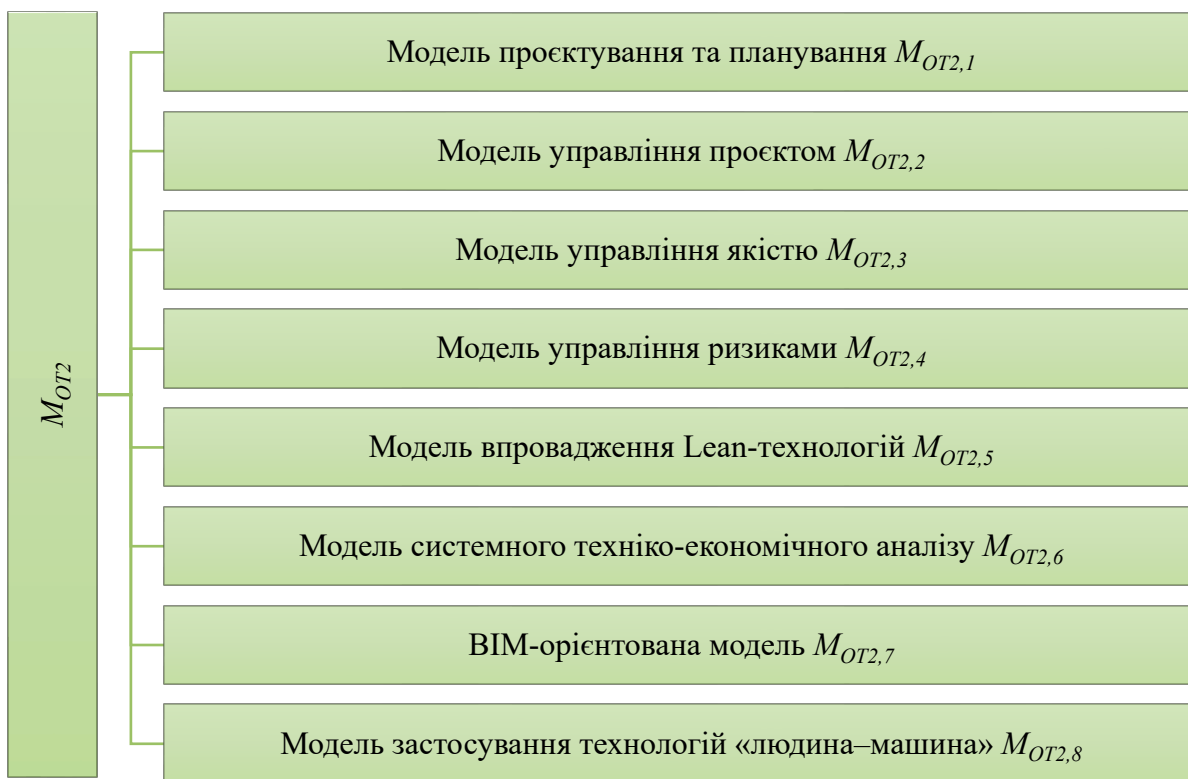


Рис. 5.6. Структурна схема систематизації моделей управління та оптимізації процесів реконструкції M_{OT2}

Збір і аналіз інформації щодо основних M_{OT} подається у вигляді множини:

$$M_{OT} = (M_{OT1i}, M_{OT2j}) \quad (5.10)$$

У межах кожної групи M_{OTi} виділено підгрупи ключових функцій M_{OTik} , які пов'язані з функціями основних M_{OT} .

Фактично у межах КТС реалізуються три рівні прийняття рішень:

- стратегічний — визначення підходу до реконструкції $V_j \rightarrow T_x$;
- тактичний — багатокритеріальна оцінка альтернатив за критеріями R_i, N_i, A_i ;
- операційний — вибір і реалізація конкретних моделей M_{KTi} / M_{OTi} .

Такий підхід забезпечує узгодження технічних, організаційних, економічних та екологічних аспектів реконструкції та формує цілісну, адаптивну систему прийняття рішень у межах КТС.

Наведені вище варіанти організації технологічного процесу підсилення елементів несучого каркасу (рис.5.2), які передбачають різну структуру виконання і набір пріоритетних чинників, можуть бути реалізовані через відповідні організаційно-технологічні моделі M_{OT} , що визначають характер планування, управління, вибору матеріалів, контролю якості, аналізу ризиків та застосування цифрових технологій. Наприклад, для роздільної технології (варіант а) найбільш доцільними є моделі $M_{OT2,1}$ (планування), $M_{OT2,2}$ (управління проектом) та $M_{OT2,3}$ (контроль якості), що забезпечує поетапність виконання робіт і жорсткий контроль якості.

У випадку суміщених технологій (варіанти б, в, г), ефективність реалізації підсилення досягається шляхом використання моделей $M_{OT1,1}$, $M_{OT2,2}$, $M_{OT2,3}$, $M_{OT2,4}$, $M_{OT2,5}$ та $M_{OT2,6}$, що дозволяє інтегрувати етапи, оптимізувати ресурси та зменшити витрати при збереженні допустимого рівня ризику.

Інноваційна технологія (д) з використанням 3D-сканування та BIM-моделювання передбачає активне впровадження моделей $M_{OT2,7}$ (BIM), $M_{OT2,8}$ (людина-машина), а також $M_{OT2,1}$, $M_{OT2,3}$ та $M_{OT2,6}$. Такий підхід забезпечує найвищу точність діагностики та обґрунтованість рішень, що є критичним для складних і історично цінних об'єктів.

У межах одного проекту реконструкції можуть застосовуватися всі моделі M_{OT} , однак їх склад і кількість визначаються специфікою об'єкта, масштабом втручання, бюджетними та часовими обмеженнями, а також рівнем технічного ризику. На практиці оптимальною є адаптивна комбінація 3–6 моделей, що

забезпечує баланс між якістю, ефективністю та раціональним використанням ресурсів.

5.2. Дослідження зовнішніх та внутрішніх просторово-планувальних параметрів каркасних будівель

Процеси підсилення каркасних будівель у межах реконструкції характеризуються підвищеною конструктивно-технологічною та організаційною складністю, що зумовлено наявністю пошкоджених і дефектних елементів, обмеженим доступом до робочих зон, а також необхідністю виконання робіт у функціонуючому або частково функціонуючому середовищі. За цих умов ефективність прийнятих КТР і ОТР істотно залежить від просторово-планувальних характеристик зон підсилення каркасу, які формують середовище виконання робіт і визначають прояв техніко-технологічних, організаційних, соціально-економічних та природних факторів. Формалізація зазначених характеристик у вигляді системи кількісних параметрів SPP є необхідною умовою обґрунтованого відбору факторів та побудови моделей КТР підсилення в межах КТС.

На відміну від традиційних підходів, у яких просторові характеристики розглядаються фрагментарно (окремо висота, окремо доступність або фронт робіт), у даній роботі автором запропоновано розглядати зону підсилення як елементарну структурну одиницю аналізу, що має сукупність кількісно визначених геометричних, технологічних та організаційних параметрів. Такий підхід дозволяє формалізувати умови виконання робіт і забезпечити порівнянність різних моделей КТР та ОТР. Одним із ключових завдань є дослідження характеристик елементів каркасу, які потребують підсилення.

З метою формалізації умов виконання робіт з підсилення каркасних будівель у межах реконструкції у даному дослідженні введено систему просторово-планувальних параметрів зон підсилення SPP, яка відображає геометричні, структурні та локалізаційні характеристики зон виконання робіт і

безпосередньо визначає можливість та ефективність реалізації конструктивно-технологічних рішень.

Система SPP розглядається як узагальнена множина базових параметрів, що описують просторову організацію процесів підсилення:

$$SPP = \{H_n, B_n, L_n, S_i, K_p, K_o, K_h, n, m_j\}, \quad (5.11)$$

де H_n, B_n, L_n – граничні геометричні параметри зон підсилення за висотою, глибиною та довжиною відповідно;

S_i – площа (або обсяг) окремої зони підсилення;

n – кількість локальних зон підсилення у межах об'єкта;

m_j – кількість ділянок або елементів у межах окремої зони;

K_p – коефіцієнт насиченості каркасу зонами підсилення;

K_o – коефіцієнт однорідності зон за геометричними та техніко-технологічними показниками;

K_h – відносна висота розташування зон підсилення у межах каркасу будівлі.

У межах прийнятої формалізації зона підсилення S_i розглядається як елементарна структурна одиниця просторово-планувальної моделі, що характеризується сукупністю геометричних параметрів, рівнем насиченості елементами підсилення, складністю виконання робіт та обслуговується єдиним комплектом технологічних і організаційних засобів. Саме через параметри системи SPP реалізується вплив техніко-технологічних, організаційних, соціально-економічних і природних факторів на вибір та ефективність КТР.

Залежно від взаємного розташування елементів у межах каркасу зони поділяються на:

- Безперервні – щільно розташовані елементи каркасу, утворюють єдину ділянку підсилення.
- Переривчасті – елементи розташовані розосереджено; ці зони розглядаються окремо і потребують роздільного планування технологічних операцій.

Використання зон дозволяє формалізувати вплив просторових і планувальних параметрів на критерії надійності (N_i), ефективності (R_i) та сталості (A_i):

- N_i : Висока однорідність і компактність зон зменшує ймовірність помилок і дефектів. Розташування зон по висоті та глибині (H_n , B_n) враховується при виборі риштувань для зниження технічного ризику.
- R_i : Оптимальні розміри зон (S_i , L_n , H_n , B_n) дозволяють зменшити переміщення риштувань і матеріалів, підвищити швидкість монтажу та забезпечити інтеграцію Lean-принципів. Параметри зон безпосередньо впливають на планування потоків робіт, переміщення матеріалів, підйом і орієнтування елементів.
- A_i : Безперервні та однорідні зони зменшують втрати матеріалів і забезпечують стабільність технологічного процесу.

При достатньо високій насиченості елементами переривчасті зони можуть бути умовно приведені до безперервних, що спрощує організацію процесів. Граничні умови такого приведення визначаються за результатами кількісного аналізу параметрів зон. Встановлено, що збільшення насиченості зон з 3 до 12 елементів призводить до подвоєння трудовитрат. Це напряму корелює з критеріями R_i і дозволяє обґрунтувати вибір технологічної схеми підсилення для конкретних моделей $M_{кті}$ та $M_{отј}$.

Схема визначення геометричних параметрів зон підсилення, наведена на рис. 5.7, використовується для формалізації вхідних параметрів, які надалі застосовуються при розрахунку коефіцієнтів однорідності та відхилення зон, а також при обґрунтуванні організаційно-технологічних рішень. Для кількісного опису просторової структури підсилення автором виконано статистичний аналіз площ елементарних зон S_i . Вибірка сформована на основі 150 реалізацій, що дозволяє розглядати її як репрезентативну генеральну сукупність.

На рис. 5.8 наведено гістограму розподілу випадкової величини S_i . Аналіз показує, що значна частина зон має площу, відмінну від раціонального інтервалу $S_{opt}=2-5\text{ м}^2$, рекомендованого нормативними джерелами для забезпечення

продуктивних умов праці. Це обумовлює зростання трудомісткості, втрат часу на переміщення та переналагодження робочих місць.

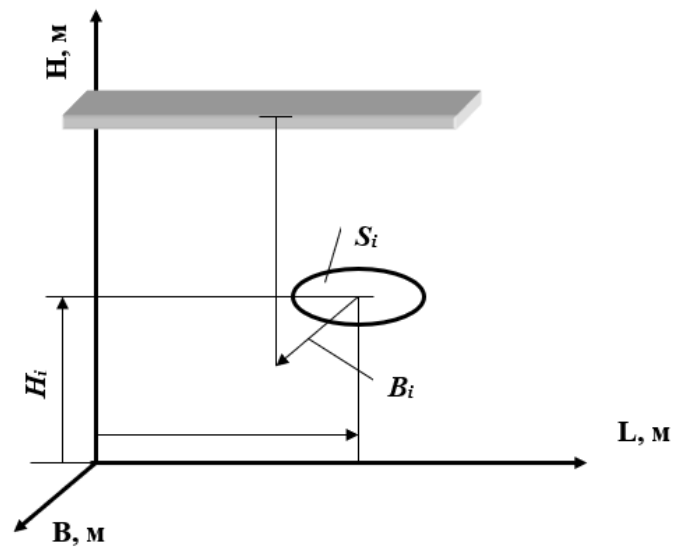


Рис. 5.7. Схема до визначення параметрів зон

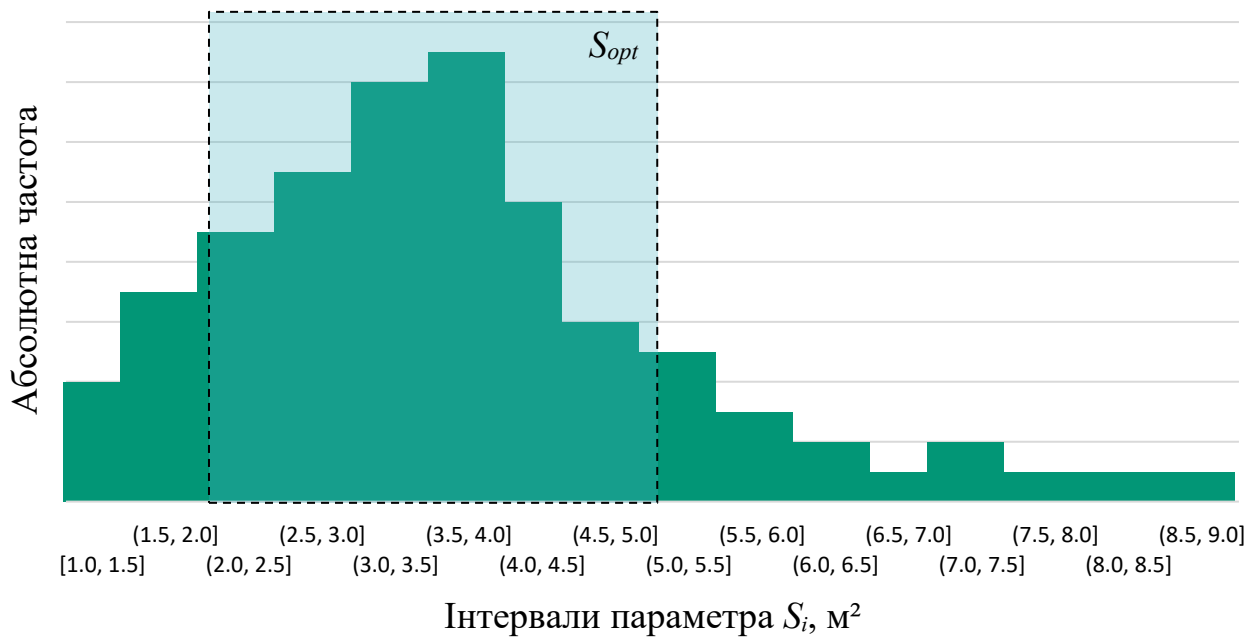


Рис. 5.8. Гістограма розподілу параметра S_i за інтервалами площ зон підсилення каркасу будівлі

Для оцінки питомої ваги таких зон автором запропоновано коефіцієнт відхилення розмірів зон від раціональних K_S , який визначається за формулою:

$$K_s = \frac{\sum |S_i - S_{opt}|}{\sum S_i}, \quad (5.12)$$

де S_{opt} – раціональне значення площі зони.

Згідно з чинними нормами і дослідженнями мінімальна площа робочої зони для виконання ремонтно-підсилювальних робіт становить 2–5 м².

Для досліджуваного випадку з імовірністю $P = 0,95$ встановлено діапазон значень коефіцієнта $K_s = 0,088–0,096$, що свідчить про наявність суттєвого резерву зменшення трудомісткості за рахунок укрупнення та уніфікації зон.

Відносна однорідність зон за площею описується коефіцієнтом технічної однорідності K_{os} , який визначається як відношення середнього квадратичного відхилення до середнього значення площі зон. Зменшення K_{os} безпосередньо пов'язане зі зниженням втрат часу на переналагодження робочих місць та переміщення оснащення.

Одним із ключових параметрів, що визначає трудомісткість і продуктивність процесів, є насиченість зон елементами підсилення m_j , виражена кількістю елементів на погонний метр каркасу. За результатами аналізу встановлено, що при збільшенні m_j від 3 до 12 трудовитрати зростають майже у два рази.

Це обґрунтовує доцільність урахування параметра m_j як одного з визначальних при виборі технології підсилення та організації потоків робіт.

До факторів, що істотно впливають на вибір засобів доступу та організацію робіт, належать:

- найбільша висота розташування зон H_n ;
- середньозважена висота зон $\bar{h}$;
- глибина зон B_n ;
- довжина робочої смуги L_n .

Середня висота розташування зон визначається за формулою:

$$\bar{h} = \frac{\sum h_i S_i}{\sum S_i}. \quad (5.13)$$

Для узагальненої оцінки висотного положення зон автором введено коефіцієнт відносної висоти розташування зон K_h :

$$K_h = \frac{\bar{h}}{H_n}. \quad (5.14)$$

Значення $K_h \approx 0,5$ відповідає рівномірному розподілу зон по висоті каркасу, тоді як крайні значення (0...1) сигналізують про доцільність застосування комбінованих засобів доступу.

Довжина робочої смуги L_n розглядається, з одного боку, як обмеження для вибору типу риштувань, а з іншого — як параметр, що визначає кількість переміщень обладнання та фронт робіт. За результатами аналізу межі подальших досліджень прийнято в інтервалі $L_n = 1\text{--}4\text{м}$.

Найчастіше при ремонті зустрічаються робочі місця для одного, двох або трьох робітників. Характеристики робочих зон розглянуті в підрозділі 5.3. та джерелах [236- 239].

Як свідчить досвід виконання подібних робіт з підсилення [236, 237, 240, 241], значний відсоток витрат припадає на процеси переміщення матеріалів і оснащення з поверхні землі, з тротуарів на робочі місця. Щоб довести це, розглянемо масу вантажів, які слід перемістити в межах каркасу будівлі. Роботи з підсилення металевими елементами потребують перемістити понад 20-60 т вантажів (металеві елементи, зварювальні апарати та інше), а якщо додати переміщення бруду, то ця цифра може зрости вдвічі. Процеси переміщення вантажів допоміжні і не перероблюють продукцію, але вони значно впливають на собівартість робіт, при цьому виникає економічна проблема [126, 228, 229].

Дослідження просторово-планувальних параметрів зон каркасу дає змогу формалізувати умови виконання робіт з підсилення у вигляді системи кількісних показників, обґрунтувати вибір конструктивно-технологічних і організаційно-технологічних рішень, а також зменшити трудомісткість і тривалість процесів за рахунок підвищення однорідності зон та оптимізації їх геометричних характеристик.

На основі виконаного аналізу всі нормоутворюючі фактори, що впливають на ефективність технологічного процесу підсилення, доцільно згрупувати у чотири групи, кожна з яких корелює з критеріями оцінки якості: техніко-технологічні (надійність N_i та контроль сталості A_i), організаційні (трудомісткість, продуктивність, управління ризиками впливають на ефективність R_i), соціально-економічні (оптимізація ресурсів та вартості, R_i , A_i), природні (вплив зовнішніх умов на надійність і довговічність, N_i , A_i). Зазначені фактори реалізують свій вплив через взаємодію з просторовими характеристиками зон підсилення (висота, площа, глибина, довжина), а також через особливості їх планувальної організації, зокрема щільність розташування елементів і локалізацію зон дефектів [234, 235, 237]. Їх взаємозв'язок із просторовими параметрами зон подано на рис. 5.9, а детальну систематизацію наведено у таблиці 5.3.



Рис.5.9. Схема впливу факторів, які впливають на ефективність технологічного процесу RT_c .

З метою формалізації нормоутворюючих чинників, що впливають на ефективність технологічного процесу підсилення, фактори, наведені в таблиці 5.3, подано у вигляді сукупності груп:

$$F = \{Tt, O, Se, P\}, \quad (5.15)$$

де кожна група представлена множиною відповідних факторів, які використовуються як вхідні параметри при формуванні та оцінюванні КТР [234, 235, 237, 238].

Таблиця 5.3

Результат систематизації просторово-планувальних факторів зон каркасу

Групи факторів	Підгрупи факторів	Шифр
Техніко-технологічні Tt :	Методи обстеження каркасів будівель, та їх параметри;	Tt_1
	Розміри зон, які підлягають реконструкції, зокрема відновленню, підсиленню, або підвищенню експлуатаційної надійності (S_i);	Tt_2
	Кількість ділянок на погонному метрі зони (m_j);	Tt_3
	Коефіцієнт насиченості зонами каркасу будівлі (K_p);	Tt_4
	Кількість локальних зон (n);	Tt_5
	Питома вага зон, які відрізняються від норми (K_s);	Tt_6
	Відносна однорідність зон по площі та іншим технічним показникам (K_o);	Tt_7
	Відносна однорідність зон по технологіям підсилення (K_{tech});	Tt_8
	Найбільші та найменші геометричні параметри зони: висоти (H_n), глибини (B_n) і довжини (L_n) розміщення зон;	Tt_9
	Середня висота розташування зон ($\bar{h}$);	Tt_{10}
	Відносна висота розташування зон по висоті каркасу будівлі (K_h);	Tt_{11}
	Відхилення фактичного рівня кваліфікації робіт від проектного (стандартного) середньо бажаного рівня робіт (K_k);	Tt_{12}
	Характер і тип дефектів та пошкоджень (впливають на вибір структури технології виготовлення виробів та відновлення зруйнованих місць);	Tt_{13}
	Властивість матеріалів і виробів для підвищення міцності, клеючих здатностей та інше (впливають на безліч перерв у технологічних процесах та на терміни очікування різних подій);	Tt_{14}
	Конструктивно-технологічні рішення засобів риштувань, інструментів і механізмів (значно впливають на трудомісткість і собівартість процесів, а також на рівень механізації);	Tt_{15}
	Зовнішні фактори стиснення зони робіт (зелені насадження, електромережі, габарити доріжок і доріг, вплив сусідніх споруд тощо).	Tt_{16}
Організаційні:	Варіанти організації технологічних процесів у комплексному процесі проведення ремонтних робіт (послідовні, паралельні, потокові);	O_1
	Ступінь розчленування процесів (впливає на формування структури ОТР);	O_2
	Складність технологічних процесів (від неї залежить структурне побудування ОТР);	O_3
	Рівень механізації, енергоозброєність робітників тощо;	O_4
	Загальний обсяг робіт, який передбачається виконати у плануємому періоді (як правило це один рік);	O_5
	Організація виробничо-підготовчої бази у комплексі технологічних процесів (впливає на терміни та собівартість реконструкції каркасу);	O_6

Продовження таблиці 5.3

Соціально-економічні:	Ергономічні, ті що пов'язані з плануванням і організацією робочих місць і впливають на вибір засобів ризиків і на вибір механізмів.	O_7
	Тривалість робочого дня;	Se_1
	Вимоги охорони праці;	Se_2
	Санітарно-гігієнічні умови праці;	Se_3
	Рівень цін на даний момент часу.	Se_4
Надзвичайні впливи	Руйнування внаслідок взривів	Se_5
	Попадання снарядів	Se_6
Природні:	Температура повітря;	P_1
	Швидкість повітря;	P_2
	Опади, тощо.	P_3

Техніко-технологічні фактори:

$$Tt = \{Tt_1, Tt_2, \dots, Tt_n\} \quad (5.16)$$

Організаційні фактори:

$$O = \{O_1, O_2, \dots, O_m\} \quad (5.17)$$

Соціально-економічні фактори:

$$Se = \{Se_1, Se_2, \dots, Se_p\} \quad (5.18)$$

Природні фактори:

$$P = \{P_1, P_2, \dots, P_q\} \quad (5.19)$$

Аналіз просторових і планувальних параметрів зон підсилення (Si , Hn , Vn , Ln , m_j), показав, що геометричні характеристики зон є необхідною, але недостатньою умовою для забезпечення заданої якості КТР. Фактична ефективність і надійність технологічних рішень у процесі реконструкції значною мірою визначаються умовами середовища, у яких реалізуються технологічні операції підсилення.

Для забезпечення довговічності конструкцій та мінімізації впливу руйнівних чинників необхідно враховувати комплекс захисних і організаційних заходів, що відповідають умовам конкретного об'єкта та середовища його функціонування. До таких заходів належать улаштування навісів, ізоляційних і вентиляційних систем, нанесення захисних покриттів, а також запобігання агресивній дії компонентів ґрунту, вологи, температурних коливань і виробничих середовищ. Зазначені фактори безпосередньо впливають на критерії сталості (A_i), зокрема довговічність конструкцій ($A_{2.4}$) та ефективність використання матеріалів ($A_{2.6}$).

Під час планування строків експлуатації реконструйованих конструкцій слід також враховувати допустимі відхилення, що виникають унаслідок специфіки будівельного майданчика та реальних умов виконання робіт. У разі виявлення на етапі реалізації невідповідності місцевих умов, матеріалів або якості виконання робіт вимогам норм, стандартів чи рекомендацій виробників, виникає необхідність у коригуванні прийнятих КТР і ОТР. Такі коригування мають бути спрямовані на збереження заданого рівня надійності (N_i) та ефективності (R_i), а не виконуватися інтуїтивно або ситуативно.

У випадках, коли умови будівельного майданчика не дозволяють забезпечити необхідні вимоги до точності монтажу, транспортування матеріалів або нанесення захисних покриттів, доцільним є перенесення окремих операцій у заводські умови, використання елементів і систем, адаптованих до несприятливих умов монтажу, застосування спеціальних процедур підготовки поверхонь і розширеного контролю якості. Ці рішення напряду пов'язані з критеріями N_5 , N_7 , N_{13} (контроль якості, точність монтажу, імовірність відмов) та RT_{21} (зменшення ризикових подій) (розділ 2.3).

Важливо підкреслити, що навіть технічно обґрунтовані та оптимальні проєктні рішення можуть втратити ефективність у разі несанкціонованих змін або заміन матеріалів і технологій на етапі монтажу. Такі відхилення призводять до зниження або повної втрати запланованих експлуатаційних характеристик, що негативно впливає одночасно на N_i , R_i та A_i . Це обумовлює необхідність

системного контролю виконання робіт відповідно до проєктних вимог та умов середовища.

На відміну від існуючих підходів, у яких фактори середовища розглядаються переважно описово або фрагментарно, у даному дослідженні середовище в зоні об'єкта підсилення вперше інтерпретується як формалізований багатофакторний параметр IS_k , що відображає контекст існування об'єкта реконструкції та охоплює просторово-планувальні, конструктивні, виробничо-експлуатаційні й природні умови виконання робіт. При цьому принципово розмежовано нормоутворюючі фактори технологічного процесу підсилення, які безпосередньо формують його параметри, трудомісткість і ефективність (табл. 5.3), та фактори середовища IS_k (табл. 5.4), що не нормують технологію напряду, а задають умови та обмеження її реалізації.

Формалізація середовища у вигляді системи IS_k дозволяє інтегрувати його у математичну модель технологічного процесу (розділ 6.1), забезпечує безпосередній вплив на вибір моделей конструктивно-технологічних MKT_i та організаційно-технологічних MOT_j рішень і дає змогу оцінювати наслідки прийнятих рішень через систему критеріїв якості $N_i-R_i-A_i$, а не лише за показниками трудомісткості або вартості. У таблиці 5.4 наведено систематизовані групи та підгрупи факторів середовища IS_k , що враховуються при виборі методів відновлення та формуванні КТР.

Збір і аналіз інформації щодо основних чинників середовища в зоні об'єкта підсилення здійснюється шляхом формування узагальненого параметра середовища IS , який подається у вигляді впорядкованої сукупності його компонентів:

$$IS = (IS_1, IS_2, \dots, IS_k) \quad (5.20)$$

де IS_k — окрема група факторів середовища, що характеризує певний аспект умов реалізації процесів підсилення (просторово-планувальні, конструктивні, виробничо-експлуатаційні, природні тощо).

Таблиця 5.4

Фактори середовища в зоні об'єкту IS_k

	Групи чинників		Підгрупи чинників
IS_1	Характер втручання в конструктивну систему	IS_{11}	Підсилення несучих елементів
		IS_{12}	Відновлення пошкоджених елементів
		IS_{13}	Комбіноване втручання
IS_2	Просторово-планувальні умови об'єкта підсилення	IS_{21}	Ландшафт та зовнішні обмеження
		IS_{22}	Об'ємно-планувальне рішення
		IS_{23}	Наявність проходів, зон безпеки, транспортних коридорів
IS_3	Конструктивна структура об'єкту	IS_{31}	Тип каркасу
		IS_{32}	Ступінь пошкодженості
		IS_{33}	Взаємне розміщення елементів
IS_4	Умови навколишнього середовища	IS_{41}	Агресивність середовища
		IS_{42}	Температурно-вологісний режим
IS_5	Виробничо-експлуатаційні умови	IS_{51}	Зупинка виробничого процесу
		IS_{52}	Виконання робіт без зупинки
IS_6	Доступність та організація робочих зон	IS_{61}	Рівень доступності конструкцій
		IS_{62}	Обмеження по висоті та габаритах
IS_7	Масштаб і повторюваність робіт	IS_{71}	Повторюваність елементів
		IS_{72}	Площа та обсяг зон підсилення
IS_8	Виробничо-технологічні умови внутрішнього середовища	IS_{81}	Тип основного технологічного обладнання (стаціонарне, мобільне, великогабаритне, високоточне)
		IS_{82}	Щільність розміщення та компоновка обладнання у виробничих приміщеннях

Для кожної групи функцій $IS_1, IS_2, \dots, IS_k$ виокремлено підгрупи ключових характеристик IS_{ki} (вид втручання, доступність конструкцій, виробничо-експлуатаційні умови, характер експлуатації тощо), які надалі використовуються як вхідні параметри у функціях вибору технологічних схем, моделей транспортування та монтажу (TRP).

Параметри SPP виступають базовим носієм інформації про геометрію, структурну організацію та локалізацію зон виконання робіт у межах каркасної системи будівлі. Саме через них реалізується вплив техніко-технологічних (Т), організаційних (О), соціально-економічних (Se) та природних (Р) факторів, а

також факторів середовища об'єкта IS_k , які формують обмеження, умови або необхідність модифікації прийнятих конструктивно-технологічних рішень.

Такий підхід дозволяє розглядати просторово-планувальні характеристики не ізольовано, а як інтегруючу ланку між фізичними параметрами об'єкта та сукупністю нормоутворюючих і середовищних факторів, що визначають реалізованість та ефективність процесів підсилення. У зв'язку з цим доцільним є введення середовища формування КТР у вигляді функціональної системи:

$$\Omega_{KTR} = \langle SPP, Tt, O, Se, P, IS_k \rangle \quad (5.21)$$

де Ω_{KTR} – функціональне середовище формування КТР підсилення каркасних будівель, яке визначає сукупність параметрів та факторів, що впливають на вибір і реалізованість КТР.

SPP — просторово-планувальні параметри зон підсилення;

Tt, O, Se, P — групи нормоутворюючих факторів (табл. 5.3);

IS_k — фактори середовища об'єкта підсилення (табл. 5.4).

Просторово-планувальні умови та виробниче середовище, що формують середовище реалізації КТР (рис. 5.10), не лише обмежують множину можливих технологічних рішень, а й безпосередньо визначають параметри організації робочих місць, що є предметом подальшого розгляду в наступному розділі.

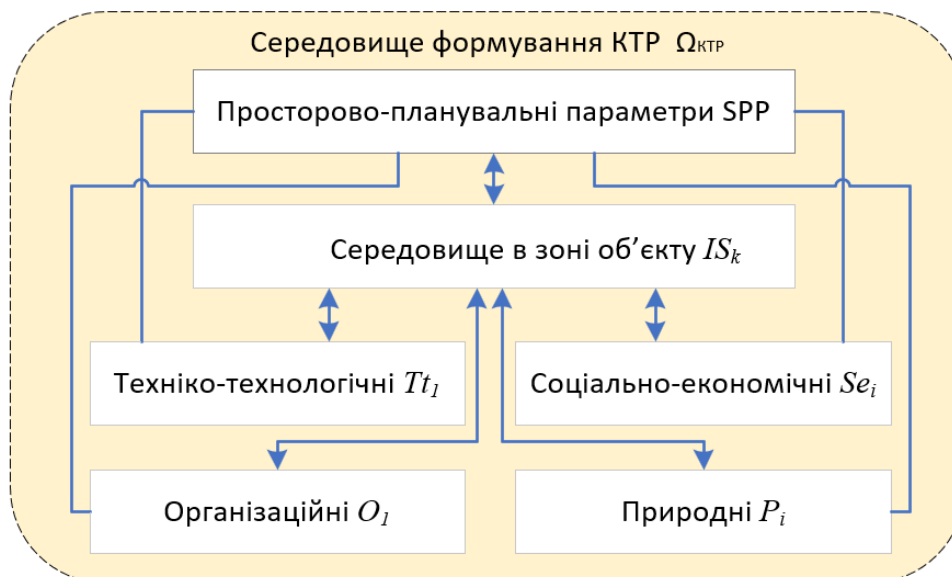


Рис.5.10. Середовище формування КТР та взаємодія його складових

5.3. Виявлення впливу параметрів робочих місць виконавців процесу на якість підсилення конструкцій каркасних будівель

Останні роки значна кількість публікацій присвячена питанню реконструкції будівель та споруд, а також процесів, з цим пов'язаних. Однак, недостатньо вивченими залишаються питання оптимального планування робочого простору для виконання робіт з відновлення експлуатаційної придатності елементів конструкцій та вибір оптимального типу підмостей для здійснення технологічних процесів підсилення будівельних конструкцій при реконструкції. Дуже важливою проблемою є також розміщення спеціального будівельного техобладнання та технологічної оснастки, нестандартного обладнання, що має в своєму складі гідравлічні, електричні й інші приводи, а також забезпечення сангігієнічних норм праці при проведенні робіт.

Параметри та типи робочих місць виконавців як результат адаптації КТР до просторово-планувальних умов.

При реконструкції більш актуальними стають питання малооб'ємності виконуваних робіт. Нерідко присутні руйнування або виконується демонтаж конструкцій, можливі роботи з підсилення або заміни окремих конструктивних елементів. Роботи завжди ведуть в умовах обмеженого простору, що надає істотний вплив на загальну схему організації, а також на технологію виконання робіт. Будівельні роботи виконуються одночасно з виробничим процесом, який відбувається на підприємстві, а це ускладнює організацію і технологію робіт, застосування оптимальних комплектів і засобів механізації та висуває особливі вимоги до охорони праці.

Основним фактором, що впливає на організацію робочого місця в умовах реконструкції, є обмеженість фронту робіт. Зараз в світі та в Україні активно розвивається і вже широко застосовується інформаційне моделювання будівництва (BIM), і цей підхід, безумовно, доцільно використовувати при плануванні робіт з реконструкції. Тому, для планування безпосередньо робочого місця необхідна точна оцінка параметрів обмеженості з застосуванням BIM-

технологій [24]. З врахуванням вищезазначених проблем виникає задача оптимального розташування в межах ділянки, а саме машин, механізмів, компонування зони обслуговування та складування, рішення якої у вигляді діючої методології або системи наразі відсутнє. Розробка зазначеної методології дозволить вирішувати цей складний процес, що зараз, переважно, залежить від кваліфікації і досвіду проектувальника.

Питанням організації робочих місць наразі присвячена незначна кількість досліджень, незважаючи на те, що це вагомий фактор, який впливає на вибір розмірів і типу підмостей, що також впливає, як наслідок, на вартість проекту реконструкції та час виконання робіт. Цим дослідженням присвячені праці Г.М. Тонкачєєва [81, 243, 244] та Савйовського В.В. [78]. Здебільшого необхідно користуватися рекомендаціями, нормативними документами, але немає єдиної методології або системи, яка б враховувала особливості умов та фактори впливу, зокрема обмежень простору, на вибір типу робочих місць та вид підмостей.

Елементи каркасів будівель, які потребують підвищення експлуатаційної надійності, мають різну ступінь фізичного та морального зносу. Тому, технічний стан споруди, а також аналіз конструктивних, технологічних і організаційних параметрів визначають організаційно-технологічну схему виробництва будівельних робіт з реконструкції, що, безумовно, впливає на вибір підмостей (Рис.5.11) для здійснення процесів підсилення будівельних конструкцій.

Організація ділянок робіт і робочих місць при виконанні робіт з реконструкції повинна забезпечувати безпечні умови праці, належне санітарно-гігієнічне обслуговування виконавців, а також запобігання потенційним виробничим небезпекам відповідно до вимог ДБН А.3.2-2-2009 [238] та чинних нормативних документів з охорони праці [129].

Роботи з реконструкції, як правило, виконуються в стислі терміни в умовах суміщення у просторі будівельної діяльності з основним виробничим процесом підприємства. Значна частина монтажних і ремонтних операцій при заміні та підсиленні будівельних конструкцій здійснюється всередині будівель, часто на

значній висоті, що призводить до зростання трудомісткості будівельно-монтажних робіт і ускладнює організацію робочого простору.

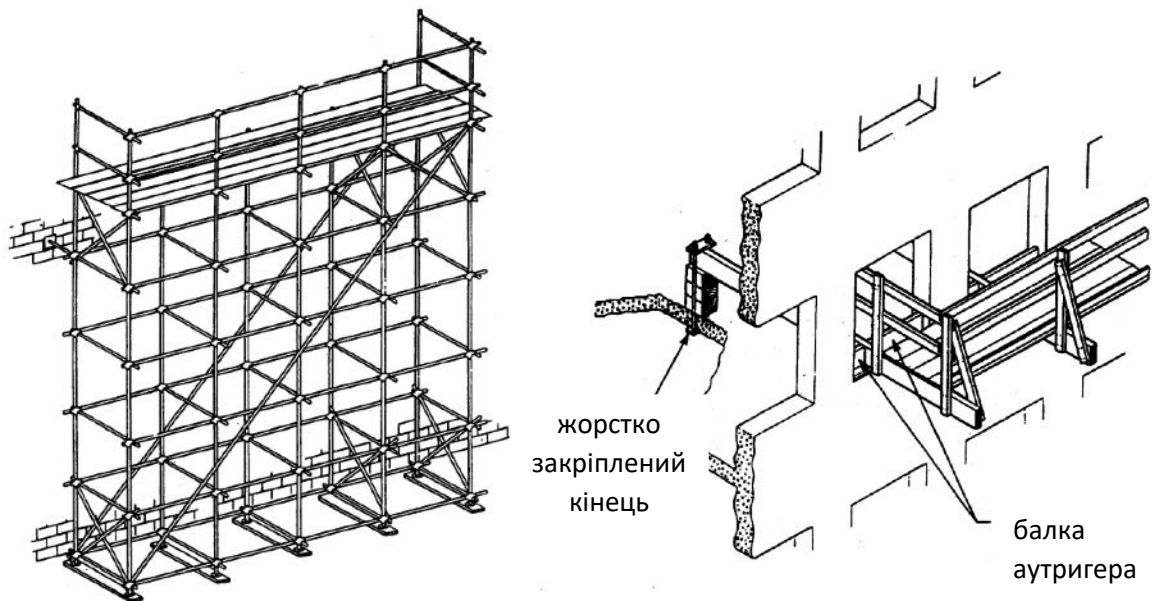


Рис.5.11. Приклади підмостей [248, с.64, с.72]

Важливою складовою комплексного підходу до виконання будівельних робіт при реконструкції є раціональна організація робочих місць, яка визначає умови виконання технологічних операцій, рівень безпеки праці та ефективність використання допоміжних засобів, зокрема підмостей.

Робоче місце у будівництві визначається як зона перебування виконавців [234, 235, 238], оснащена необхідними засобами і предметами праці, в межах якої здійснюється виконання окремої технологічної операції або їх сукупності індивідуальним виконавцем чи ланкою робітників.

В умовах реконструкції виконання технологічних процесів істотно залежить від особливостей будівлі, параметрів встановленого технологічного обладнання та обмежень робочого простору, які унеможливають застосування стандартних засобів механізації і нормативних схем організації робіт.

На відміну від нового будівництва, реконструкція характеризується наявністю дефектів, деформацій, зносу та деградації конструктивних елементів, що зумовлює необхідність виконання робіт з відновлення або підсилення

елементів каркасу з метою підвищення несучої здатності, експлуатаційної надійності та адаптації будівель до змінених умов використання.

Організація робочих місць при реконструкції, як правило, має тимчасовий характер і здійснюється для вирішення обмежених за обсягом і тривалістю виробничих завдань. Такі робочі місця поділяються на основні та проміжні (допоміжні), причому останні забезпечують підготовку, укрупнювальну збірку, підгонку або виготовлення окремих елементів, необхідних для реалізації основних технологічних процесів.

За характером переміщення у просторі робочі місця можуть бути стаціонарними, з дискретним або безперервним переміщенням, що визначає вимоги до організації робочої зони, засобів доступу та типу підмостей. Крім того, будівельно-монтажні роботи при реконструкції поділяються на внутрішньомайданчикові та внутрішньоцехові, які суттєво відрізняються за умовами виконання та рівнем просторових обмежень.

Наведені класифікаційні ознаки характеризують організаційні особливості робочих місць, однак не дозволяють повною мірою врахувати взаємний вплив просторово-планувальних, виробничо-технологічних та організаційних умов на вибір конструктивно-технологічних рішень. У зв'язку з цим виникає необхідність системного узагальнення факторів, що визначають умови формування робочих місць та вибір типів підмостей при виконанні робіт з підсилення будівельних конструкцій.

В умовах реконструкції значна частка витрат праці припадає на влаштування та переміщення підмостей, що у багатьох випадках перевищує трудомісткість основних робіт. Це безпосередньо впливає на тривалість і вартість реалізації проєктів реконструкції, що зумовлює необхідність дослідження закономірностей вибору типів підмостей залежно від умов організації робочих місць і характеру виконуваних робіт. Крім того, згідно з ДНАОП 6.1.00-1.12-01 [129], при реконструкції будівель і споруд промислових підприємств встановлюються вимоги з охорони праці та правила безпеки при виконанні робіт.

Визначені у п. 5.2 просторово-планувальні (IS_2) та виробничо-технологічні умови внутрішнього середовища (IS_3) формують вихідні обмеження, в межах яких реалізується технологічний процес підсилення конструкцій. Ці умови не є абстрактними характеристиками середовища, а безпосередньо трансформуються у вимоги до організації робочих місць виконавців, визначаючи їх тип, мобільність, рівень механізації, чисельний та кваліфікаційний склад персоналу, а також можливість застосування тих чи інших засобів підмоцнування та механізації.

Таким чином, робоче місце розглядається як ключова ланка, що поєднує просторові параметри зони підсилення з конструктивно-технологічними та організаційно-технологічними рішеннями, а отже — безпосередньо впливає на показники якості процесу реконструкції.

В умовах реконструкції каркасних будівель робочі місця суттєво відрізняються від аналогічних у новому будівництві через змінність фронту робіт, обмеженість простору, необхідність суміщення з діючим виробництвом та підвищені вимоги до безпеки і якості виконання операцій [243].

З урахуванням цих особливостей робочі місця доцільно класифікувати за сукупністю критеріїв, які відображають функціональну роль виконавця, характер виконуваних операцій та рівень організаційно-технологічної складності (табл. 5.5).

Згідно основних особливостей будівельного процесу, «зона перебування працюючих» безперервно або дискретно переміщується уздовж фронту робіт, змінюються зовнішні умови виконання трудового процесу, тому планування робочого місця в цих умовах не може бути постійним, а саме розміщення у певному просторі виконавців робіт, матеріалів, обладнання тощо. Тому система заходів по організації робочого місця повинна бути гнучкою і передбачати всі можливі зміни зовнішніх умов.

Робоче місце складається з робочої зони, зони складування матеріалів і зони обслуговування. Для виділення кожної з цих зон на місці виконання технологічного процесу необхідно співвіднести між собою геометричні розміри

простору, в межах якого розташоване робоче місце, врахувати всі вимоги безпечної експлуатації машин і механізмів з можливістю розмістити в межах цього об'єму ще й зону складування, а також надати можливість для переміщення машин і механізмів.

Таблиця 5.5

Типи робочих місць в умовах реконструкції

	Групи критеріїв		Підгрупи критеріїв
W_1	За характером участі в будівельному процесі	W_{11}	основне робоче місце
		W_{12}	допоміжне робоче місце
W_2	За ступенем спеціалізації	W_{21}	Вузькоспеціалізоване
		W_{22}	спеціалізоване
		W_{23}	універсальне
W_3	За ступенем рухливості	W_{31}	стаціонарне
		W_{32}	з дискретним переміщенням
		W_{33}	з безперервним переміщенням
W_4	За ступенем розподілу праці	W_{41}	індивідуальне
		W_{42}	групове
W_5	За ступенем механізації праці	W_{51}	з ручними операціями і використанням засобів малої механізації
		W_{52}	напівавтоматизовані
		W_{53}	автоматизовані
W_6	За ступенем складності робіт	W_{61}	прості
		W_{62}	складні

Тип робочого місця не може визначатися ізольовано від умов його функціонування. В умовах реконструкції формування робочих місць відбувається під впливом сукупності обмежуючих факторів, пов'язаних з просторовими, технологічними та організаційними особливостями будівельного майданчика. До таких факторів належать обмеження, пов'язані зі складуванням матеріалів, наявністю діючих комунікацій, транспортних потоків, ущільненими внутрішніми просторами та жорсткими часовими регламентами виконання робіт. Сукупність цих факторів систематизовано в таблиці 5.6 і використано як вихідну інформацію для вибору типу робочих місць та відповідних засобів підмоцвання.

З метою дослідження особливостей умов, що впливають на організацію робочого місця в процесі реконструкції, сформовано сукупність факторів впливу, визначених на основі аналізу конструктивних, технологічних та організаційних параметрів підмостей.

Таблиця 5.6

Фактори обмежених умов для виконання робіт в умовах реконструкції

	Групи факторів
Y_1	Обмеження умовами складування або неможливістю складування на будівельному майданчику для забезпечення робочих місць матеріалами, виробами і конструкціями
Y_2	Наявність поблизу робочих місць зелених насаджень, будівель, розгалуженої мережі існуючих комунікацій, які підлягають підвищенню або перекладанню
Y_3	Наявність поблизу робочих місць інтенсивного руху міського або діючого технологічного транспорту
Y_4	Виконання будівельних робіт в закритих спорудах і приміщеннях з наявністю обладнання, меблів та інших предметів, які заважають приміщення і заважають нормальному виконанню робіт
Y_5	Обмеження в часі для виконання робіт з реконструкції

Основна група факторів впливу, наведена в таблиці 5.7, зумовлена виробничими умовами [243], в межах яких формується робоче місце виконавців та здійснюється експлуатація підмостей під час підсилення конструкцій. Зазначені фактори розглядаються не як ізольований перелік окремих впливів, а як параметричний простір, у якому конкретизуються умови виконання технологічних операцій підсилення.

Формування цієї системи факторів ґрунтується на нормоутворюючих факторах, визначених у таблиці 5.3, однак на відміну від них у таблиці 5.7 вони інтерпретуються на іншому рівні узагальнення, а саме з позиції впливу на параметри робочих місць виконавців, просторово-планувальну організацію зони робіт і вибір типу підмостей. Система цих факторів виконує роль проміжної ланки між нормоутворюючими факторами технологічного процесу та процесом прийняття конструктивно-технологічних рішень, формалізуючи перехід від умов виробничого середовища до їх параметрів.

Інтерпретація нормоутворюючих факторів (табл. 5.3) з позиції формування
робочих місць виконавців і вибору типу підмостей

Групи факторів		Підгрупи факторів
Конструктивні фактори	D_1	геометричних розмірів будівлі (прольот, крок, висота від підлоги до низу кроквяних конструкцій)
	D_2	виду підсилюваних конструкцій (колони, підкранові балки, ферми покриття, плити покриття, в'язі по колонах, в'язі по фермам)
	D_3	параметрів конструкцій (висота, жорсткість перерізу, розміри поперечного перерізу, параметри решітки конструкцій)
	D_4	матеріалу підсилюваних конструкцій (металеві, залізобетонні, дерев'яні, комбіновані)
Технологічні фактори	T_1	методи підсилення конструкцій
	T_2	варіанти механізації (види ведучих машин і механізмів, можливі комплекти машин)
	T_3	обсяги робіт з підсилення конструкцій (однорідні і зосереджені роботи великого обсягу, однорідні зосереджені, різнорідні малого обсягу, допоміжні різнорідні)
	T_4	оціночні чинники процесів підсилення (трудомісткість і тривалість робіт, тривалість періоду зупинки основного виробництва)
	T_5	прийоми виконання операцій (механізовані, ручні, машинно-ручні, автоматизовані)
Організаційні фактори	O_1	тип виробництва (машинобудування, металургія, хімічні підприємства і т.п.)
	O_2	характеристика основного виробничого процесу по температурному режиму
	O_3	характеристика основного виробничого процесу по режиму завантаження основних механізмів (мостових консольних кранів, вагонів, ковшів і ін.)
	O_4	тип виробничого обладнання (цехи легкого, середнього, важкого і особливо- важкого типу)
	O_5	плани обладнання по цехах та транспортні схеми цехів;
	O_6	типи огорожувальних перешкод (екрани, перегородки, пройоми)
Додаткові фактори	A_1	експлуатаційні умови техніки безпеки, оптимальні умови праці на будівельному майданчику;
	A_2	транспортабельність підмостей;
	A_3	естетичні (забарвлення, колір, якість виготовлення)
	A_4	ергономічні (співвідношення і відповідність фізіологічних можливостей людини з параметрами підмостей)
	A_5	екологічні (вплив підмостей на забруднення навколишнього середовища)

У межах подальшого моделювання зазначені фактори інтегруються в модель технологічного процесу підсилення через параметри елемента каркасу

$e \in E$, методи механізації $M_m(e, P)$, організаційно-технологічні рішення M_{OTj} та структуру операцій $MountFix$. Це дозволяє формалізувати причинно-наслідковий зв'язок між умовами середовища, типом робочого місця та показниками якості підсилення конструкцій.

Промислова галузь містить основні об'ємно-планувальні рішення об'єктів, а також ступінь насиченості виробничих площ технологічним обладнанням, що по-різному впливає на обмеження умов виконання робіт на робочому місці.

З усієї сукупності факторів найбільш важливою і складною підгрупою є тип обладнання і планування обладнання по цехах. Для їх відбору та аналізу досліджувалися об'єкти машинобудування (29 об'єктів) та металургії (25 об'єктів).

Механічні цехи машинобудівних підприємств класифікуються наступним чином:

1. Характер і вага виробів, що виготовляються. За першою ознакою виділяються чотири класи цехів:

Клас 1 – легкого машинобудування (маса виробу до 100 кг): точні металоріжучі верстати та інструментальне виробництво, пристрої і приладдя для верстатів, швейні, друкарські й інші машини.

Клас 2 – середнього машинобудування (маса виробу до 2000 кг): машини, двигуни, верстати, автомобілі, трактори, мотоцикли, електродвигуни середньої потужності, сільгоспмашини.

Клас 3 – важкого машинобудування (маса виробу до 15000 кг): важкі металоріжучі верстати, ковальські молоти і преси, двигуни, компресори, металургійне устаткування, підйомно-транспортне устаткування тощо.

Клас 4 – особливо важкого машинобудування (маса виробу більше 15000 кг): прокатне і доменне устаткування, гідравлічні преси, потужні двигуни, турбіни.

2. Характер технологічного процесу. За другою ознакою виділяються:

А – виробничі відділення і ділянки;

Б – допоміжні відділення;

В – службові приміщення;

Г – побутові приміщення;

Д – приміщення громадських організацій.

Найбільш характерні схеми розміщення обладнання показані на рис. 5.12. Великі верстати в прольоті встановлюються в два ряди з одним поздовжнім проходом (проїздом); середні – в два-три ряди; легкі встановлюють в три-чотири ряди (рис. 5.13).

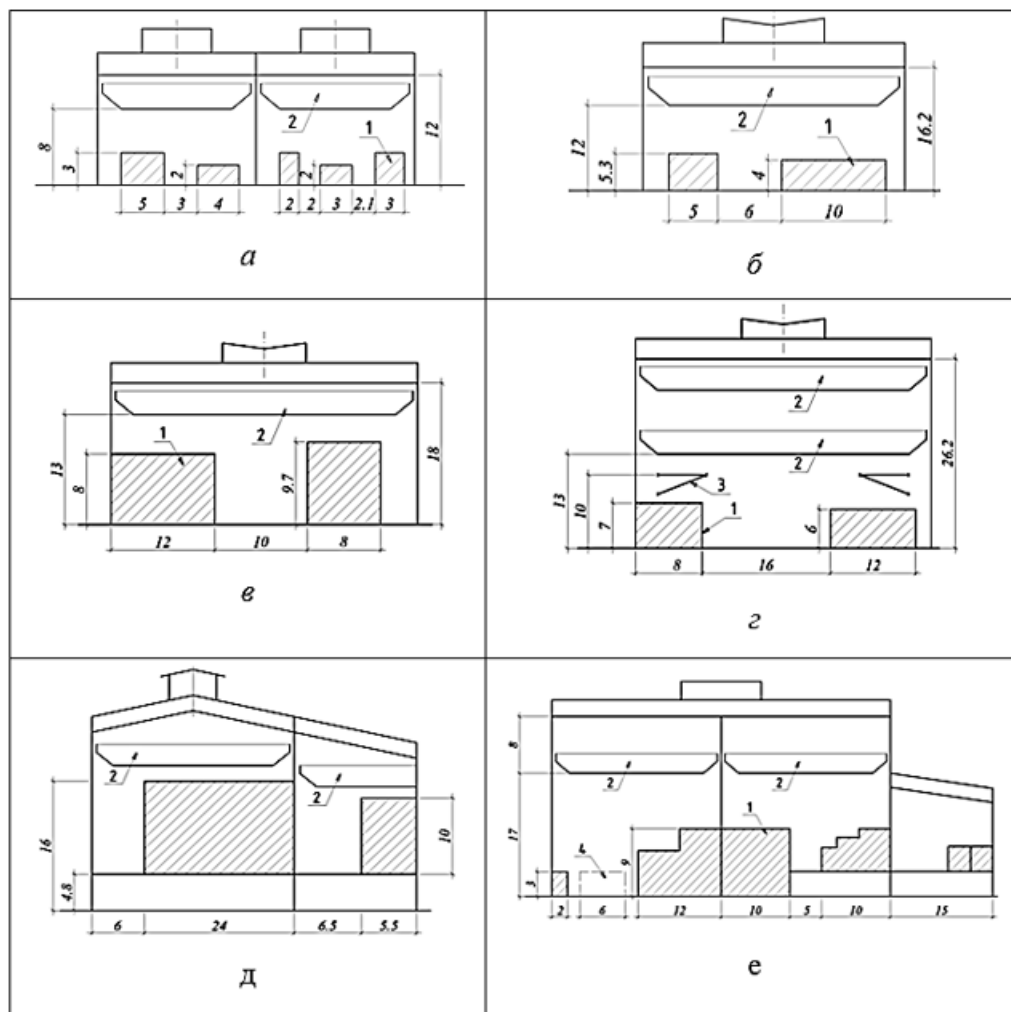


Рис. 5.12. Схеми розташування обладнання всередині цехів: машинобудівних заводів (*a* – клас 1, *б* – клас 2, *в* – клас 3, *д* – клас 4); *е*, *ф* – металургійних заводів: 1 – зона розміщення обладнання; 2 – мостові крани; 3 – консольні крани; 4 – тимчасово зайняті зони (розроблено та узагальнено автором на основі джерел [81, с. 73]).

3. Розміри цеху (за умовною кількістю металоріжучих верстатів). Ширина проходів залежить від типу основного транспортного устаткування. Для санчат, скатів, лотків і талів ширина проходу перебуває в межах 2,5...4,0 м, для мостових кранів і кран-балок – 2,6...5 м, для рольгангів і підлогових конвеєрів (для цих умов проходи закриті для руху іншого транспорту), для вантажних автомобілів, електронавантажувачів, автонавантажувачів – 5,5...6,0 м. Аналогічні параметри і для цехів металургійних заводів.

Ширина прольотів для механічних цехів, побудованих до 70-х років (основні будівлі, що підлягають реконструкції), змінюється за класами цехів: клас 1 - 18 м; клас 2- 18, 24 м; клас 3 - 24, 50, 36 м; клас 4 - 30, 36 м. Висота будівель знаходиться в межах 8,4 ... 18,0 м для машинобудування та 9,6 ... 25,0 м для металургії.

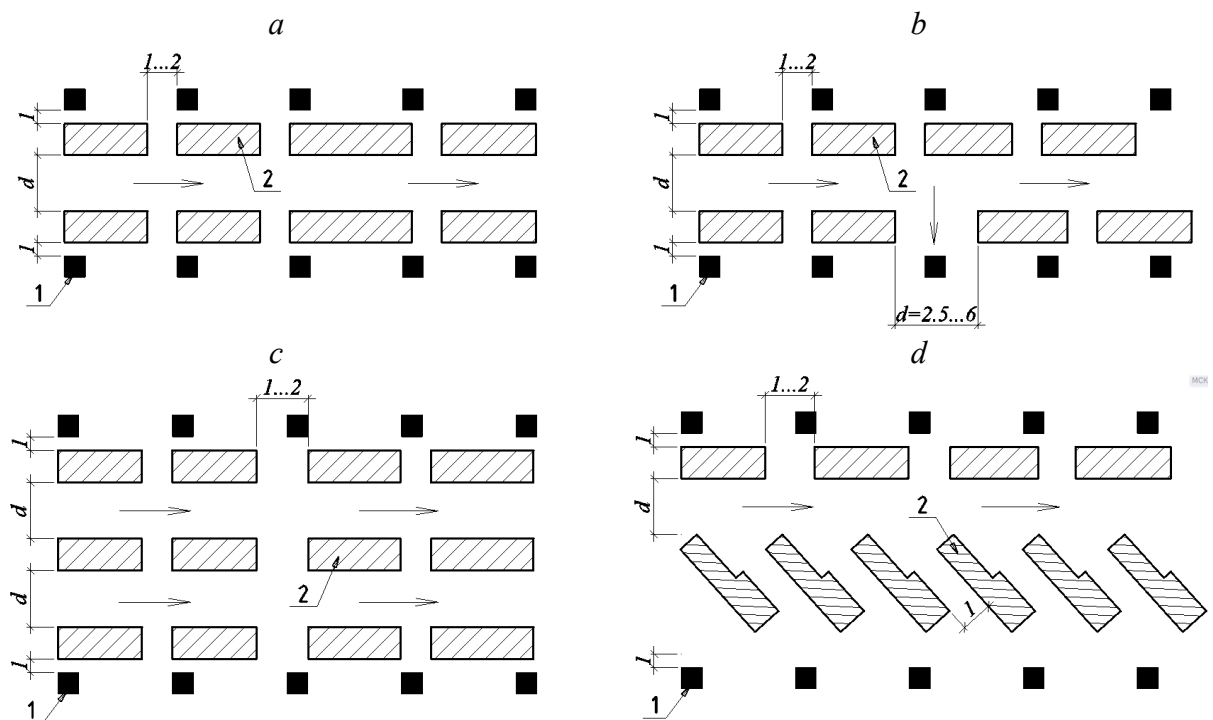


Рис. 5.13. Схеми розміщення обладнання в прольотах: *a* – з одним поздовжнім проходом; *b* – з одним поздовжнім і поперечним проходами; *c* – з двома поздовжніми проходами; *d* – з одним поздовжнім проходом і косим розташуванням устаткування: 1 – колони; 2 – зони розміщення обладнання (розроблено та узагальнено автором на основі джерел [81, с. 74]).

Визначалися частоти повторюваності параметрів по обладнанню та висоті будівлі: В - ширина проходів; Н - висота будівель від рівня робочої підлоги до низу кроквяних конструкцій (рис. 5.14). Найбільш часто зустрічаються наступні параметри:

$V = 2,8...4,0$ м, $H = 12...15$ м – для машинобудування;

$V = 6,0...8,0$ м, $H = 16...23$ м – для металургії.

Важливе значення для вибору засобів доступу та підмостей при реконструкції виробничих будівель мають просторово-планувальні обмеження, зокрема габарити дверей, воріт, проїомів і тамбурів, через які здійснюється транспортування матеріалів, елементів підмостей та обладнання.

Згідно з прийнятими умовами проєктування цехів машинобудівних підприємств, мінімальна ширина проходів становить 1,0 м, ширина дверей — від 0,8 до 2,4 м, воріт — від 1,8 до 6,0 м, при цьому найбільш поширеними є ворота шириною 4,5...4,7 м і висотою 4,5...5,6 м. Зазначені параметри суттєво обмежують можливість застосування типових будівельних механізмів і визначають вимоги до габаритів та модульності підмостей.

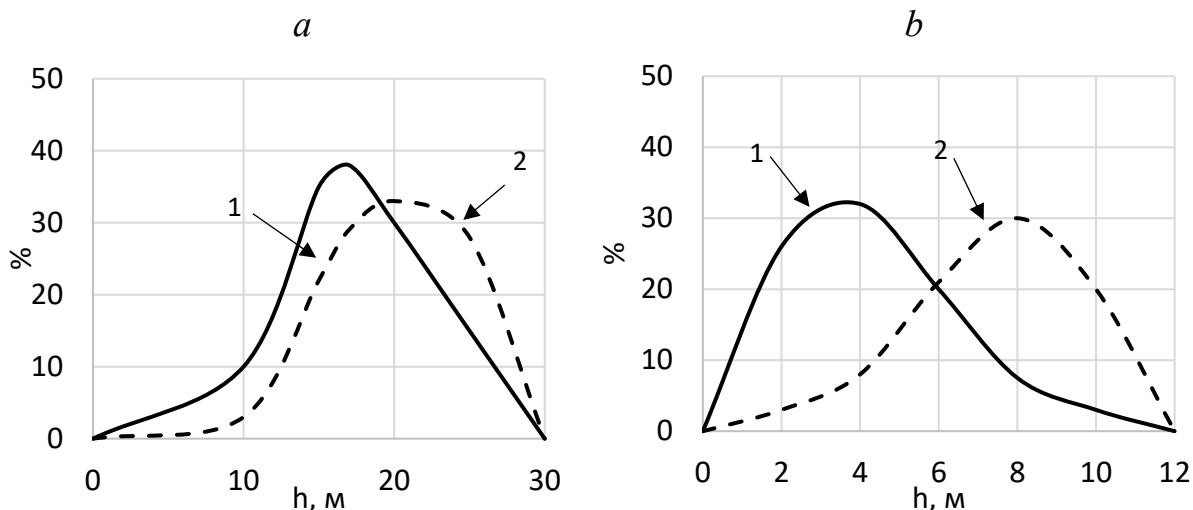


Рис. 5.14. Гістограми розподілу частот: а – висота будівель h ; б – ширина проходів d між обладнанням: 1 – для машинобудування; 2 – для металургії (розроблено та узагальнено автором на основі джерел [81, с. 74]).

У процесі підсилення існуючих конструкцій часто виникають умови, за яких застосування стандартної будівельної техніки є неможливим. У таких випадках виконання робіт здійснюється із використанням засобів малої механізації або ручної праці, що зумовлює варіативність технологічних рішень навіть для будівель зі схожими конструктивними схемами.

Узагальнення умов виконання робіт з підсилення показує, що визначальним чинником формування робочого місця в умовах реконструкції є обмеженість фронту робіт, яка проявляється у вигляді дефіциту простору, обмежень доступу та необхідності суміщення будівельних і виробничих процесів.

Для кількісної оцінки зазначених обмежень та обґрунтування рішень щодо організації робочих місць доцільним є використання технологій інформаційного моделювання будівель (BIM) [111, 249-251]. Застосування віртуальних тривимірних моделей дозволяє виявляти просторові колізії, оцінювати доступність конструкцій, моделювати розміщення підмостей і технологічного обладнання ще на етапі підготовки робіт.

Узагальнення результатів проведеного аналізу дозволяє встановити, що формування робочих місць виконавців процесів підсилення в умовах реконструкції визначається сукупністю взаємопов'язаних просторово-планувальних, технологічних, організаційних та середовищних факторів, які не можуть розглядатися ізольовано, оскільки саме їхня взаємодія формує умови реалізації технологічних операцій, визначає тип робочого місця, можливість застосування засобів підмоцнування та рівень механізації робіт. Для формалізації цього взаємозв'язку доцільно представити процес формування робочих місць виконавців у вигляді функціональної системи:

$$\Omega_{WM} = \langle SPP, W, Y, D, T, O, A, IS_k \rangle \quad (5.22)$$

де Ω_{WM} — функціональна система формування робочих місць виконавців процесів підсилення в умовах реконструкції;

SPP — просторово-планувальні параметри зон підсилення;

W — типи робочих місць виконавців (табл. 5.5);

Y — фактори обмежених умов виконання робіт (табл. 5.6);

D, T, O, A — групи факторів формування робочого місця (табл. 5.7), відповідно конструктивні, технологічні, організаційні та додаткові;

IS_k — фактори виробничого середовища об'єкта реконструкції.

На підставі проведеного аналізу сформовано систему факторів (рис. 5.15), що визначає параметри робочих місць виконавців процесів підсилення в умовах реконструкції та дозволяє формалізувати вплив просторово-планувальних і виробничих обмежень на вибір типу підмостей.

Тип підмостей у цьому випадку розглядається не як допоміжний засіб, а як організаційно-технологічний елемент КТР підсилення, який безпосередньо впливає на умови виконання робіт, безпеку, продуктивність та якість реалізації прийнятих технічних рішень.

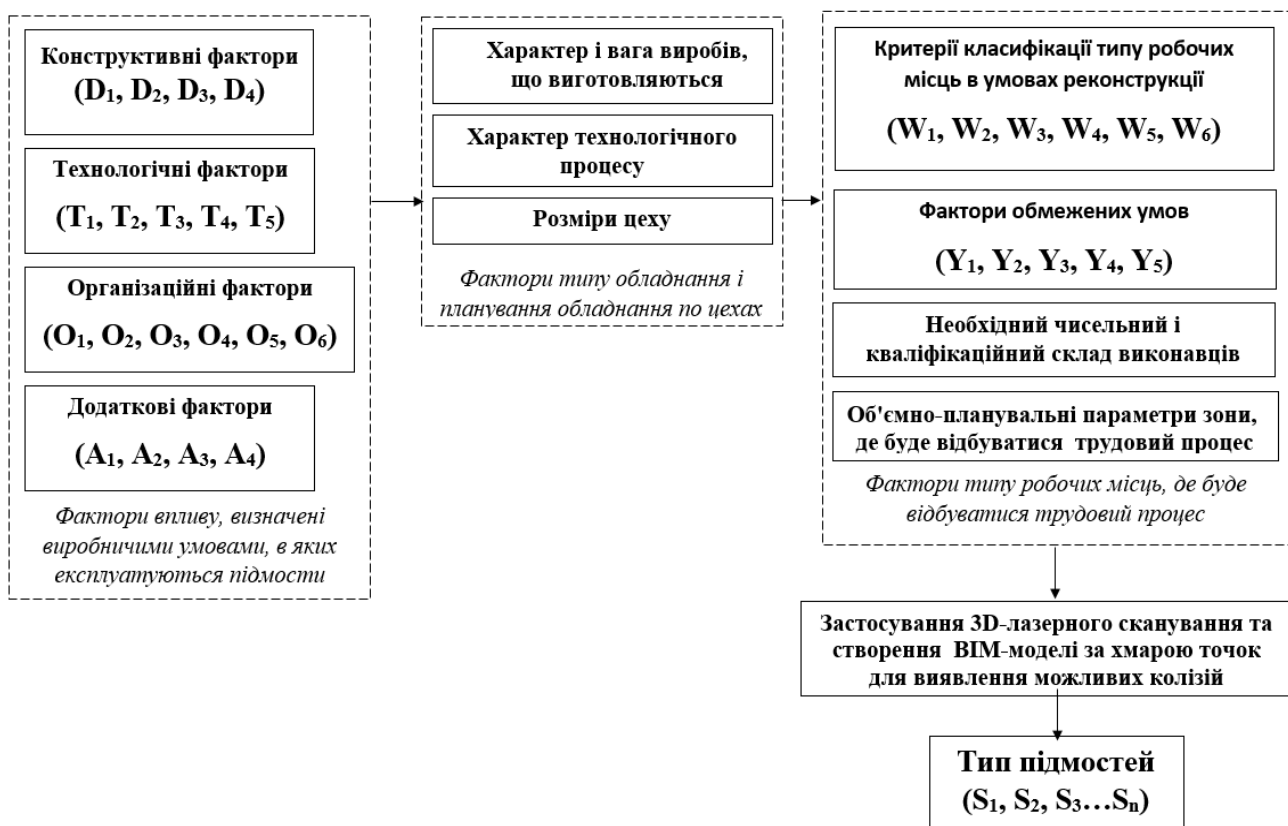


Рис.5.15. Система факторів для вибору типу робочих місць, що впливають на вибір підмостей при реконструкції (авторська розробка)

Отримання достовірної BIM-моделі забезпечується шляхом технічного обстеження будівель із використанням інструментальних обмірів та технологій 3D-лазерного сканування [252, 253], за результатами яких формується хмара точок і відтворюється фактичний геометричний стан об'єкта. Інформаційне наповнення моделі включає геометричні параметри робочих зон, фізичні характеристики конструкцій, а також дані про машини, механізми та засоби механізації, що застосовуються при підсиленні.

Застосування 3D-лазерного сканування та BIM-моделювання забезпечує ідентифікацію зазначених факторів у параметричному вигляді та їх інтеграцію в процес формування конструктивно-технологічного рішення, що створює підґрунтя для подальшої кількісної та якісної оцінки рішень за узагальненими критеріями надійності N_i , ефективності R_i та сталості A_i .

5.4. Формування та систематизація моделей конструктивно-технологічних рішень підсилення каркасних конструкцій як основи подальших досліджень

На основі результатів аналізу, викладених у розділах 1–4, узагальнення власного практичного досвіду автора [55, 56, 77, 97, 98, 99, 216], опрацювання науково-технічної літератури [34–36, 38, 48, 49, 69, 100, 196, 199, 218], а також у результаті співпраці з групою експертів і фахівців, було сформовано класифікацію найбільш поширених способів підсилення та відновлення будівельних конструкцій. На відміну від існуючих підходів, у яких способи підсилення, як правило, подаються за матеріальною ознакою або конструктивною формою елементів, у даній роботі вони систематизовані з позицій організаційно-технологічної реалізації в умовах реконструкції, з урахуванням ступеня втручання у роботу каркасу, просторово-планувальних обмежень і виробничого середовища виконання робіт.

Запропоновані способи орієнтовані на усунення дефектів і пошкоджень, підвищення експлуатаційної надійності та несучої здатності каркасу будівлі, а також на забезпечення необхідної якості виконання робіт у процесі

реконструкції. Узагальнення зазначених способів реалізовано на рис. 5.16 у вигляді системи основних моделей конструктивно-технологічних рішень при підсиленні каркасних конструкцій, яка дозволяє використовувати ці моделі як формалізовану основу для подальшого формування конструктивно-технологічних систем підсилення з урахуванням умов конкретного об'єкта реконструкції.

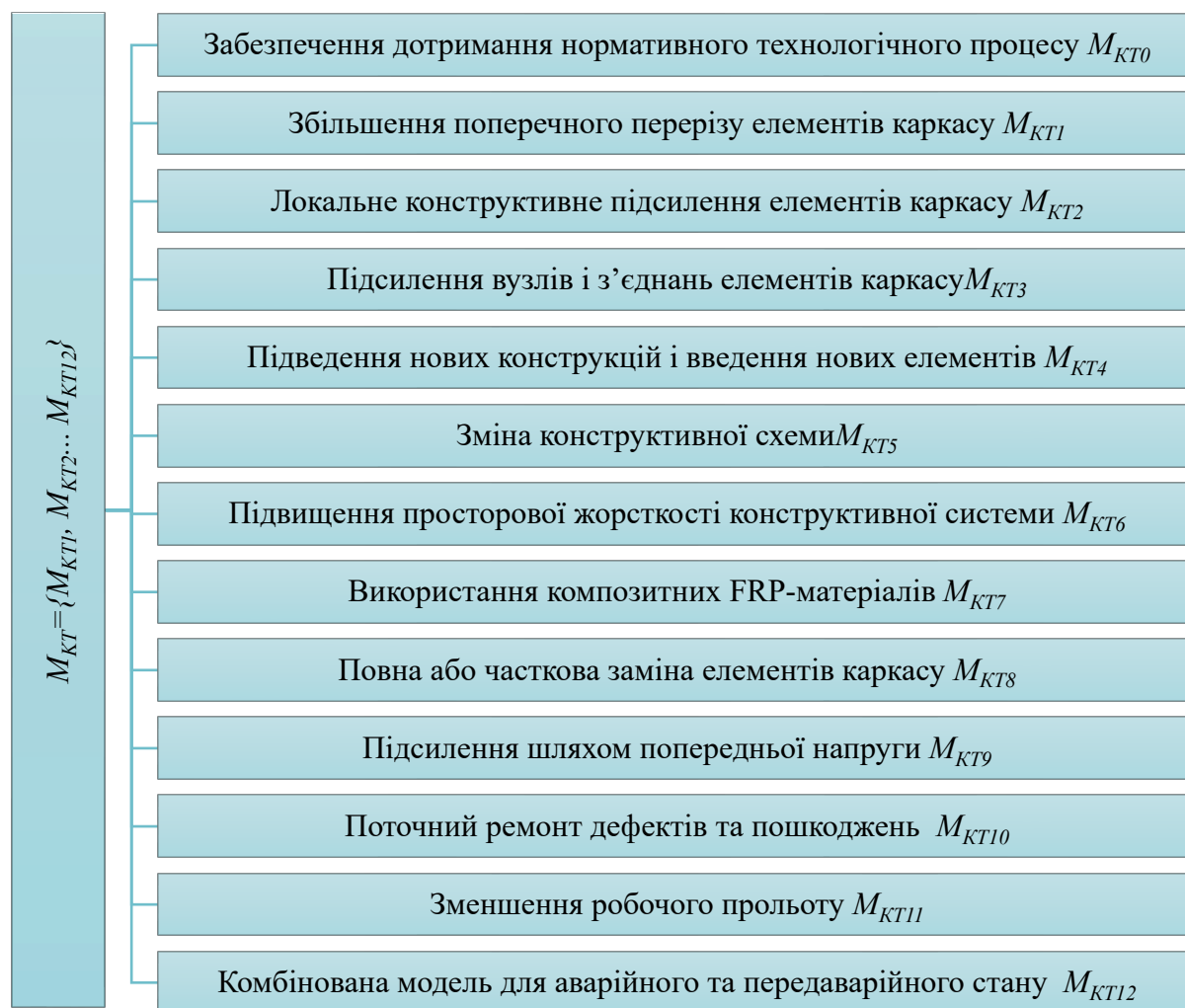


Рис. 5.16. Система основних моделей КТР при підсиленні каркасних конструкцій

У межах запропонованої системи моделей КТР нижче наведено їх змістовну характеристику та відповідних підгруп, що дозволяє формалізувати область застосування кожної моделі залежно від технічного стану каркасу, умов виконання робіт і вимог до якості підсилення.

M_{KT0} – забезпечення дотримання нормативного технологічного процесу на підприємстві під час виготовлення конструкцій з метою продовження терміну служби або відтермінування необхідності відновлення чи реконструкції каркасу будівлі.

M_{KT1} – збільшення поперечного перерізу елементів каркасу шляхом приварювання додаткових металевих елементів, для підвищення міцності, стійкості та надійності каркасу будівлі, для стиснутих та зігнутих елементів.

M_{KT2} – локальне конструктивне підсилення елементів каркасу шляхом введення додаткових жорсткісних компонентів (ребер, діафрагм, проміжних опор і розпірок), спрямоване на підвищення місцевої та загальної стійкості конструкцій, зменшення розрахункових прогинів і напружень, а також на раціональний перерозподіл внутрішніх зусиль.

Зазначений спосіб застосовується переважно у випадках недостатньої місцевої стійкості елементів, що працюють на згин і стиск, зокрема стінок балок та стиснутих поясів. Реалізація підсилення, як правило, передбачає часткове розвантаження конструкцій із використанням тимчасових опор з метою зниження дії поперечних сил у зонах втручання. Структуризація моделей локального конструктивного підсилення за умовами збереження корисного простору наведена на рис. 5.17.

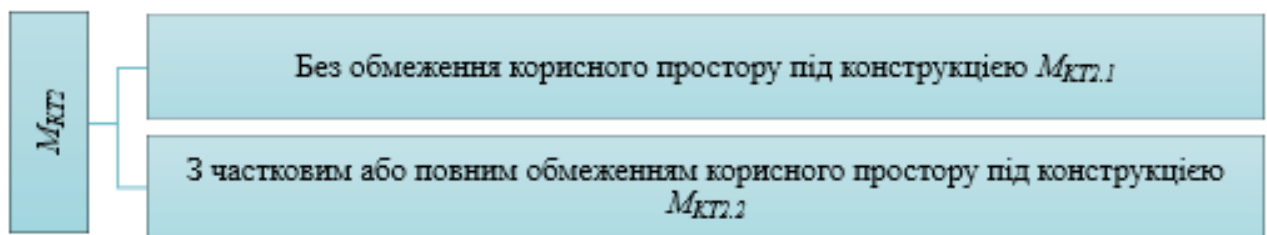


Рис. 5.17. Підсистема моделей КТР локального конструктивного підсилення елементів каркасу M_{KT2}

M_{KT3} – підсилення вузлів і з'єднань елементів каркасу.

M_{KT4} – підведення нових конструкцій і введення нових додаткових елементів для підсилення окремих конструкцій рекомендують застосовувати

тоді, коли безпосереднє підсилення конструкцій неможливе, наприклад, підведення додаткових балок для підсилення перекриття, підведення нових підкровоквних ферм замість вилучених колон, уведення нових додаткових елементів решітки для підсилення кроквяних, кранових, мостових ферм і ґратчастих підкранових балок.

$M_{КТ5}$ – зміна конструктивної схеми каркасу. Цей спосіб забезпечує перерозподіл внутрішніх зусиль, підвищення загальної просторової жорсткості та експлуатаційної надійності каркасу без або з модифікацією його геометричної конфігурації. Застосовується у випадках, коли локальні заходи підсилення є недостатніми або технічно неефективними, зокрема при підсиленні конструкцій під навантаженням.

Залежно від ступеня втручання у конструктивну форму, у межах $M_{КТ5}$ виокремлено підгрупи з частковим або повним перетворенням конструктивної схеми, що визначають характер обмежень робочого простору та організаційно-технологічні умови реалізації (рис. 5.18). Наприклад, застосовуючи $M_{КТ5.1}$, шляхом збільшення міцності однієї колони в конструктивній схемі прольотної споруди цеху можна досягти необхідного перерозподілу зусиль у всій конструктивній схемі.

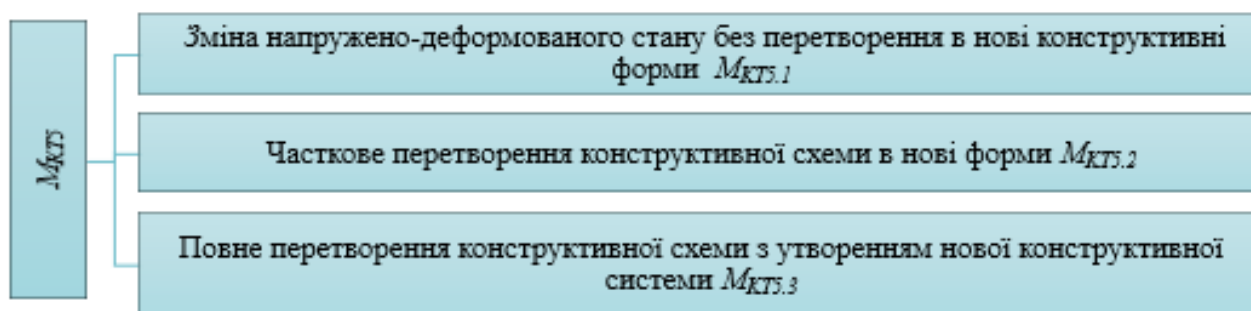


Рис. 5.18. Підсистема моделей КТР зміни конструктивної схеми каркасу $M_{КТ5}$

$M_{КТ5.2}$ полягає у зміні умов роботи окремих елементів і вузлів без повної перебудови системи. Наприклад, установлення затягування в рамі та защемлення кінців стояків дозволяє перетворити двошарнірну раму на конструкцію із

частково заземленими опорами та додатковим силовим контуром, що забезпечує перерозподіл внутрішніх зусиль і підвищення жорсткості всієї системи.

За $M_{KT5.3}$ первісна розрахункова схема замінюється новою з іншими умовами спирання та просторовою роботою елементів. Наприклад, підведення шпренгельної системи до однопрогонового ригеля призводить до формування принципово нової несучої схеми, що істотно змінює характер роботи елементів і рівень їхньої несучої здатності.

M_{KT6} – підвищення просторової жорсткості конструктивної системи каркасу будівлі, спрямоване на підвищення його просторової жорсткості та стабільності шляхом залучення додаткових зв'язків, діафрагм жорсткості або включення у спільну роботу вторинних конструктивних елементів. Реалізація даного підходу забезпечує зменшення деформацій, підвищення стійкості до експлуатаційних та середовищних впливів, а також підвищення надійності просторової роботи каркасу в цілому.

Структура підсистеми M_{KT6} сформована з урахуванням типу та способу включення додаткових елементів у просторову роботу каркасу та представлена на рис. 5.19.

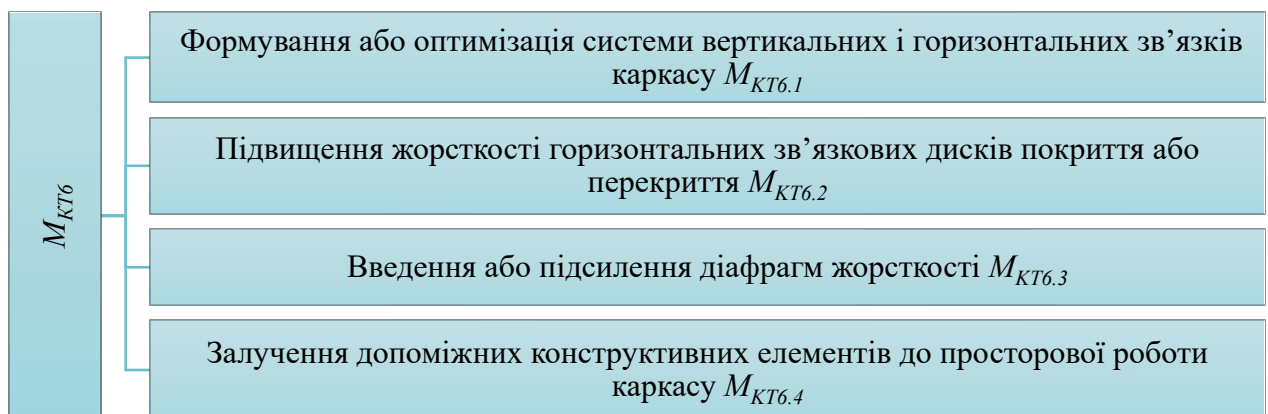


Рис. 5.19. Підсистема моделей КТР підсилення каркасу з використанням FRP-матеріалів M_{KT7}

У межах підмоделі $M_{KT6.1}$ здійснюється встановлення нових або перестановка існуючих зв'язків, що забезпечує стабілізацію просторової схеми

та підвищення стійкості каркасу. $M_{KT6.2}$ орієнтована на підвищення жорсткості горизонтальних зв'язкових дисків покриття або перекриття, які відіграють ключову роль у сприйнятті горизонтальних навантажень. $M_{KT6.3}$ передбачає використання діафрагм жорсткості як елементів, що забезпечують передавання навантажень між вертикальними і горизонтальними несучими системами. У межах $M_{KT6.4}$ до просторової роботи каркасу залучаються допоміжні конструктивні елементи, зокрема антресольні майданчики, гальмові конструкції підкранових балок або несучі конструкції під технологічне устаткування.

M_{KT7} – використання композитних FRP-матеріалів, реалізується шляхом зовнішнього армування розтягнутих або згинальних зон конструкцій. Даний підхід забезпечує підвищення міцності, жорсткості та тріщиностійкості без істотного збільшення маси конструкцій та зміни їх геометричних параметрів. Підсистема включає різні способи закріплення та попереднього напруження композитних елементів, що визначаються умовами доступу, експлуатаційними обмеженнями та вимогами до довговічності підсилення (рис. 5.20).

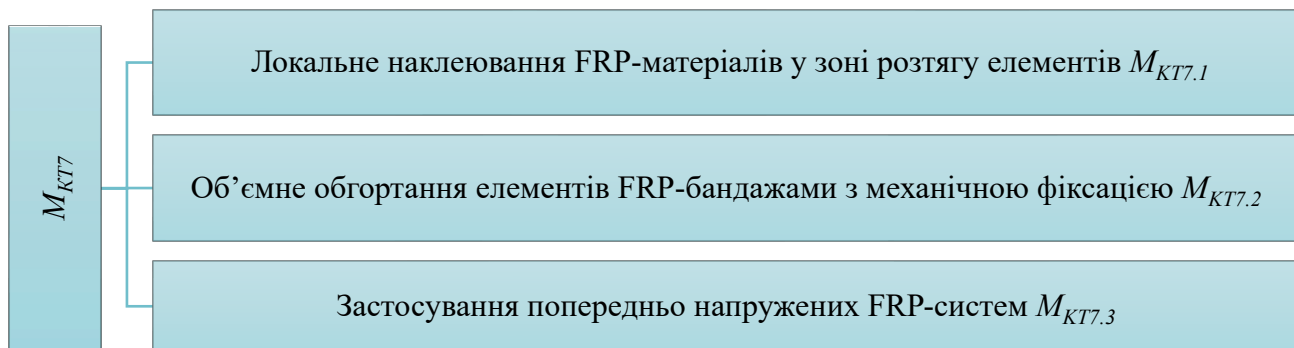


Рис. 5.20. Підсистема моделей КТР підсилення каркасу з використанням FRP-матеріалів M_{KT7}

За $M_{KT7.2}$ наклеювання бандажів здійснюється по всій зовнішній поверхні елемента каркасу будівлі (авторська розробка [261]). Для зручності та підвищення швидкості виконання процесу підсилення бандажі оснащено спеціальними механізмами – кулачковими замками, які автоматично фіксуються при защіпанні, працюючи за принципом кнопки (рис. 5.21). При використанні

$M_{KT7.3}$ в залізобетонних конструкціях [262, 263] підвищує жорсткість, уповільнює утворення тріщин, покращує зчеплення, зменшує тріщиноутворення, дозволяє застосовувати смуги меншого перерізу, запобігає їх відшаруванню, зміщує нейтральну вісь для підвищення ефективності та збільшує допустиме навантаження.

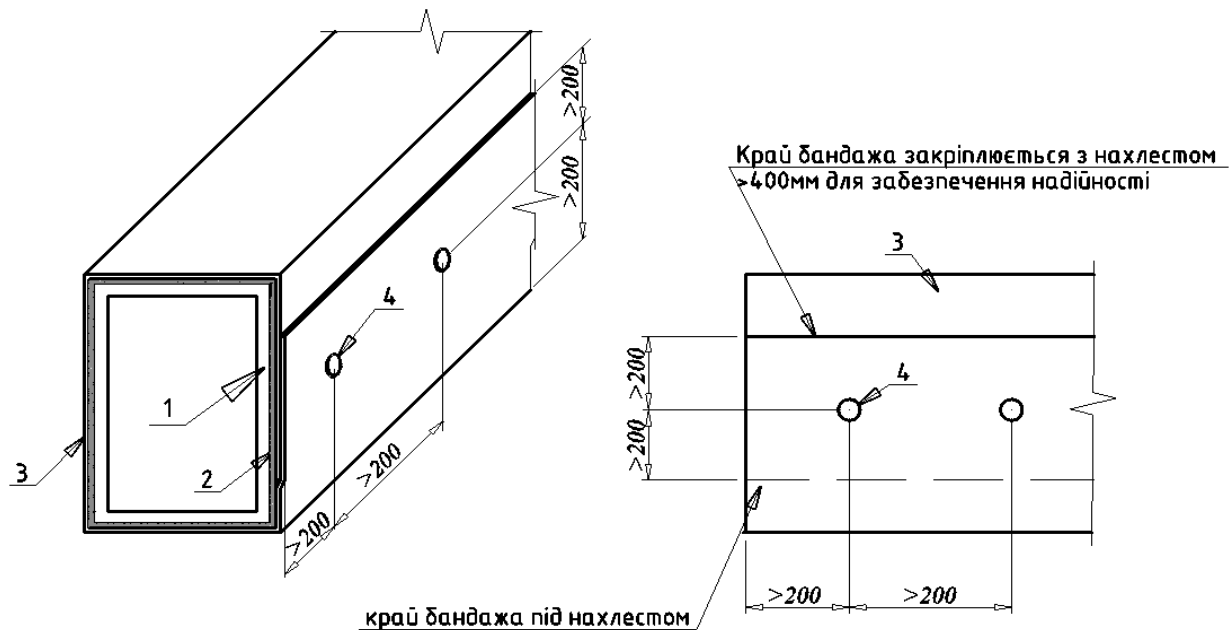


Рис.5.21. Спосіб кріплення країв бандажа з використанням кулачкових замків для зручності та пришвидшення фіксації" (1 – елемент каркасу будівлі (колона, балка), 2 – епоксидний клей, 3 – фіброармована система на основі вуглецю, що наноситься у вигляді одного, двох або більше шарів для підсилення конструкції залежно від необхідної несучої здатності, 4 – спеціальний механізм – кулачковий замок)

M_{KT8} – повна або часткова заміна елементів каркасу.

M_{KT9} – підсилення шляхом попередньої напруги конструкцій каркасу будівель шляхом введення попередньої напруги в елементи або систему в цілому з метою зниження рівня робочих напружень, обмеження прогинів та підвищення несучої здатності без істотного збільшення маси або геометричних розмірів елементів. Метод застосовується як для локального підсилення окремих елементів, так і для коригування роботи конструктивної схеми в

цілому, зокрема в умовах реконструкції без повної зупинки експлуатації будівлі. Застосування цієї моделі є доцільним у випадках підсилення конструкцій, що працюють на згин і розтяг, а також при необхідності корекції напружено-деформованого стану під навантаженням.

Класифікація моделей підсилення шляхом попередньої напруги залежно від способу її створення та конструктивної реалізації наведена на рис. 5.22.

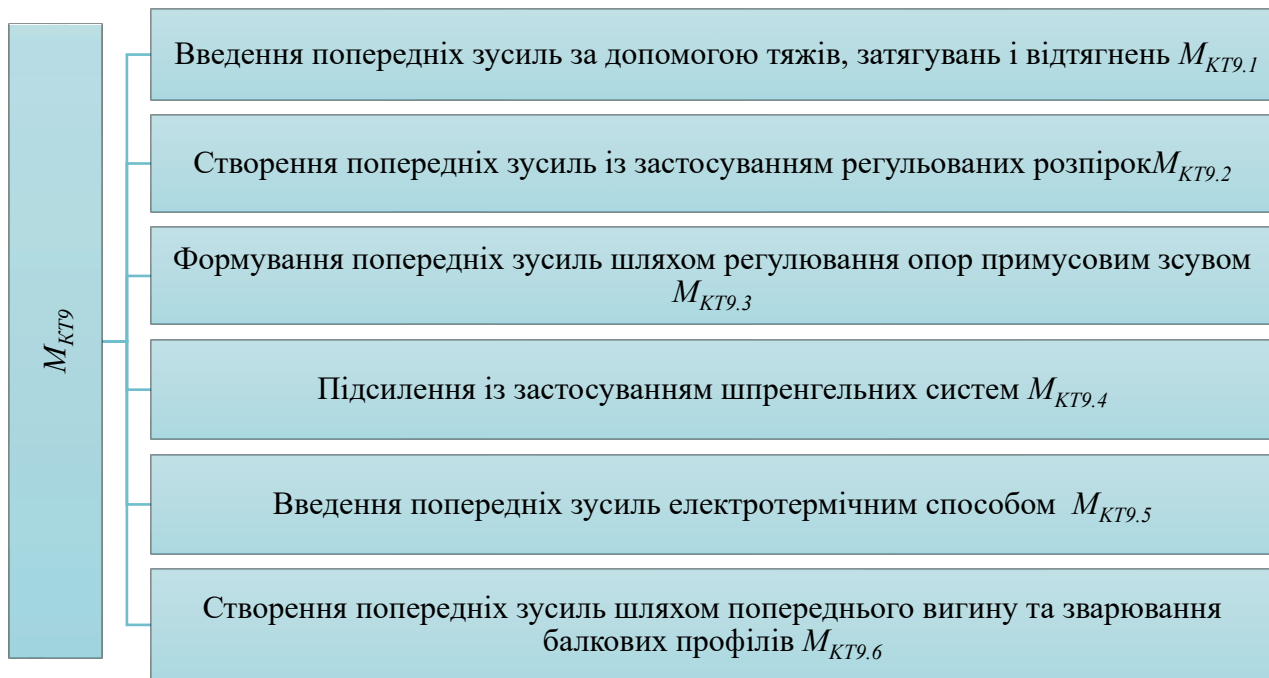


Рис. 5.22. Підсистема моделей КТР підсилення каркасу шляхом попередньої напруги M_{KT9}

У межах $M_{KT9.1}$ попередні зусилля вводяться за допомогою тяжів, зтягувань і відтягнень, що дозволяє ефективно зменшити розтягувальні напруження в основних елементах. $M_{KT9.2}$ передбачає використання регульованих розпірок для формування керованої системи внутрішніх зусиль. У підмоделі $M_{KT9.3}$ попередня напруга створюється шляхом регулювання опорних вузлів із примусовим зсувом, що забезпечує перерозподіл зусиль у конструктивній схемі. $M_{KT9.4}$ реалізується через обладнання шпренгельних систем, які змінюють роботу елементів на більш сприятливу з точки зору напруженого стану. Підмодель $M_{KT9.5}$ базується на електротермічному введенні попередніх зусиль, що дозволяє

досягати високої точності регулювання. У межах $M_{KT9.6}$ попередні зусилля формуються за рахунок попереднього вигину та зварювання балкових профілів, що є ефективним для металевих конструкцій.

M_{KT10} – поточний ремонт дефектів та пошкоджень будівельних конструкцій каркасу будівлі.

M_{KT11} – зменшення робочого прольоту конструкції шляхом установлення розвантажувальних виносних опор.

M_{KT12} – комбінована модель підсилення каркасу для аварійного та передаварійного стану каркасу з застосуванням металевих рам, хомутів, опор і FRP.

Збір і аналіз інформації щодо основних моделей M_{KT} подається у вигляді множини моделей КТР:

$$M_{КТР} = \{M_{КТ0} \dots M_{КТ12}\} \quad (5.23)$$

Для кожної групи функцій M_{KT} виділено підгрупи головних функцій M_{KTk} , які пов'язані з функціями основних моделей КТР. Кожна з наведених підсистем моделей визначає сукупність конструктивних, просторових та організаційно-технологічних обмежень, які враховуються при формуванні відповідних конструктивно-технологічних систем підсилення в умовах реконструкції.

У подальшому моделі M_{KT} використовуються як вхідні структурні елементи для подальшого моделювання трудомісткості, тривалості та собівартості процесів підсилення (розділ 5), а також для синтезу КТС (рис. 5.23), що дозволяє формалізувати вибір раціональних рішень з урахуванням всіх факторів впливу, а також для багатокритеріальної оцінки за критеріями N_i , R_i та A_i .

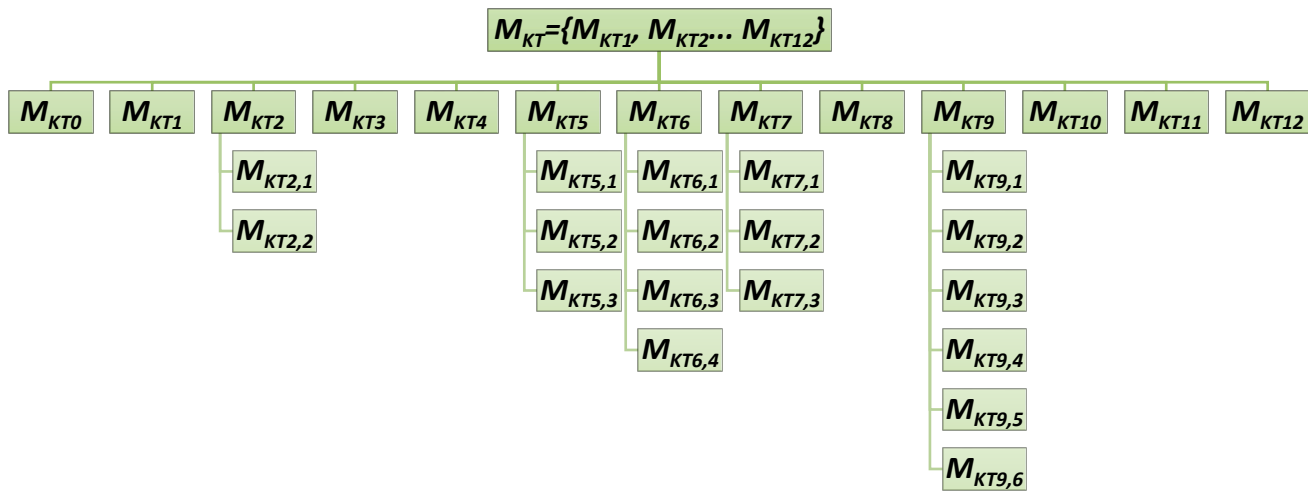


Рис. 5.23. Ієрархічна модель КТР при підсиленні каркасних конструкцій

Висновки по п'ятому розділу

1. Встановлено, що найвищу ефективність підсилення каркасних будівель у реконструкції забезпечує інтегрована організація обстеження, проєктування та виконання робіт як єдиної керованої системи із безперервним інформаційним супроводом між етапами. Розроблено формалізовану модель формування організаційно-технологічних рішень у вигляді множини взаємопов'язаних підпроцесів ОТР, що дозволяє генерувати та порівнювати альтернативні сценарії підсилення залежно від умов об'єкта. Запропоновано комплекс КРІСТ як інструмент інтеграції факторів ініціювання підсилення з конструктивно-технологічними та організаційно-технологічними моделями на основі теорії множин і логічної матриці відношень. Систематизовано моделі M_{OT} у дві групи (реалізації КТР та управління/оптимізації), що забезпечує вибір адаптивної комбінації рішень (зокрема із застосуванням 3D-сканування та BIM) для скорочення тривалості, зниження витрат і підвищення якості та безпеки робіт.

2. Встановлено, що ефективність і надійність підсилення каркасних будівель у реконструкції визначається не лише дефектністю елементів, а насамперед формалізованими просторово-планувальними характеристиками зон підсилення, які задають умови реалізації КТР та ОТР. Розроблено систему просторово-планувальних параметрів SPP та введено поняття *зони підсилення* як

елементарної структурної одиниці аналізу, що забезпечує порівнянність технологічних рішень і кількісну оцінку впливу геометрії, локалізації та насиченості робіт. Запропоновано показники оцінювання якості планувальної структури, зокрема коефіцієнт відхилення площі зон від раціонального інтервалу та коефіцієнт відносної висоти, а також встановлено, на основі статистичного аналізу, зниження трудомісткості за рахунок укрупнення та уніфікації зон. Встановлено кількісну залежність трудовитрат від насиченості зон елементами підсилення: збільшення m_j з 3 до 12 призводить майже до подвоєння трудовитрат, що обґрунтовує включення цього параметра до визначальних при виборі технологічної схеми. Вперше формалізовано середовище виконання робіт як багатofакторний параметр I_{sk} та запроваджено функціональну систему формування КТР, яка інтегрує нормоутворюючі та середовищні чинники в єдину модель обґрунтування рішень за критеріями якості.

3. Встановлено, що в умовах реконструкції каркасних будівель параметри робочих місць виконавців (обмеженість фронту робіт, доступність, суміщення з діючим виробництвом, санітарно-гігієнічні та безпекові вимоги) є визначальним чинником якості підсилення та істотно впливають на трудомісткість і тривалість робіт через вибір засобів підмоцнування. Розроблено системну класифікацію робочих місць за критеріями участі в процесі, спеціалізації, рухливості, розподілу праці, механізації та складності, що дозволяє формалізовано узгоджувати КТР і ОТР з реальними просторово-виробничими обмеженнями. Сформовано та систематизовано сукупність факторів обмежених умов і параметричний простір впливів (конструктивні D, технологічні T, організаційні O та додаткові A), який виконує роль проміжної ланки між середовищем виконання робіт і вибором типу підмостей як організаційно-технологічного елемента КТР. Обґрунтовано, що інтеграція параметрів робочих місць у КТР забезпечує керовану оцінку і підвищення якості підсилення за узагальненими критеріями $N_i-R_i-A_i$ (надійність, ефективність, сталість) та знижує ризик несанкціонованих технологічних відхилень під час монтажу.

4. Розроблено та систематизовано систему базових моделей конструктивно-технологічних рішень підсилення каркасних конструкцій $M_{KT0}-M_{KT12}$, яка, на відміну від традиційних класифікацій за матеріалом або типом елемента, вперше структурована з позицій організаційно-технологічної реалізації в умовах реконструкції з урахуванням ступеня втручання в роботу каркасу, просторово-планувальних обмежень і виробничого середовища. Запропоновано формалізований опис моделей у вигляді множини $M_{KT} = (M_{KT0}, \dots, M_{KT12})$ та виділено підсистеми ключових напрямів підсилення (локальне конструктивне підсилення, зміна конструктивної схеми, підвищення просторової жорсткості, FRP-підсилення, попереднє напруження тощо), що дозволяє однозначно визначати область застосування кожної моделі за технічним станом і умовами виконання робіт. Обґрунтовано, що кожна підсистема МКТ задає специфічні конструктивні, просторові та організаційно-технологічні обмеження, які необхідно враховувати при формуванні конструктивно-технологічних систем (КТС) підсилення для конкретного об'єкта реконструкції. Запроваджено використання моделей МКТ як вхідних структурних елементів подальшого моделювання трудомісткості, тривалості та собівартості процесів, а також для синтезу КТС і багатокритеріальної оцінки рішень за критеріями $N_i-R_i-A_i$, що створює методологічну основу для обґрунтованого вибору раціональних технологій підсилення.

5. Основні результати розділу викладені роботах [24, 25, 32, 56, 285].

РОЗДІЛ 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРУДОМІСТКОСТІ ПРОЦЕСІВ ПІДСИЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ

6.1. Моделювання технологічних схем організації та механізації процесів монтажу елементів підсилення конструкцій каркасів

На сучасному етапі розвитку будівельної науки процеси підсилення конструкцій каркасних будівель розглядаються як складні техніко-технологічні системи стохастичного типу, у яких взаємодіють численні фактори – конструктивні, організаційні, матеріально-технічні та просторові. Згідно з роботами [16, 18, 264-267], підвищення ефективності технологічних процесів можливе лише за умови їхнього формалізованого моделювання з урахуванням мікроелементної структури робіт, типу елементів, технологічної схеми організації та механізації, а також ефектів суміщення операцій.

Для вирішення проблеми побудови моделі технологічного процесу треба враховувати, що кожна конструктивно-технологічна модель включає багато однакових окремих дій, які можуть бути розташовані в різній послідовності. Або, для різних конструктивних елементів (наприклад, прольотних, таких як ферми, балки, або підкранові балки) можуть використовуватись однакові КТР, тобто технологічний процес та технологічна схема за структурою можуть бути однаковими. Однак, якщо класифікувати елементи, то вони будуть вважатись різними, які потребують окремих КТР підсилення [16, 18, 21].

Для підсилення конструкцій каркасних будівель у межах даного дослідження розроблено науково обґрунтовану модель нормування, адаптовану до реальних умов і сучасного технічного рівня реконструкції, на основі робіт проф. Г.М. Тонкачєєва [16, 18]. Ключовим принципом моделі є мікроелементний підхід, який передбачає декомпозицію технологічних операцій на елементарні

дії. Це дозволяє формалізувати й уніфікувати розрахунок трудомісткості, зберігаючи гнучкість моделі.

Побудова моделі технологічного процесу підсилення конструкцій починається з визначення мікроелементної структури робіт, що включає елементарні дії виконавців — *взяти, перемістити, встановити, закріпити, перевірити* тощо [18]. Кожна дія описується набором параметрів, які у сукупності формують елементарну технологічну операцію. Такі операції об'єднуються у процеси TRP (Technological Reconstruction Process), що відображають рівні ієрархічної структури технологічної системи (рис. 6.1) [19].

$$TRP_b \rightarrow TRP_g \rightarrow TRP_p \rightarrow TRP_o \rightarrow W_r \quad (6.1)$$

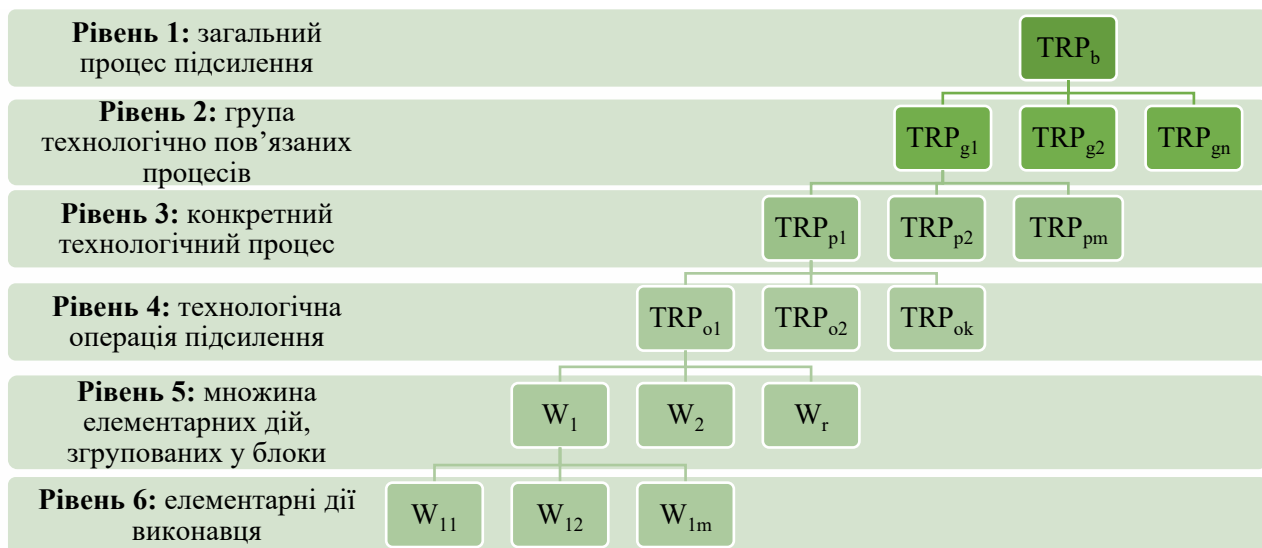


Рис. 6.1. Ієрархічна структура будівельного процесу реконструкції

Нормування здійснюється на четвертому рівні структури будівельних процесів TRP_o , де спостерігається відносно стабільна структура операцій.

Технологічний процес підсилення конструкцій каркасів будівель може бути представлений як ієрархічна система взаємопов'язаних рівнів, що розкладається на кластери, процеси, операції та дії. Загальна модель системи технологічних процесів реконструкції без урахування зовнішніх впливів може бути подана функцією:

$$TRP(U) = f(TRP_b, TRP_g, TRP_p, TRP_o, W_r) \quad (6.2)$$

де U – універсальна множина елементів кінцевого продукту реконструкції (підсиленних конструктивів, заміна елементів будівель тощо), TRP_b – загальний процес реконструкції будівлі; TRP_g – група технологічно пов'язаних процесів; TRP_p – конкретний процес (наприклад, підсилення колони, ригеля чи балки); TRP_o – технологічна операція, W_r – комплекси елементарних дій або поодинокі дії (мікроелемент технологічної структури).

Рівень 1 – TRP_b : загальний процес підсилення каркасної будівлі під час реконструкції є системним рівнем, що охоплює весь комплекс робіт реконструкції всього каркасу будівлі: демонтаж, підсилення, заміну конструкцій. Він визначається множиною технологічних потоків і моделями організаційно-технологічних рішень:

$$TRP_b = \{TRP_{g1}, TRP_{g2}, \dots, TRP_{gn}\}. \quad (6.3)$$

На цьому рівні формується технологічна схема організації робіт, визначається послідовність етапів реконструкції, склад машин і механізмів, умови суміщення процесів.

Рівень 2 – TRP_g : група технологічно пов'язаних процесів. Вона включає окремі групи робіт, що забезпечують виконання спільного завдання, наприклад: підсилення колон та ригелів; монтаж нових елементів покриття; підсилення або заміна зв'язків жорсткості:

$$TRP_{g1} = \{TRP_{p1}, TRP_{p2}, \dots, TRP_{pt}\}. \quad (6.4)$$

Цей рівень характеризується технологічною взаємозалежністю процесів, які виконуються у спільному просторі або часовому інтервалі, а також узгодженням механізмів і ресурсів.

Рівень 3 – TRP_p : конкретний технологічний процес. На цьому рівні виділяється процес підсилення окремого елемента або групи елементів (наприклад, колони, балки, ферми). Процес складається з послідовності технологічних операцій:

$$TRP_{p1} = \{TRP_{o1}, TRP_{o2}, \dots, TRP_{ok}\}. \quad (6.5)$$

Кожен конструктивний елемент описується множиною атрибутів:

$$e = \{t(e), m(e), f(e), o(e)\}, \quad (6.6)$$

де: $t(e)$ – тип за функцією в каркасі (колона, ферма, ригель тощо); $m(e)$ – матеріал (металеві, дерев'яні, бетонні); $f(e)$ – форма (лінійні, плоскі, об'ємні); $o(e)$ – положення у просторі (горизонтальні, вертикальні, похилі),

Атрибути визначають структуру операцій, спосіб механізації та можливість суміщення дій. Наприклад:

- лінійні елементи → операції підйому, орієнтування, фіксації;
- бетонні елементи → додаткові процеси опалублення, ущільнення;
- похиле положення → ускладнені операції вивіряння та тимчасового закріплення.

Для кожного процесу задається технологічна схема організації і механізації, яка визначає модель транспортування (рис.6.2), спосіб подачі, підйому та встановлення елементів в залежності від факторів середовища [23]:

$$TRP_{p1} = f(e \in E, M_{KT_i}, M_{OT_j}, O_i, T_s, \Omega_{KTR}, M_M, a_{ik}, MountFix), \quad (6.7)$$

де $e \in E$ – атрибути елемента каркасу, M_{KT_i} – моделі КТР, M_{OT_j} – моделі ОТР; O_i – метод організації процесу (розділений, комплексний, комбінований), T_s – технологічна схема монтажу, Ω_{KTR} – середовище формування КТР.

Метод механізації елемента е (мобільні автомобільні крани, пневмоколісні крани малої вантажопідйомності, телескопічні підйомники, ручні та механізовані такелажні засоби тощо) визначається залежністю:

$$M_M(e, P) = f(m(e), g(e), o(e)), \quad (6.8)$$

де $g(e)$ – маса елемента; P – задана продуктивність процесу монтажу [18].

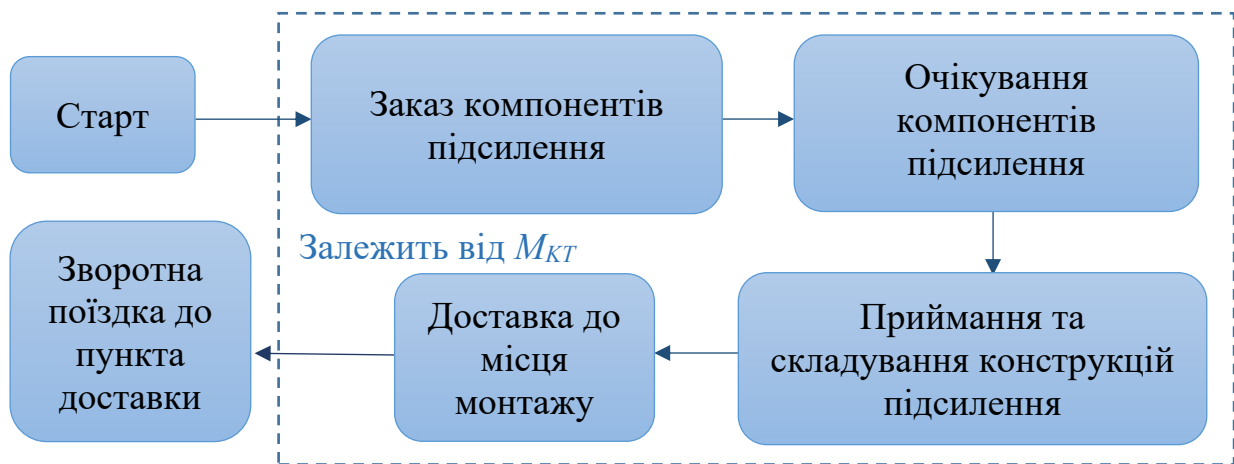


Рис. 6.2. Загальна модель транспортування необхідного обладнання та матеріалів

Монтажна складова підсилювального елемента для всіх типів елементів каркасних систем описується узагальненою моделлю:

$$MountFix(E, M_M, M_{Oj}) = \{Trans + Lift + Position + Fix + Control\} \quad (6.9)$$

де *Trans* – доставка та подача елемента, *Lift* – підйом і стабілізація, *Position* – точне орієнтування, *Fix* – закріплення або з'єднання, *Control* – контроль точності та виконання з'єднань.

Кожна стадія складається з множини атомарних дій:

$$a_{ik} = \{a_{1l}, a_{2m}, a_{3n}, a_{4o}\}, \quad (6.10)$$

де a_{1l} – поверхневе оброблення (нанесення, розрівнювання, очищення, фарбування, полірування, випалювання, антикорозійний захист, обдирання, наклеювання шарів); a_{2m} – перетворення форми об'єкта (різання, згинання, свердління, шліфування, наклеювання...); a_{3n} – перетворення структури об'єкта (збирання, ущільнення, змішування, заповнення, об'єднання...); a_{4o} – зміна положення об'єкта у просторі (піднімання, опускання, повертання, пересування, закріплення...).

Рівень 4 – TRP_o : технологічна операція підсилення. У межах моделювання технологічних схем організації та механізації доцільно математично формалізувати технологічну операцію підсилення конструкцій як відображення від множини параметрів елемента, організаційних і технологічних рішень до множини елементарних дій:

$$TRP_{o1}(e \in E, O, M(e, P)) = \{W_{1n}, W_{2n}, \dots, W_{im}\} \quad (6.11)$$

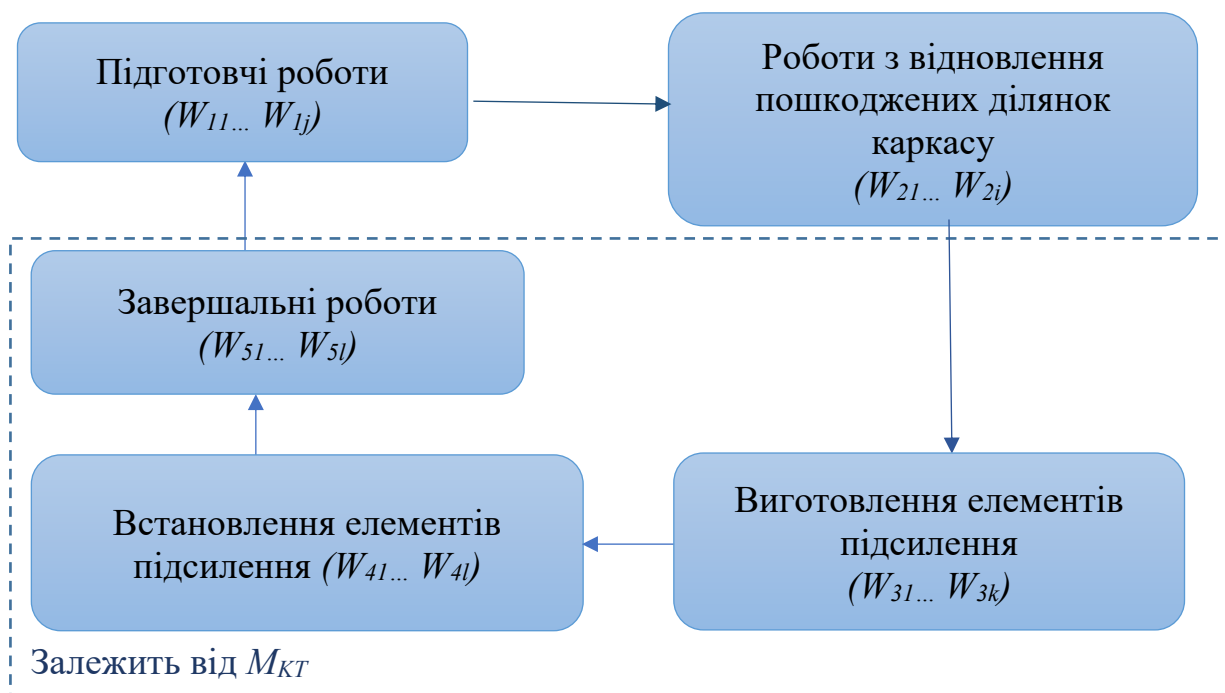


Рис. 6.3. Модель виконання робіт з підсилення

Рівень 5 – TRP_a : множина технологічних та механічних операцій (елементарних дій), згрупованих у блоки (рис.6.3). Загальна структура процесу підсилення конструкцій визначається множиною стадій:

$$S = \{W_1, W_2, W_3, W_4, W_5\}, \quad (6.12)$$

де $\{W_{1n}, \dots, W_{im}\}$ – множина елементарних технологічних і механічних дій, що відносяться до відповідної стадії процесу і формують її внутрішню структуру. Стадії мають такі змістовні блоки: W_1 – підготовчі роботи, W_2 – відновлення пошкоджених ділянок конструкцій, W_3 – виготовлення елементів, W_4 – монтаж та фіксація, W_5 – завершальні.

Рівень 6 – TRP_e : елементарні (атомарні) дії виконавця. Це найнижчий рівень декомпозиції, який математично можна описати так:

$$TRP_e(a_{ik}) = \{a_{11} \dots a_{1l}, a_{21} \dots a_{2m}, a_{31} \dots a_{3n}, a_{41} \dots a_{4o}\} \quad (6.13)$$

де a_{ik} — атомарна дія, що формує дію a_{ik} , яка у свою чергу формує стадію W_i .

Кожна стадія процесу $W_{im} \in S$ має власну підмножину елементарних дій $a_{ik}(W_i)$, що відображає специфіку технологічних операцій:

$$TP_o(W_i) = g(e, a_{ik}(W_i)) \quad (6.14)$$

де $TP_o(W_i)$ — технологічна операція, відповідна стадії W_i . Модель дозволяє враховувати послідовність та структуру робіт, а також їхню змінність залежно від типу процесу, властивостей елементів і умов механізації. Це забезпечує гнучке та формалізоване відображення трудомісткості у процесах підсилення конструкцій каркасних будівель.

Приклади відповідності між атрибутами елемента і типами процесів:

- Якщо $f(e)$ = лінійна $\rightarrow$ операції монтажу типу *піднімання, орієнтування, закріплення*.
- Якщо $m(e)$ = бетон $\rightarrow$ додаткові операції *ущільнення, опалублення, заповнення, розпалублення*.
- Якщо $t(e)$ = ферма/ригель $\rightarrow$ складні процеси *підйом + фіксація + стикування*.

- Якщо $o(e)$ = похиле положення $\rightarrow$ ускладнені операції *вивіряння, тимчасове закріплення, контроль стабільності*.

Наприклад, для Стадії W_4 — монтаж, W_{41} «піднімання елемента»: a_1 — приєднати стропи; a_2 — подати сигнал машиністу; a_3 — стабілізувати елемент у повітрі; a_4 — виконати точне позиціонування.

У межах даного дослідження нормування здійснюється саме на рівні TRP_o , де структура операцій є відносно стабільною і повторюваною. Це дає змогу формалізувати трудомісткість і створити алгоритм для синтезу норм часу на рівні процесів TRP_p .

Виходячи з принципів комбінаторики та теорії множин [265, 266], за новою системою, кожна операція технологічного процесу підсилення конструкцій може бути подана узагальненою структурною моделлю:

$$W - E^h T^l D^m - C, \quad (6.15)$$

де W — worker (виконавець, працівник); E — equipment (комплекс мобільного технологічного обладнання: зварювальні апарати, підйомно-транспортні механізми, монтажні пристрої); T — інструменти, пристосування для виконання операцій (tools); D — допоміжні пристрої та системи, що забезпечують процес (devices/support systems); C — деталь або елемент конструкції, на який спрямована дія (construction element); h, l, m — коефіцієнти множинності оцінювання для кожної множини засобів праці.

Для процесів підсилення конструкцій каркасних будівель характерні нефіксоване робоче місце, мобільність технологічного обладнання та просторове переміщення виконавців, зумовлене необхідністю монтажу і взаємодії з наявними елементами споруди. У цьому контексті множини $E^h T^l D^m$ відображають комплекси мобільного технологічного обладнання (зварювальні апарати, підйомно-транспортні механізми, монтажні пристрої), інструментів та допоміжних систем, що забезпечують реалізацію конкретного технологічного прийому в умовах реконструкції.

Під час моделювання враховується інтегрований вплив внутрішніх і зовнішніх факторів, включно з умовами роботи, рівнем механізації, організацією потоків, ризиками виробничого середовища тощо. Це дозволяє визначити функціональні залежності між тривалістю операцій, витратами ресурсів і рівнем механізації.

Кількість можливих структурних варіантів технологічних операцій визначається комбінаціями взаємодії окремих дій. Для n елементів операцій загальна кількість можливих варіантів послідовності становить:

$$W = n! = n \times (n - 1) \times (n - 2) \times \dots \times 1. \quad (6.16)$$

Наприклад, при восьми різних дій ($n=8$) можливе $8!=40\,320$ різних перестановок. Для дев'яти елементів – $9!=362\,880$ схем. Це свідчить про високу варіативність процесу та необхідність оптимізаційних методів при виборі технологічної послідовності. Для зменшення кількості варіантів, згідно розроблюваної системи, пропонується об'єднання сумісних операцій (наприклад, очищення + нанесення покриття, монтаж + вирівнювання).

Технологічна схема подається у вигляді процесної моделі (рис.6.4):

$$TS = (TRP_o, A), \quad (6.17)$$

де TRP_o – множина операцій, A – множина допустимих технологічних переходів між операціями:

$$A = \{(W_1 \rightarrow W_2), (W_2 \rightarrow W_3), (W_3 \rightarrow W_4)\}. \quad (6.18)$$

Такий запис дозволяє формалізувати структуру процесу не лише як послідовність дій, а як систему керованих переходів із визначеними обмеженнями та параметрами. Загальна структура технологічного процесу підсилення конструкцій, наведена на рис. 6.5, відображає послідовність етапів та

можливість паралельного виконання окремих операцій, що забезпечує оптимізацію тривалості та раціональне використання ресурсів.

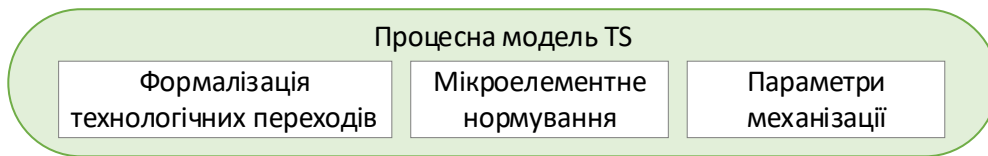


Рис. 6.4. Процесна модель технологічної схеми підсилення

На відміну від традиційних описових підходів [21, 26, 28, 34-38], запропонована вище система моделювання базується на формальному визначенні технологічних переходів між операціями та їх параметризації. Так, для монтажу колони технологічні переходи визначаються логічними обмеженнями: підйом можливий лише після стропування ($1 \rightarrow 2$), орієнтування виконується під час або після підйому ($2 \rightarrow 3$), установка допускається лише після орієнтування ($3 \rightarrow 4$), далі виконується тимчасове закріплення ($4 \rightarrow 5$), після якого здійснюється контроль вертикальності ($5 \rightarrow 6$).

Для кожного переходу визначаються характеристики A_i : можливість паралельного виконання (A_1), ресурсні залежності (A_2), обмеження за механізацією (A_3) та часові пріоритети (A_4). Представлення цих залежностей у вигляді мережевої структури забезпечує керованість та відтворюваність процесу, дає змогу враховувати атрибутивні характеристики елемента $\{t, m, f, o\}$ при виборі засобів механізації та переходити від лінійної схеми монтажу до оптимізаційних моделей із урахуванням сумісності операцій.

Комбінаторний аналіз варіантів поєднання дій показує, що раціональне об'єднання сумісних операцій (наприклад, очищення + нанесення покриття; монтаж + вирівнювання; контроль + фарбування) дозволяє знизити трудомісткість на 15–20 % без погіршення якості та безпеки виконання робіт. Це підтверджує доцільність застосування формалізованих алгоритмів синтезу технологічних схем.

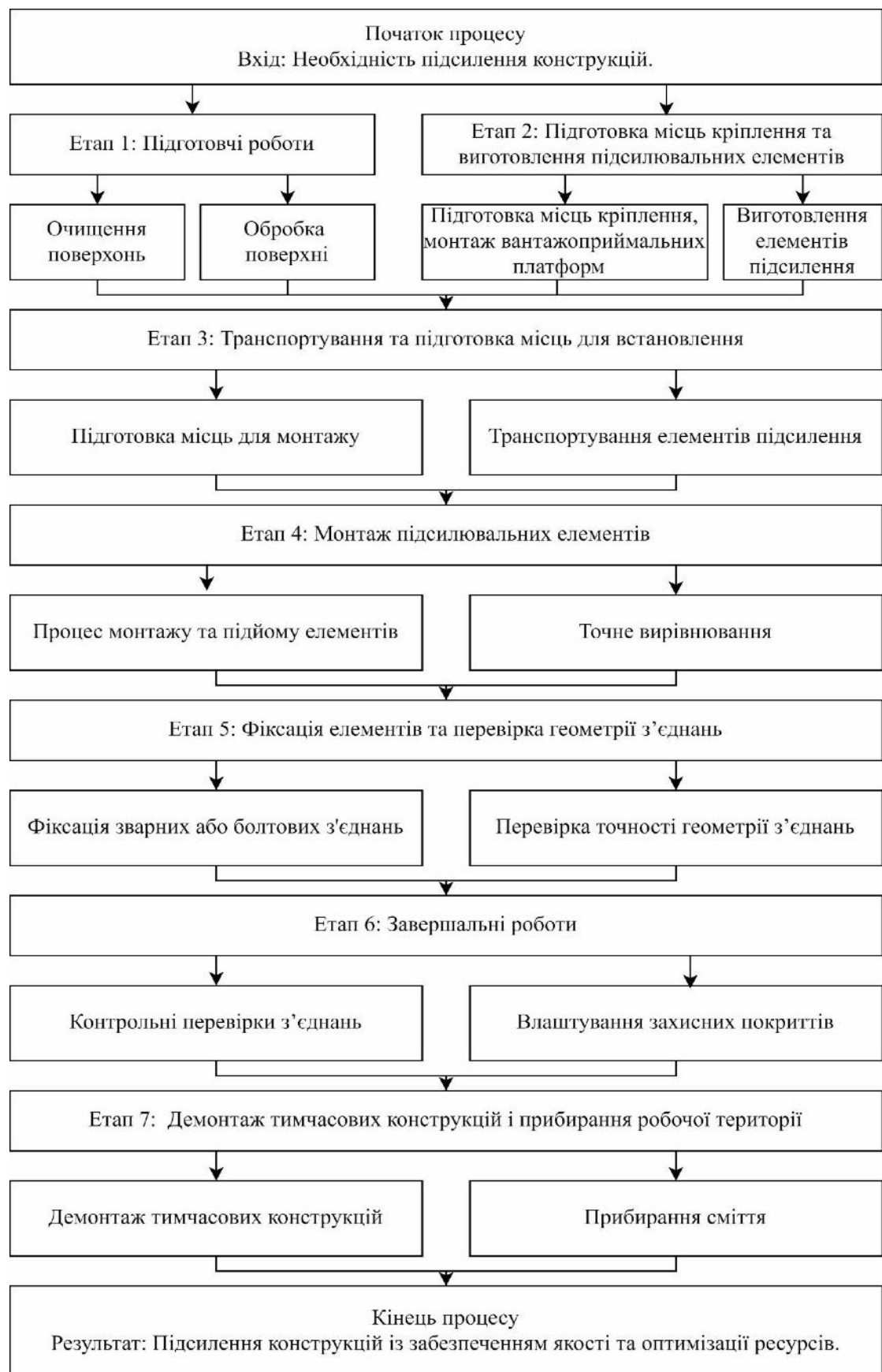


Рис. 6.5. Структурно-процесна модель підсилення конструкцій каркасних будівель при реконструкції

Запропонована модель забезпечує інтеграцію мікроелементного нормування, ОТР і параметрів механізації в єдиній аналітичній системі. Вона створює методичну основу для автоматизованого формування технологічних схем підсилення, прогнозування тривалості робіт, обґрунтованого вибору механізації та комплексної оптимізації ОТР.

6.2. Дослідження трудомісткості та тривалості монтажу елементів підсилення конструкцій каркасів

У цьому розділі представлено результати комплексного дослідження трудомісткості та тривалості виконання робіт з підсилення конструкцій каркасних будівель. Дослідження ґрунтується на емпіричній базі, сформованій у процесі виконання обстеження, проектування та хронометражних фіксацій фактичних витрат праці на об'єктах реальної реконструкції. Об'єктом натурних досліджень обрано цех ТОВ «Електросталь» (м. Курахове, Донецька область), схема розташування дефектів та елементів, що потребують підсилення, наведена на рис. 6.6.

Надалі наведені результати використовують сформовану емпіричну базу та прийняту систему декомпозиції операцій. Такий підхід забезпечив можливість розробити методику нормування процесів підсилення, адаптивну до різних моделей КТР ($M_{КТ}$). Сукупність даних, отриманих у ході вимірювань і моделювання, є підґрунтям для подальших розрахунків трудомісткості та тривалості будівельно-монтажних робіт за допомогою аналітичного та табличного опрацювання експериментальних даних. Обсяг вибірки для хронометражних спостережень виконання дій за кожним процесом підсилення становив 20 вимірювань, що відповідає загальноприйнятій практиці проведення 10–30 спостережень залежно від складності та варіабельності процесу. Такий обсяг вибірки забезпечує статистичну достовірність середніх значень тривалості операцій, дозволяє мінімізувати випадкові відхилення та обґрунтовано встановлювати норми часу на виконання будівельних робіт [256, 260, 268].

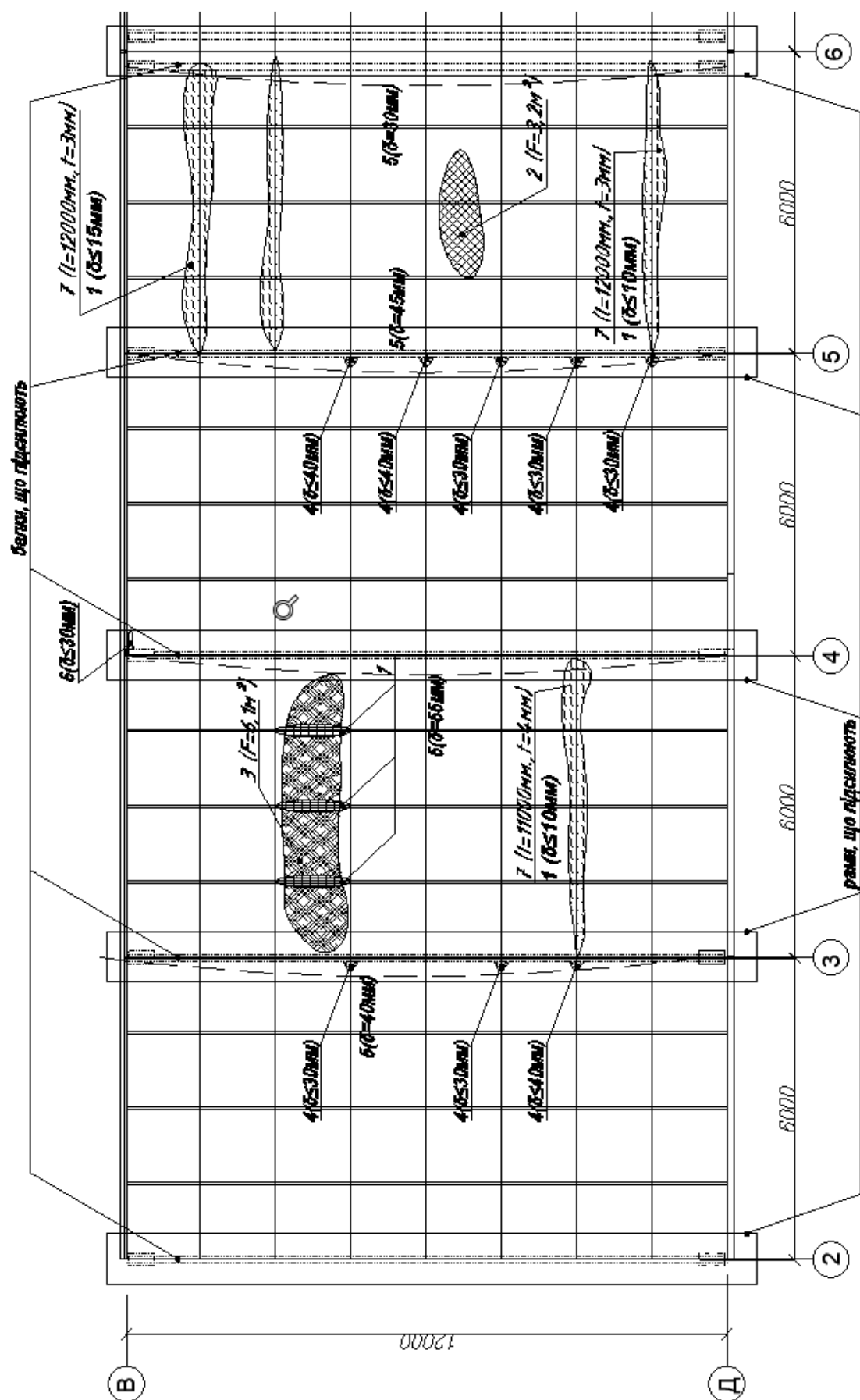


Рис. 6.6. Схема розташування дефектів і пошкоджень елементів каркасу та покриття із зазначенням елементів, що потребують підсилення. ТОВ «Електросталь», м. Курахове Донецької області

У межах цього розділу виконано узагальнення польових досліджень, проведено порівняння результатів для різних моделей M_{KT} та сформовано механізми оцінювання впливу окремих груп операцій на загальну трудомісткість монтажу. Поєднання емпіричних вимірів і формалізованих моделей підтверджує коректність отриманих результатів і дозволяє використовувати результати при проектуванні та організації робіт з підсилення каркасних будівель.

Проведені польові дослідження дозволили сформувані розгорнуті матриці складових норм витрат праці для всіх основних операцій процесу підсилення конструкцій каркасів будівель. На основі класифікації механічних операцій (дій) в розділі 3.3 та принципів моделювання процесів при підсиленні конструкцій, отримані хронометражні дані були систематизовані у вигляді таблиць-матриць, що відтворюють структуру технологічних операцій, їхню трудомісткість і внесок у загальну норму часу [18]. Ці матриці є складовою частиною створеної автором емпіричної бази, яка стала основою для розроблення адаптивної методики нормування трудомісткості для різних моделей КТР (M_{KT}).

Методика визначення трудомісткості ґрунтується на поетапній декомпозиції монтажного процесу на операції та мікрооперації. Для кожної з них фіксувалися тривалість виконання, кількість виконавців, рівень і вид механізації, а також наявні перерви й обмеження, що виникали в реальних умовах виробництва. Такий підхід забезпечив формування репрезентативного масиву емпіричних даних, який у подальшому було використано для аналізу закономірностей перебігу процесів і побудови узагальнених норм витрат праці. Розрахунок норм здійснено відповідно до формалізованої методики декомпозиції технологічних процесів на елементарні дії та операції, наведеної у розділі 4.4. Повні приклади формування матриць складових норм витрат праці для окремих операцій підсилення існуючих конструкцій каркасу цеху ТОВ «Електросталь» подано у додатку А.

Визначення складу та норм витрат праці для підсилення горизонтальних конструкцій каркасу ґрунтується на параметрах підсилювальних та підсилюючих елементів, які забезпечують сприйняття проєктних навантажень і

довготривалу працездатність конструкції. До таких параметрів належать матеріали, геометричні характеристики, типи з'єднань і системи захисту поверхонь, які безпосередньо впливають на трудомісткість і тривалість виконання робіт, що використовуються як кількісні критерії в межах економічного та технологічного аспектів.

Для прикладу, підсилювальна балка, розглянута у цьому дослідженні, має такі основні характеристики:

Матеріал: залізобетон.

Геометрія: довжина 9–12 м.

Висотність виконання робіт: 4–8 м.

Антикорозійний захист: ґрунтовка ГФ-021 і фарба ПФ-115.

Розрахункове навантаження: 20–30 кН/м.

Ці параметри визначають вимоги до підготовчих операцій, виготовлення і встановлення елементів підсилення, а також до завершальних робіт. Відповідно, норми часу та трудомісткість робіт формуються на основі таких груп впливових факторів:

1. Підготовка конструкції

- очищення поверхонь залежно від типу забруднень;
- виконання антикорозійних робіт залежно від площі та матеріалу;
- підбір способу видалення дефектів.

2. Виготовлення елементів підсилення

- зварювання залежно від типу та довжини швів;
- попередня механічна обробка;
- фарбування елементів після виготовлення.

3. Монтажні роботи

- організація підйому із застосуванням відповідної механізації;
- точне вивірювання та фіксація балки;
- з'єднання болтовими чи зварними елементами.

4. Завершальні роботи

- Контроль якості включає геометричний контроль рівня та просвітів, а також перевірку якості з'єднань;
- ультразвукова перевірка швів;
- нанесення захисних покриттів у місцях монтажних стиків.

Використання різних моделей M_{KT} дозволяє досягти необхідної міцності, стійкості та надійності конструкцій при різних витратах ресурсів. Кожна модель має власний набір операцій, різний рівень механізації, різний обсяг виготовлення елементів та особливості монтажу. У цьому контексті важливим є правильний вибір технологічної моделі для конкретних умов, що дозволяє оптимізувати витрати та забезпечити надійність конструкцій у довгостроковій перспективі.

Таблиця 6.1

Відображення складу робіт

№ пр	Найменування операцій	Одиниця виміру	Кількість	
			на поверх	на будівлю
1	Підготувальні роботи	шт	х	х
2	Роботи з відновлення пошкоджених ділянок елементу каркасу		х	х
3	Виготовлення елементів підсилення	шт	х	х
4	Встановлення елементів підсилення	шт	х	х
5	Завершальні роботи	шт	х	х

Саме тому розрахунок норм витрат праці для моделей M_{KT0} – M_{KT12} є ключовим для оцінювання ефективності технологічних рішень. Усі моделі підсилення, сформовані в розділі 5.4, включають багатоступеневу структуру робіт (табл.6.1). Підготовчі та відновлювальні роботи є однаковими для всіх моделей M_{KT} , оскільки вони визначаються станом існуючих конструкцій. Завершальні роботи також уніфіковані, за винятком моделі M_{KT7} , у якій застосовуються FRP-матеріали, що потребують іншої технології захисту та контролю. Ключові відмінності між M_{KT} виявляються саме в операціях « W_{3i} – Виготовлення елементів підсилення» та « W_{3j} – Встановлення елементів

підсилення», що й формує значну різницю у трудомісткості та загальній тривалості процесів.

Наведені нижче технологічні моделі процесів підсилення каркасних конструкцій можуть бути використані як для металевих, так і для залізобетонних елементів. У випадку залізобетонних конструкцій додатково може виникати потреба у встановленні закладних деталей або хомутів для забезпечення надійного кріплення підсилюючих елементів, приклад реалізації яких наведено на рис. 6.7.

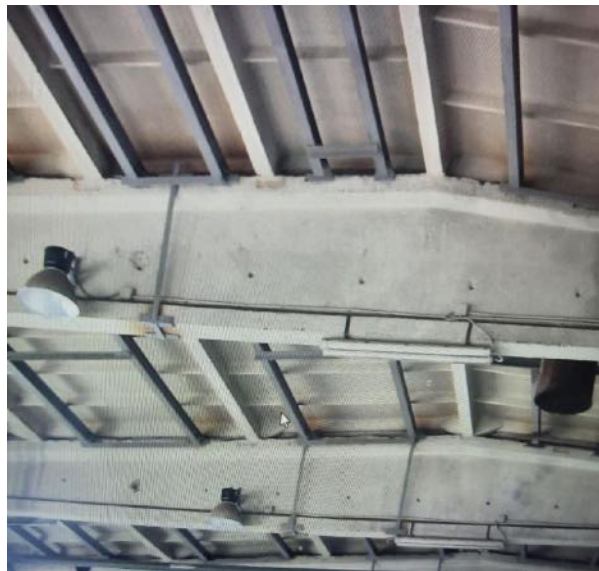


Рис. 6.7. Встановлення хомутів у залізобетонних балках для надійного кріплення підсилюючих елементів у разі незадовільного стану плит покриття (ПУМА УГП «Укрхімтрансміак», м. Горлівка, Донецька область)

Нижче подано результати моделювання технологічних процесів та структуровані таблиці норм витрат праці для підсилення балки з незначними пошкодженнями відповідно до моделі M_{KT1} . Представлений матеріал демонструє послідовність операцій, їх трудовий внесок та загальну тривалість процесу для цієї моделі. Для кожної групи встановлено характерні закономірності впливу на загальну трудомісткість монтажу. Зокрема, підтверджено, що найбільшу частку трудових витрат становлять монтажні операції, де зосереджено від 40 до 65 % загального часу. Це пов'язано з високою технологічною насиченістю етапу,

необхідністю точного орієнтування та закріплення елементів, а також використанням вантажопідйомної техніки.

Для систематизації технологічних процесів усі моделі подано в єдиному структурному вигляді:

$$M_{KT_i} = (W_{1i} \rightarrow W_{2i} \rightarrow W_{3i} \rightarrow W_{4i} \rightarrow W_{5i}) \quad (6.19)$$

де W_{1i} — підготувальні роботи (однакові для всіх моделей), W_{2i} — роботи з відновлення пошкоджених ділянок (однакові для всіх), W_{3i} — виготовлення елементів підсилення (варіант залежить від конкретної моделі), W_{4i} — монтаж елементів підсилення (варіант залежить від конкретної моделі), W_{5i} — завершальні роботи.

Відмінності між моделями M_{KT} проявляються лише в етапах W_3 , W_4 і W_5 . W_1 та W_2 — інваріантні, що дозволяє коректно порівнювати моделі за трудомісткістю та тривалістю.

M_{KTI} — Збільшення перерізу елементів шляхом приварювання додаткових металевих елементів. Встановлення додаткових балок підсилення для підвищення міцності, жорсткості та надійності конструкції.

Додаткові балки або ферми розміщуються поруч, під або над основним елементом, що підсилюється. Схема підсилення залізобетонних балок металевими поряд показана на рис. 6.8. Реалізація підсилення залізобетонної балки перекриття металевими балками із прокатних профілів представлена на рис.6.9. Розрахунок норм витрат праці для поточного підсилення виконано в таблицях 6.2-6.6 за формалізованою методикою декомпозиції технологічних процесів на елементарні дії та операції.

Операція «Підготувальні роботи» розкладається на наступний комплекс дій:

$W_{1.1}$ — Влаштування підмостей;

$W_{1.2}$ — Встановлення стійок;

$W_{1.3}$ — Підготовка до очищення (огляд конструкції);

$W_{1.4}$ — Часткове зняття діючих навантажень;

$W_{1.5}$ — Очищення поверхонь від бруду.

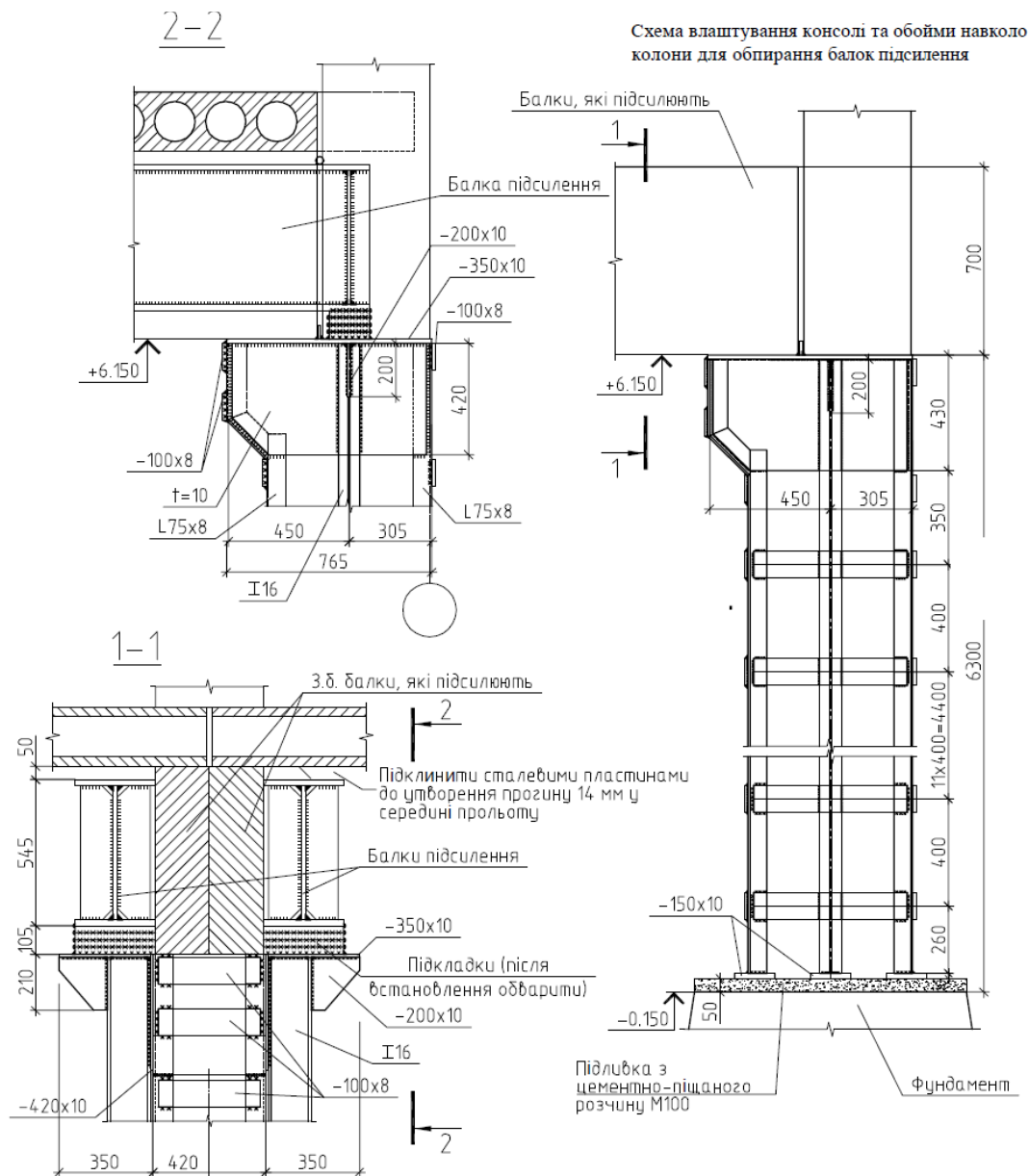


Рис. 6.8. Схема підсилення залізобетонних балок металевими. Підсилення колон обіймою з кутиків

Таблиця 6.2

Матриця складових норми витрат праці на підготувальні роботи

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{1.1}$								7	56	2	112
$W_{1.2}$				5					20	2	40
$W_{1.3}$				4					16	2	32
$W_{1.4}$					7				35	1	35
$W_{1.5}$						6			36	2	72
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * K_r / V_e = 0,01667 * 291 * 1,2 / 1 = 5,82$ люд-год/ балку											291

* суміщення можливе для дій: $W_{1.1}$, $W_{1.2}$, $W_{1.3}$; $W_{1.5}$, $W_{1.6}$.



Рис. 6.9. Підсилення залізобетонної балки перекриття металевими балками із прокатних профілів. Підсилення колон обоймами з куточків.

ТОВ «Електросталь», м. Курахово Донецької області

Операція «Ремонтні роботи із відновлення пошкоджених ділянок каркасу» розкладається на наступний комплекс дій:

$W_{2.1}$ – підготовка робочого місця із забезпеченням необхідного обладнання та інструментів.;

$W_{2.2}$ – механічне очищення пошкоджених ділянок (металевими щітками, скарпелями та піскоструминним методом).;

$W_{2.3}$ – розшивка тріщин (трикутна борозна для тріщин шириною розкриття до 1 мм).

$W_{2.4}$ – перевірка якості вирубки (простукування молотком);

$W_{2.5}$ – очищення поверхні струменем води під тиском

$W_{2.6}$ – зволоження основи протягом 2 годин перед нанесенням ремонтного розчину;

$W_{2.7}$ – нанесення шару ґрунтовки (суміш MasterEmaco S 5400 (Emaco Nanocrete R4) з водою);

$W_{2.8}$ – нанесення ремонтного матеріалу MasterEmaco S 5400 (Emaco Nanocrete R4) (метод «мокрый по мокрому»), вирівнювання поверхні;

$W_{2.9}$ – затирка поверхні пластиковою або дерев'яною дошкою;

$W_{2.10}$ – нанесення ґрунтувального складу NEOKRYLL від "OIKOS";

$W_{2.11}$ – фарбування або побілка поверхні у два шари;

$W_{2.12}$ – контроль якості.

Таблиця 6.3

Матриця складових норми витрат праці на ремонтні роботи із відновлення пошкоджених ділянок каркасу

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{2.1}$							6		42	2	84
$W_{2.2}$						8			48	2	96
$W_{2.3}$							7		35	2	70
$W_{2.4}$							4		28	1	28
$W_{2.5}$						6			36	2	72
$W_{2.6}$						5			30	2	60
$W_{2.7}$							4		28	1	28
$W_{2.8}$						7			42	2	84
$W_{2.9}$						6			36	2	72
$W_{2.10}$							5		35	1	35
$W_{2.11}$							6		42	2	84
$W_{2.12}$							3		21	1	21
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 734 * 1,2 / 1 = 14,68$ люд-год/ балку											734

* суміщення можливе для дій: $W_{2.2}$, $W_{2.3}$.

Операція «Виготовлення елементів підсилення» розкладається на наступий комплекс дій:

$W_{3.1}$ – доставка матеріалів для підсилення до місця;

$W_{3.2}$ – перевірка відповідності матеріалів проєкту;

$W_{3.3}$ – збирання та здача монтажних механізмів;

$W_{3.4}$ – виготовлення елементів підсилення балки;

$W_{3.5}$ – маркування елементів підсилення балки;

$W_{3.6}$ – виготовлення елементів обойми колони (кутики);

$W_{3.7}$ – виготовлення елементів обойми колон (накладки);

$W_{3.8}$ – виготовлення елементів опорних консолей;

$W_{3.9}$ – маркування елементів обойми колони та консолей;

$W_{3.10}$ – розбивка місць і пробивка 8 отворів ($\varnothing 50$ мм) у покритті в місцях встановлення лебідок;

$W_{3.11}$ – установка 4 лебідок для монтажу балок;

$W_{3.12}$ – контроль якості.

Для різання металевих елементів безпосередньо на будівельному майданчику застосовується, як правило, кутова шліфувальна машина з відрізним диском. Такий інструмент забезпечує достатню мобільність, не потребує стаціонарного обладнання та дозволяє виконувати підгонку елементів у проектне положення за місцем. За результатами хронометражних спостережень встановлено, що тривалість різання сталевієї полоси шириною 80–120 мм і товщиною 8–10 мм становить у середньому 20–40 с, а кутиків перерізом 75×8 – 100×10 мм — 30–60 с залежно від потужності інструмента, типу відрізного диска та умов виконання робіт. З урахуванням підготовчих і допоміжних дій, можливих нерівностей різку, необхідності точної підгонки та зміни положення заготовки у розрахунках прийнято узагальнені нормативи тривалості — 1 хв на один різ прокатного металу. Параметри елементарних дій та відповідні хронометражні матриці наведено у додатку А.

Таблиця 6.4

Матриця складових норми витрат праці на виготовлення елементів підсилення

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	0,5	1	2	3	4	5	6	7			
$W_{3.1}$								6	42	2	84
$W_{3.2}$								4	28	1	28
$W_{3.3}$								5	35	2	70
$W_{3.4}$							12		72	2	144
$W_{3.5}$	12								6	1	6
$W_{3.6}$		8							8	2	16
$W_{3.7}$		128							132	2	264
$W_{3.8}$		8							8	1	8
$W_{3.9}$	144								72	1	72
$W_{3.10}$			8				8		64	1	64
$W_{3.11}$						8			40	2	80
$W_{3.12}$			24						48	1	48
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 884 * 1,2 / 1 = 17,7$ люд-год/ балку											884

* суміщення можливе для дій: $W_{3.1}$, $W_{3.3}$; $W_{3.5}$, $W_{3.7}$, $W_{3.8}$.

Операція «Встановлення елементів підсилення» розкладається на наступний комплекс дій:

$W_{4.1}$ – доставка елементів до місця встановлення;

$W_{4.2}$ – приготування цементно-піщаного розчину на розширювальному цементі механічним способом

$W_{4.3}$ – нанесення шпателем розчину;

$W_{4.4}$ – монтаж кутиків обойми колон і закріплення хомутами;

$W_{4.5}$ – встановлення і приварювання накладок;

$W_{4.6}$ – заповнення решти простору між обоймою й колоною (виконати зачеканку між обоймою та колоною розчином, щоб забезпечити їх спільну роботу);

$W_{4.7}$ – стропування балки;

$W_{4.8}$ – підйом балки у проектне положення;

$W_{4.9}$ – вирівнювання та закріплення балки болтами, вивіряння та регулювання положення балки за допомогою підкладок;

$W_{4.10}$ – розстропування балки;

$W_{4.11}$ – коригування прогину балок для включення їх в роботу. За допомогою болтів або металевих клинів створити необхідний прогин балок підсилення для їх включення у загальну роботу конструкції.

Передбачено встановлення 128 накладок – 2 хв., закріплення накладанням 768 зварних швів – по 6 швів на одну накладку (по 1 мин на один шов) з нагріванням накладок до 200 град., за відповідальністю – 1 хв. на один шов. так само для кутиків та інших елементів.

Операція «Завершальні роботи» розкладається на наступний комплекс дій:

$W_{5.1}$ – очистка зварних швів;

$W_{5.2}$ – контроль якості зварних швів;

$W_{5.3}$ – контроль правильності виконання прогину балок;

$W_{5.4}$ – зачищення та фарбування;

$W_{5.5}$ – закладка 8 отворів і відновлення покрівлі;

$W_{5.6}$ – демонтаж тимчасових конструкцій (риштувань, стійок, лебідок, підмостей тощо);

$W_{5.7}$ – остаточне прибирання.

Таблиця 6.5

Матриця складових норми витрат на встановлення елементів підсилення

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{4.1}$							6		42	2	84
$W_{4.2}$								4	28	1	28
$W_{4.3}$							5		35	2	70
$W_{4.4}$								8	64	2	128
$W_{4.5}$	768	128							1024	2	2048
$W_{4.6}$								4	32	1	32
$W_{4.7}$				16					64	2	128
$W_{4.8}$					1				10	2	20
$W_{4.9}$		24							48	1	48
$W_{4.10}$		8							16	1	32
$W_{4.11}$								6	48	2	96
$W_{4.12}$											
$H_{hw} = 0,01667 * \Sigma Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 3782 * 1,2 / 1 = 55,8$ люд-год/ балку											2790

* суміщення можливе для дій: $W_{4.3}$, $W_{4.6}$.

Таблиця 6.6

Матриця складових норми витрат на завершальні роботи

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{5.1}$							6		42	2	84
$W_{5.2}$							5		35	2	70
$W_{5.3}$				7					28	1	28
$W_{5.4}$		21							42	2	84
$W_{5.5}$							5		35	2	70
$W_{5.6}$							7		49	2	98
$W_{5.7}$		16							32	2	64
$H_{hw} = 0,01667 * \Sigma Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 498 * 1,2 / 1 = 8,68$ люд-год/ балку											498

* суміщення можливе для дій: $W_{5.1}$, $W_{5.2}$; $W_{5.4}$, $W_{5.5}$.

Розрахунки загального часу виконання робіт без суміщення операцій – (послідовне виконання етапів) та з частковим суміщенням операцій (паралельне виконання робіт, якщо це можливо) представлені в таблиці 6.7.

Таблиця 6.7

Розрахунок загального часу виконання робіт для M_{KTI}

Етап робіт	Час без суміщення (люд-год)	Час із суміщенням (люд-год)
Підготувальні роботи	5,82	4,1
Відновлення пошкоджених ділянок	14,68	12,2
Виготовлення елементів підсилення	17,7	13,9
Встановлення елементів підсилення	55,8	41,2
Завершальні роботи	8,68	6,0
Загальний час	102,68	77,4

На графіку, наведеному на рис. 6.10, показано розподіл трудомісткості між основними етапами технологічного процесу підсилення конструкцій. Найбільший внесок у загальний час займають операції встановлення елементів підсилення: їх частка становить 40–65 % сумарної трудомісткості, що зумовлено високою технологічною насиченістю етапу, необхідністю точного орієнтування елементів, забезпеченням їхньої стабільності та застосуванням вантажопідіймальної техніки. Аналіз також показує, що суміщення технологічно сумісних операцій дає змогу скоротити загальну тривалість процесу на 24,6 %, що є суттєвим резервом підвищення ефективності. Для кожної групи операцій виявлено характерні закономірності впливу на загальну трудомісткість, що підтверджує визначальну роль монтажних процесів у формуванні структурного часу виконання робіт.

З огляду на значний обсяг хронометражних даних і типовість структури матриць норм витрат праці, в основному тексті подано репрезентативні приклади для окремих етапів технологічного процесу. Повні матриці складових норм витрат праці для всіх операцій і моделей КТР наведено у додатку А. Матеріали

щодо інших варіантів технологічних схем, що охоплюють решту технічно доцільних та потенційно застосовних моделей КТР для підсилення розглянутого типу конструктивного елемента в умовах реконструкції ($M_{КТ2.1}$, $M_{КТ2.2}$, $M_{КТ4}$, $M_{КТ5}$, $M_{КТ7}$, $M_{КТ9.1}$, $M_{КТ9.6}$ та $M_{КТ11}$), а також повні матриці часу для відповідних груп операцій, винесено до додатку А.

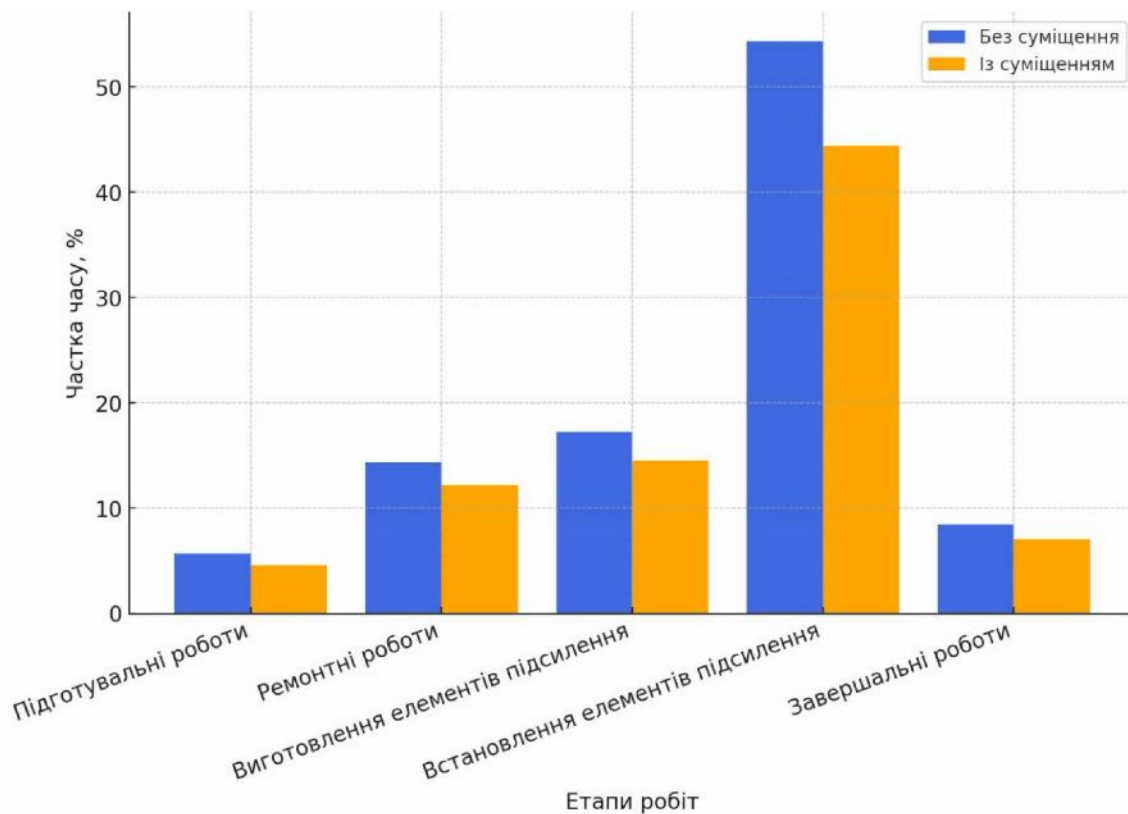


Рис. 6.10. Графік розподілу трудомісткості етапів технологічного процесу підсилення модель ($M_{КТ1}$) для послідовного та суміщеного виконання операцій

На підставі опрацьованих даних розроблено методику нормування, адаптовану до різних моделей конструктивно-технологічних рішень підсилення, яка враховує як послідовний, так і суміщений характер виконання операцій, що є визначальним в умовах реконструкції за обмеженого доступу та необхідності технологічної сумісності процесів. Виконані розрахунки дозволили кількісно оцінити трудомісткість окремих етапів підсилення та їхній внесок у загальну тривалість робіт. Отримані узагальнені показники використовуються для подальшого порівняльного аналізу моделей конструктивно-технологічних

рішень і формування вхідних даних для оцінювання їх ефективності за системою критеріїв якості.

Результати нормування витрат праці формують кількісну основу для подальшого багатокритеріального аналізу конструктивно-технологічних рішень, зокрема при дослідженні їх ресурсної доцільності та економічної ефективності, що розглядається у наступному розділі.

6.3. Дослідження витрат та техніко-економічної ефективності монтажу елементів підсилення каркасних конструкцій

Оцінювання ефективності різних технічно доцільних та потенційно застосовних способів підсилення розглянутого типу конструктивного елемента каркасу виконано, в межах прийнятих припущень і умов реконструкції, на основі результатів формалізованого дискретного нормування трудових витрат і хронометражних спостережень, методика яких наведена в попередньому розділі.

Подальші етапи дослідження були спрямовані на формування системи залежностей, які характеризують підсилення металевих балок. Вибір способу підсилення здійснювався на основі техніко-економічних параметрів і багатокритеріального аналізу, що дозволяє мінімізувати або збалансувати окремі техніко-економічні показники (ТЕП) з урахуванням пріоритетів: вартості, трудомісткості, тривалості робіт, просторових обмежень та екологічних вимог [146, 220, 221, 223, 224, 269].

Для систематизації можливих альтернатив введено поняття «аспектів», які розглядаються як укрупнені групи властивостей, у межах яких формуються кількісні критерії оцінювання ефективності моделей конструктивно-технологічних рішень. Оцінювання експлуатаційної надійності та доцільності підсилення каркасних будівель здійснювалося з урахуванням таких аспектів:

- Конструктивні характеристики (міцність, жорсткість, несуча здатність);
- Об'ємно-планувальні особливості (архітектурні обмеження, просторові вимоги);

- Матеріальні параметри (вибір матеріалів, їх сумісність та довговічність);
- Технологічні аспекти (застосування сучасних технологій, методів монтажу);
- Експлуатаційні показники (надійність упродовж експлуатаційного періоду);
- Безпекові вимоги (стійкість до аварійних ситуацій, пожежна безпека);
- Економічні параметри (вартість робіт, матеріалів, інструментів);
- Трудомісткість (обсяги та складність робіт);
- Тривалість виконання робіт.

Зазначені чинники мають безпосередній вплив на якість і загальну вартість підсилення конструкцій каркасів, тому їх урахування є необхідною умовою обґрунтування оптимальних рішень. Систематизація цих характеристик дає змогу проводити комплексну оцінку технічних, економічних, логістичних та екологічних аспектів, що є ключовими для оптимізації вибору методу підсилення.

Вартість оплати праці робітників, задіяних у підсиленні конструкцій, у розрахунках прийнята на рівні 250 грн/год (станом на березень 2026 року, м. Київ) [271] як умовно-розрахунковий показник для забезпечення порівнянності альтернативних моделей $M_{\text{КТ}}$. Значення враховує підвищену складність і специфіку реконструкційних робіт порівняно з типовими будівельно-монтажними процесами та використовується виключно для аналітичних цілей (не є кошторисною або договірною величиною).

У сучасних умовах тарифна сітка розрядів у будівництві фактично замінена ринковими механізмами формування оплати праці. З 01.01.2026 мінімальна заробітна плата в Україні становить 8 647 грн/міс (≈ 52 грн/год) [271], гарантований галузевий рівень перевищує 12 000 грн/міс, а за даними збірника «Ціноутворення у будівництві» [273] витрати на оплату праці робітника 3,8 тарифного розряду становлять 118–134 грн/год.

У межах роботи розглянуто низку моделей $M_{\text{КТ}}$, описаних у розділі 5.5, трудомісткість яких визначено в розділі 6.2 та Додатку А; кожна з них має власні переваги, обмеження та сферу застосування. Узагальнені результати детального аналізу моделей $M_{\text{КТ}}$ подано в табл. 6.8, де наведено трудомісткість і вартість

підсилення конструкцій за різними варіантами. Слід враховувати, що розрахункові значення мають орієнтовний характер, оскільки фактичні витрати залежать від ринкових умов, рівня кваліфікації виконавців і постачальників матеріалів; однак вони є адекватною основою для порівняння альтернативних рішень. Наведені в таблиці значення трудомісткості та вартості мають порівняльний характер і призначені для зіставлення альтернативних моделей КТР.

До складу вартості включено витрати на матеріали, оплату праці виконавців, допоміжні матеріали та резерв на непередбачені витрати, прийнятий у відсотковому відношенні від суми прямих витрат. Розрахунки не є кошторисними та не претендують на визначення фактичної вартості робіт.

У результаті досліджень отримано техніко-економічні параметри для кожної моделі підсилення у вигляді натуральних та відносних (у відсотках до базової моделі) значень. Це дозволило сформулювати узагальнену оцінку ефективності кожного способу підсилення за сукупністю критеріїв. У межах даного дослідження ранжування критеріїв виконано без введення вагових коефіцієнтів. Визначення коефіцієнтів важливості критеріїв залежить від пріоритетів ініціації проєкту (розділ 4.6) та належить до задач розроблюваної КТС (розділ 7).

Кожна модель M_{KT} пропонує унікальні підходи до підсилення конструкцій, маючи різні переваги, недоліки та специфічні області застосування. Це дозволяє врахувати різні технічні вимоги і вибрати найбільш підходящий варіант. Для проведення комплексного та всебічного аналізу розглянуто всі доступні моделі M_{KT} . Такий підхід дає можливість вибрати оптимальне рішення з урахуванням конкретних умов та вимог проєкту.

Кожна модель має власні характеристики, що впливають на різні аспекти будівельних робіт, зокрема трудомісткість, вартість, рівень можливості підвищення несучої здатності, тривалість виконання та експлуатаційну надійність. Порівняння цих моделей представлено в таблиці 6.8 і дозволяє визначити найбільш ефективний варіант, зокрема з точки зору витрат, часу,

екологічних або просторових вимог, рівня можливості підвищення несучої здатності, а також довгострокової надійності конструкцій. Моделі M_{KT0} , M_{KT10} не брали участі в цьому дослідженні, але ж в окремих випадках, для цього може виникнути необхідність.

Ефективність кожного з методів пісилення (M_{KT}) розрахована з урахуванням шости чинників, а саме кожному МКТ-методу присвоюється ранг (від 1 до 9) за кожним із шости критеріїв M_{Kti} [Cost, Space, Labor, Carrying Capacity, Time, Sustainability]:

1 – найкращий результат (мінімальна трудомісткість, максимальна надійність, мінімальна ціна та дотримання просторових вимог, найвижчий рівень можливості підвищення несучої здатності, найвижчий рівень сталості).

9 – найгірший результат (найвища ціна, трудомісткість та невідповідність просторовим вимогам, найнижчий рівень можливості підвищення несучої здатності, найнижчий рівень сталості).

Для кожного методу складаються всі шість рангів, і що менше сума, то ефективніше M_{KT} . Суми рангів для кожного M_{KT} , представлені в таблиці 6.9 та у вигляді матриці:

M_{KT1} : [9, 3, 5, 8, 3, 7];

$M_{KT2.1}$: [5, 4, 1, 2, 4, 1];

$M_{KT2.2}$: [7, 7, 6, 3, 7, 8];

M_{KT4} : [4, 9, 2, 4, 9, 2];

M_{KT5} : [6, 5, 7, 9, 5, 9];

M_{KT7} : [1, 1, 9, 1, 1, 3];

$M_{KT9.1}$: [2, 2, 8, 5, 2, 4];

$M_{KT9.6}$: [8, 8, 3, 6, 8, 5];

M_{KT11} : [3, 6, 4, 7, 6, 6].

Таблиця 6.8

Аналіз трудомісткості та вартості підсилення конструкцій за різними моделями МКТ

МКТ	Підготов- вальні роботи (люд-год)	Ремонтні роботи (люд- год)	Виготовлен- ня елементів підсилення (люд-год)	Встановлен- ня елементів підсилення (люд-год)	Завершальні роботи (люд-год)	Загальна трудоміст- кість (люд- год)	Вартість сталі або композиту (грн)	Оціночна вартість роботи (грн)	Додаткові матеріали (грн)	Непередба- чені витрати (~10%) (грн)	Загальна вартість (грн)
МКТ1	5,82	14,68	17,7	55,8	8,2	102,68	122 300	25 670	10 000	12 000	169 970
МКТ2.1	5,82	14,68	14	32	8,68	75,18	66 000	18 795	8 000	9 000	101 795
МКТ2.2	5,82	14,68	18,2	58,4	7,3	104,4	66 000	26 550	9 000	10 000	111 550
МКТ4	5,82	14,68	8,5	56,7	8,9	92,9	31 750	23 225	10 500	11 500	76 975
МКТ5	5,82	14,68	29,2	24	11,7	85,4	66 000	21 350	10 000	9 000	106 350
МКТ7	5,82	14,68	12,5	38,2	6,1	77,3	6000	19 325	8000	3500	36 825
МКТ9.1	5,82	14,68	12,91	7,64	6,8	47,85	17 650	11 963	8 000	5 000	42 613
МКТ9.6	5,82	14,68	19,2	58,4	9,1	107,2	58 750	26 800	10 500	12 000	108 050
МКТ11	5,82	14,68	18,4	58,3	9,2	106,4	18 350	26 600	8 000	5 300	58 250

МКТ1 (Збільшення перерізу елементів шляхом приварювання додаткових металевих елементів)

МКТ2.1 (Встановлення додаткових опорних елементів. Без обмеження корисного простору під конструкцією)

МКТ2.2 (Додавання проміжної опори для зміни конструктивної схеми. 3 частковим обмеженням корисного простору)

МКТ4 (Підведення нових конструкцій та введення додаткових елементів)

МКТ5 (Зміна конструктивної схеми конструкції, підведення розвантажувальних порталних рам)

МКТ7 (Використання композитних FRP-матеріалів для підсилення балки)

МКТ9.1 (Використання поперечно напружених тяжів для підсилення балки)

МКТ9.6 (Попереднє напруження конструкцій, попередній вигин)

МКТ11 (Зменшення робочого прольоту конструкції шляхом установлення розвантажувальних виносних опор)

Таблиця 6.9

Суми рангів для кожної моделі

МКТ	Вартість (RE_3)	Простір (RC_{10})	Трудомісткість (RC_4)	Тривалість експлуатації (N_{52})	Несуча здатність (N_{43})	Сталість (A)	Сума
МКТ1	9	3	6	8	5	7	38
МКТ2.1	5	4	3	2	1	1	16
МКТ2.2	7	7	7	3	6	8	38
МКТ4	4	9	5	4	2	2	26
МКТ5	6	5	4	9	7	9	40
МКТ7	1	1	2	1	9	3	17
МКТ9.1	2	2	1	5	8	4	16
МКТ9.6	8	8	9	6	3	5	39
МКТ11	3	6	8	7	4	6	34

Результати порівняльної оцінки конструктивних моделей підсилення за сукупністю шести факторів свідчать, що моделі МКТ2.1 (рис. 6.11) та МКТ9.1 характеризуються найменшими сумарними рангами ($\Sigma = 16$), що дозволяє віднести їх до найбільш ефективних з погляду комплексної якості підсилення.

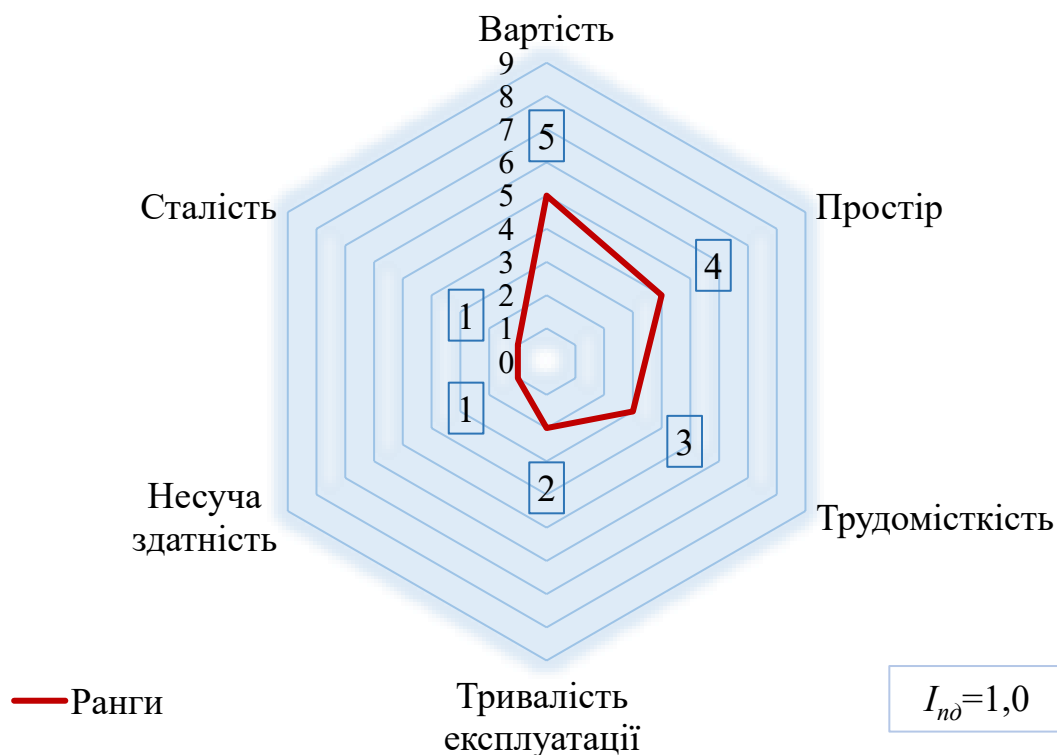


Рис. 6.11 Радарна діаграма комплексної оцінки моделі $M_{КТ2.1}$ за шістьма чинниками якості

M_{KT7} також показує хороший результат ($\Sigma = 17$). M_{KT4} та M_{KT11} мають помірну ефективність ($\Sigma = 26$ і 34 відповідно). $M_{KT9,6}$ є найменш ефективним ($\Sigma = 39$) через високу трудомісткість, вартість та просторові обмеження.

Далі розраховано процент ефективності для кожного методу та проставлені порядкові номери від 1 до 9. Для цього ефективність розрахована, як обернена величина до суми рангів (чим менша сума, тим вища ефективність).

Індекс порівняльної доцільності, що відображає відносне положення моделі M_{KT} у ранговому ряду альтернатив, пропонується визначати за формулою:

$$I_{\text{пд}} = \frac{\Sigma r_{\text{min}}}{\Sigma r_i} \quad (6.20)$$

де

$I_{\text{пд}}$ – індекс порівняльної доцільності ($0 \leq I_{\text{пд}} \leq 1$);

Σr_i – сума рангів i -тої моделі M_{KT} ;

Σr_{min} – мінімальна сума рангів серед усіх розглянутих моделей.

Запропонований індекс має умовний порівняльний характер і використовується виключно для ранжування альтернативних моделей M_{KT} .

Мінімальне значення суми рангів становить 16 (моделі $M_{KT2,1}$ та $M_{KT9,1}$), що відповідає максимальному значенню індексу порівняльної доцільності $I_{\text{пд}} = 1,00$. Для інших моделей значення індексу зменшується пропорційно зростанню сумарної рангової оцінки.

Кожна з розглянутих моделей характеризується певними перевагами та обмеженнями, що визначають сферу та доцільність її застосування, а саме:

M_{KT1} – базова модель зі стандартними затратами. Підходить для мінімального втручання, проте її ефективність обмежена.

M_{KT2} – забезпечує вищу ефективність підсилення за рахунок складніших технологій, але є дорожчою та тривалішою.

M_{KT4} – надійна модель для підсилення, але вона не дешева і потребує більше часу для виконання. Не завжди відповідає просторовим вимогам.

M_{KT5} – модель зі зміною конструктивної схеми, забезпечує відмінну надійність, але складна в реалізації.

M_{KT7} – оптимальна за екологічністю та просторовими вимогами завдяки використанню композитних матеріалів. Підходить для складних обмежених умов.

M_{KT9} : метод підсилення з попередньою напругою, що забезпечує високу ефективність і довговічність.

Якщо узагальнити якісні характеристики всіх моделей КТР, сформованих у розділі 5.4, можна виділити такі їх особливості:

M_{KT0} : Відображає базовий підхід без значних змін конструкції. Економічний, але найменш ефективний.

$M_{KT1} - M_{KT6}$: Удосконалення геометрії, збільшення просторової жорсткості, додаткові ребра, перетини або нові елементи забезпечують значне покращення, але супроводжуються зростанням трудомісткості та вартості.

M_{KT3} : Економічно вигідна модель, яка зменшує трудомісткість і тривалість робіт. Водночас ефективність підсилення буде значною при наявності відповідних з'єднань.

M_{KT7} : Підходить для складних ситуацій із обмеженим простором.

M_{KT8} : Максимальна ефективність, але найдорожча й найтриваліша.

M_{KT9} : Дає високу ефективність для спеціальних умов.

M_{KT10} : Поточний ремонт. Застосовується для усунення локальних дефектів.

M_{KT11} : Є збалансованим варіантом, якщо допустимі вищі трудові витрати, і може бути ефективним для реконструкцій, де потрібно покращити несучу здатність без кардинальних змін у конструкції.

M_{KT12} : Забезпечує комплексне відновлення працездатності шляхом поєднання декількох заходів підсилення, але характеризується підвищеною технологічною складністю та ресурсомісткістю.

Пріоритетність для кожного аспекту аналізу визначається залежно від нормативних вимог (Y_x), побажань замовника (Z_x), а також їх впливу на критерії сталості (A_m) та критерій підходу (T_x). Трудомісткість та тривалість робіт мають

високий пріоритет, оскільки безпосередньо впливають на бюджет і строк виконання проєкту. Надійність є ключовою для довгострокових проєктів і підсилення несучих конструкцій, де важливий тривалий строк експлуатації. Для оцінки застосування моделей МКТ був виконаний кількісний та якісний аналіз. Підсумкові значення сум рангів наведено в узагальненій таблиці 6.10. Найнижчі суми (16) отримали моделі $M_{KT2.1}$ та $M_{KT9.1}$, дещо вищою (17) виявилася сума для M_{KT7} . Це свідчить про їх найкращий баланс між вартістю, трудомісткістю, надійністю, несучою здатністю, просторовими вимогами та сталістю.

Для підвищення наочності порівняння значення індексу порівняльної доцільності, визначеного як безрозмірна нормована величина в інтервалі 0–1, на рисунку 6.12 подано у відсотках відносно максимального значення, прийнятого за 100 %. Таке подання не змінює змісту показника і використовується виключно з ілюстративною метою.

Натомість моделі M_{KT5} , $M_{KT9.6}$, M_{KT1} , $M_{KT2.2}$ мають значно вищі суми рангів (39–40), що вказує на нижчий індекс порівняльної доцільності за прийнятою системою критеріїв.

Узагальнена таблиця ефективності дозволяє виділити такі узагальнені закономірності:

- *Трудомісткість.* Найнижчі витрати робочого часу спостерігаються для $M_{KT9.1}$ (47,85 люд.-год), далі йдуть $M_{KT2.1}$ (75,18) та M_{KT7} (77,3). Найбільш трудомісткими є $M_{KT9.6}$ (107,2) та M_{KT11} (106,4).
- *Загальна вартість.* Економічно найбільш вигідними за критерієм порівняльної вартості є M_{KT7} (36 825 грн, умовно 100 %) та $M_{KT9.1}$ (42 613 грн, 116 %). Найбільш затратною є базова модель M_{KT1} (169 970 грн, 462 %).
- *Очікуване підвищення несучої здатності.* максимальні значення очікуваного приросту несучої здатності (до 85 %) характерні для $M_{KT2.1}$, M_{KT4} , $M_{KT9.6}$ та M_{KT11} . M_{KT1} , $M_{KT2.2}$ і M_{KT5} дають приріст 80 %, тоді як M_{KT7} та $M_{KT9.1}$ – 18 % і 35 % відповідно.

Таблиця 6.10

Порівняння ефективності моделей КТР для підсилення балки з урахуванням критеріїв, що охоплюють технічні, економічні та експлуатаційні аспекти

Аспекти / Критерії	М _{кт1}	М _{кт2.1}	М _{кт2.2}	М _{кт4}	М _{кт5}	М _{кт7}	М _{кт9.1}	М _{кт9.6}	М _{кт11}
Трудомісткість (RC ₄), люд./год	102,68	75,18	104,4	92,9	85,4	77,3	47,85	107,2	106,4
Загальні капітальні витрати (RE ₃), грн	169 970 (462%)	101 795 (277%)	111 550 (303%)	76 975 (209%)	106 350 (289%)	36 825 (100%)	42 613 (116%)	108 050 (294%)	58 250 (158%)
Очікуване підвищення несучої здатності (N ₄₃), %	80%	85%	80%	85%	80%	18%	35%	85%	85%
Тривалість ефективної експлуатації (N ₅₂), років	20 ¹	25 ²	25 ¹	25²	20 ²	30 ⁶	25 ³	25 ⁵	25 ⁴
Просторова адаптивність (RC ₁₀)	Відповідає	Відповідає	Обмежує простір	Не відповідає	Відповідає	Високий рівень	Високий рівень	Відповідає	Відповідає
Рівень сталості A	Помірний	Високий	Помірний	Високий	Помірний	Високий	Високий	Високий	Високий
Індекс порівняльної доцільності, I _{нд}	0,58	1,00	0,58	0,68	0,53	0,95	1,00	0,59	0,79

¹ за умови контролю корозії та якості швів; ³ за умови періодичного контролю за умови контролю корозії та натягу зтяжок

² за умови правильного монтажу та контролю зварних швів; ⁴ за умови регулярного обслуговування та контролю стану металевих елементів ⁵ за умови контролю корозії та натягу зтяжок ⁶ за умови дотримання технології нанесення та відсутності пошкоджень

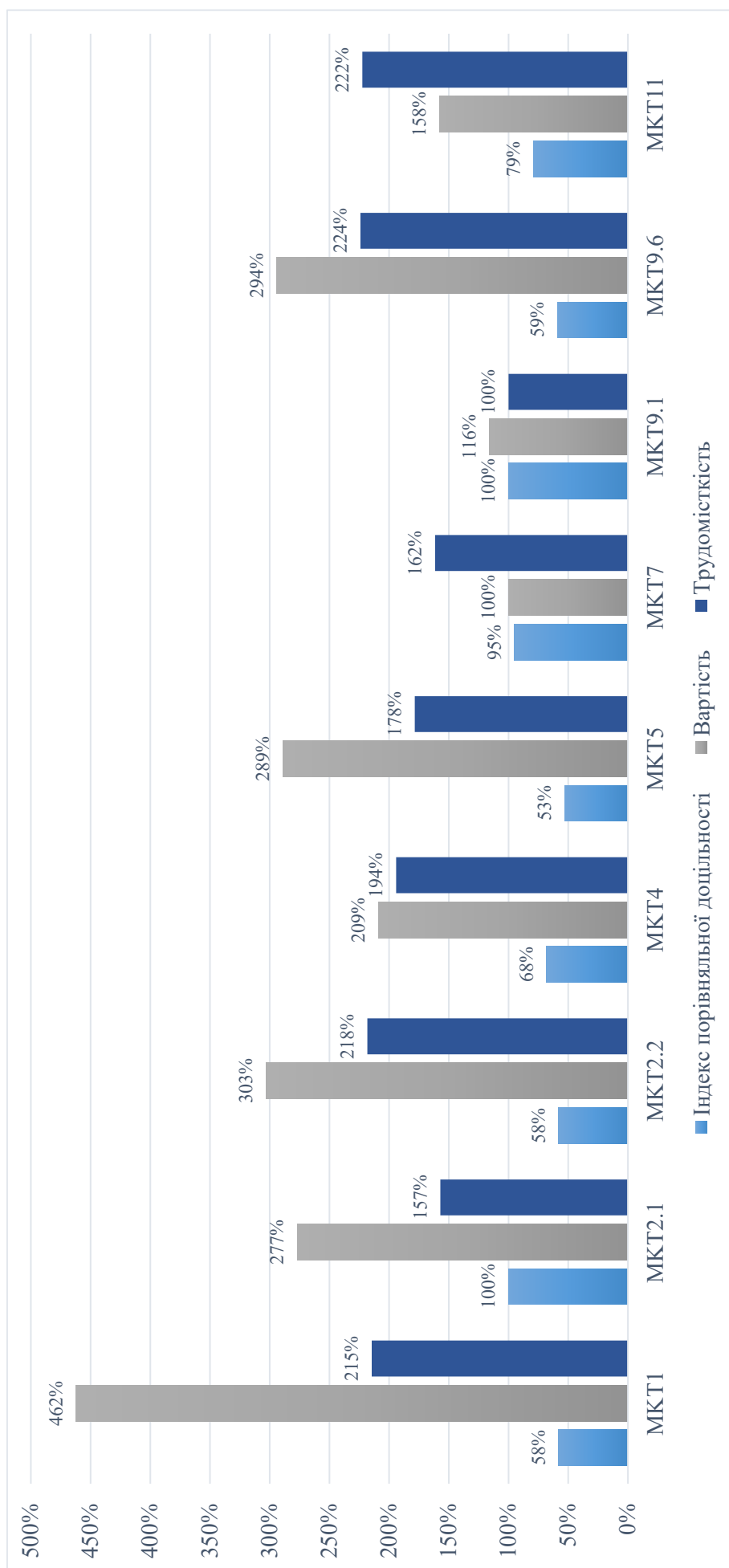


Рис. 6.12. Порівняння відносної вартості, трудомісткості та індексу порівняльної доцільності моделей конструктивно-технологічних рішень підсилення будівельних конструкцій

- *Надійність.* Більшість методів гарантує орієнтовний строк експлуатації 25 років; М_{КТ1} і М_{КТ5} мають дещо нижчий показник (20 років), а М_{КТ7} характеризується підвищеною надійністю (характеризується орієнтовним строком до 50 років за умови дотримання технології нанесення композитів та подальшого експлуатаційного контролю).
- *Просторові вимоги.* М_{КТ1}, М_{КТ2.1}, М_{КТ5} та М_{КТ11} відповідають просторовим обмеженням. М_{КТ2.2} обмежує корисний простір, М_{КТ4} та М_{КТ9.6} у ряді випадків не відповідають просторовим вимогам. Методи М_{КТ7} та М_{КТ9.1} потребують підвищені просторові обмеження на етапі монтажу, що може бути критичним у стислих умовах.
- *Рівень сталості.* Високий рівень сталості притаманний М_{КТ2.1}, М_{КТ4}, М_{КТ7}, М_{КТ9.1}, М_{КТ9.6} та М_{КТ11} (забезпечують тривалий строк служби, меншу матеріаломісткість, можливість ефективного технічного обслуговування); М_{КТ1}, М_{КТ2.2} і М_{КТ5} мають помірні показники (більші витрати матеріалів, менш сприятливі показники довговічності та експлуатації).
- *Індекс порівняльної доцільності.* найвище значення індексу порівняльної доцільності (1 – у межах прийнятої системи нормування та ранжування) демонструють М_{КТ2.1} та М_{КТ9.1}, дещо нижчу – М_{КТ7} (0,95) та М_{КТ11} (0,79). Індекс порівняльної доцільності М_{КТ1} і М_{КТ2.2} становить 0,58, а М_{КТ5} – 0,53.

Рекомендації щодо вибору рішення

- М_{КТ2.1} – найбільш збалансоване рішення, що поєднує невисоку трудомісткість (75,18 люд.-год), помірну вартість (101 795 грн), високий приріст несучої здатності (85 %), відповідність просторовим вимогам, високий рівень сталості та $I_{\text{пд}} = 1$. Розглядається як доцільний базовий варіант для більшості випадків реконструкції, а також для випадків, коли потрібно досягти значного підвищення несучої здатності при збереженні просторових вимог.

- M_{KT11} – доцільний у випадках, коли допустимі підвищені трудові витрати (106,4 люд.-год), але потрібна значна зміна несучої здатності (85 %) за помірної вартості (58 250 грн) і відповідності просторовим вимогам. Індекс порівняльної доцільності – 79% при високому рівні сталості.
- M_{KT7} та $M_{KT9.1}$ – економічно вигідні (особливо M_{KT7}) та мають високий $I_{пд}$ ($M_{KT9.1}$ – 100%, M_{KT7} – 95%), але забезпечують відносно невелике збільшення несучої здатності та потребують сприятливих просторових умов. Доцільні для застосування у випадках, коли пріоритетом є зниження вартості й трудомісткості, а вимоги до приросту несучої здатності є помірними.
- M_{KT1} та $M_{KT2.2}$ – характеризуються високою вартістю і трудомісткістю при середньому рівні ефективності й тому можуть розглядатися як альтернативні або допоміжні рішення за специфічних умов.
- M_{KT4} та $M_{KT9.6}$ – демонструють високий приріст несучої здатності, однак недотримання просторових вимог і, для $M_{KT9.6}$, висока трудомісткість та вартість значно знижують їх конкурентоспроможність.
- M_{KT5} – забезпечує добрий конструктивний ефект завдяки зміні розрахункової схеми, але має низький $I_{пд}$ через підвищену трудомісткість, вартість і знижену надійність.

При виборі методу посилення балки необхідно враховувати *пріоритети конкретного проекту*:

- Підвищення несучої здатності при збереженні просторових вимог і високої сталості. Оптимальним вибором є $M_{KT2.1}$, а також M_{KT11} , який демонструє збалансовані показники за умови допустимості вищих трудових витрат.
- Економія витрат і трудомісткості. Якщо критично важливо знизити витрати і трудомісткість, доцільно застосовувати M_{KT7} та $M_{KT9.1}$. Проте їх використання виправдане лише за умови, коли допускається нижчий приріст несучої здатності.

- Великі реконструкції. У проєктах зі спеціальними вимогами до несучої здатності та довговічності доцільними можуть бути M_{KT5} (зміна конструктивної схеми) та M_{KT9} (попередня напруга), незважаючи на їх нижчі інтегральні показники.
- Локальні ремонти та економія ресурсів. При виконанні локальних ремонтних робіт або для економії ресурсів варто використовувати M_{KT3} (підсилення з'єднань) або M_{KT10} (поточний ремонт). M_{KT3} може бути раціональним вибором завдяки мінімальним затратам при середньому рівні підсилення, якщо потрібно зекономити час і кошти.
- Специфічні умови просторових вимог і надійності. M_{KT4} рекомендовано застосовувати, якщо просторові вимоги не є критичними, а основною задачею є підвищення надійності конструкції.
- Отримані результати є коректними в межах прийнятих припущень, обмежень дослідження та розглянутого переліку моделей M_{KT} і можуть бути використані як інструмент порівняльного обґрунтування вибору КТР на етапі техніко-економічного аналізу.

6.4. Синергія сучасних технологій, як інструмент підвищення ефективності організаційно-технологічного забезпечення реконструкції

Підвищення ефективності організаційно-технологічного забезпечення реконструкції будівель зумовлює необхідність інтеграції цифрових, автоматизованих та ресурсоефективних технологій, що формують єдиний інженерний контур управління життєвим циклом об'єкта. У сучасних умовах найбільший вплив на трансформацію традиційних підходів здійснюють інформаційне моделювання будівель (BIM), принципи ощадливого виробництва (Lean Construction) та інтелектуальні роботи і обладнання (IOR) [249, 274]. Їх поєднання формує синергетичний ефект, що проявляється у зниженні варіативності процесів, підвищенні передбачуваності результатів, скороченні

вtrat ресурсів і часу, а також у підвищенні надійності складних технологічних операцій із підсилення та реконструкції каркасних систем.

Цифрова взаємодія окремих моделей у BIM-середовищі забезпечує інтеграцію архітектурних, конструктивних, технологічних і експлуатаційних характеристик. Це дає змогу не лише формувати цифровий аналог об'єкта, але й здійснювати віртуальну апробацію різних варіантів організаційно-технологічних рішень, що підвищує обґрунтованість проектних рішень на ранніх етапах. У свою чергу Lean-технології забезпечують системну мінімізацію втрат, а роботизовані процеси — підвищення точності та повторюваності операцій, що є критично важливим при реконструкції конструкцій, які перебувають в експлуатації.

6.4.1. BIM як фактор підвищення ефективності реконструкції

Забезпечення якості та ефективності реконструкції каркасних будівель вимагає переходу від фрагментарного проектування до інтегрованого управління інформацією та рішеннями протягом усього життєвого циклу об'єкта. У цьому контексті технологія інформаційного моделювання будівель (BIM) розглядається не як окремий програмний інструмент, а як інформаційно-аналітична основа підтримки прийняття конструктивно-технологічних і організаційно-технологічних рішень.

На відміну від традиційних підходів, BIM забезпечує формування єдиного цифрового середовища, у межах якого поєднуються геометричні, технологічні, часові, вартісні та експлуатаційні параметри об'єкта. Це створює передумови для системного аналізу альтернативних моделей підсилення каркасів будівель, їх порівняння за критеріями ефективності, експлуатаційної надійності та сталості, а також для зниження ризиків помилкових рішень на ранніх стадіях реконструкції.

У межах даного дослідження BIM розглядається як інформаційна складова КТС, яка забезпечує:

- актуалізацію вхідних параметрів процесу реконструкції;
- підтримку багатокритеріального вибору моделей M_{KTi} та M_{OTi} ;
- інтеграцію з принципами Lean-технологій з метою оптимізації потоків робіт, ресурсів і часу.

У контексті КТС BIM безпосередньо впливає на ключові критерії оцінки альтернатив M_{KT} :

- критерій ефективності (R_i) — за рахунок скорочення переробок, оптимізації календарного планування (4D) та витрат (5D);
- критерій експлуатаційної надійності (N_i) — шляхом зниження імовірності проєктних і технологічних помилок, виявлення колізій та контролю відповідності прийнятих рішень фактичному стану конструкцій;
- критерій сталості реконструкції (A_i) — через зменшення матеріальних втрат, оптимізацію використання ресурсів та зниження екологічного навантаження протягом життєвого циклу підсилення.

На відміну від нового будівництва, застосування BIM у реконструкції каркасних будівель орієнтоване на роботу з невизначеністю та варіативністю фактичного стану конструкцій. Цифрова модель у цьому випадку виконує роль інтегратора даних обстежень, інструментальних вимірювань і результатів числового аналізу, що створює основу для сценарного порівняння альтернативних рішень підсилення [275].

Синергія BIM із принципами Lean-технологій розглядається як механізм переходу від статичного планування до керування потоками робіт, ресурсів і інформації. BIM-модель у складі КТС виступає цифровим відображенням потоку створення цінності, що узгоджується з концепцією «витягування» та мінімізації втрат і формує передумови для зменшення трудомісткості та тривалості реконструкційних процесів.

Як практичну реалізацію запропонованого підходу в роботі використано алгоритм моніторингу стану каркасу будівлі з інтеграцією BIM-моделі, який забезпечує безперервний зворотний зв'язок між фактичним станом конструкцій

та процесом прийняття рішень щодо реконструкції. Такий алгоритм дозволяє своєчасно ідентифікувати критичні зони, коригувати параметри КТР та підвищувати обґрунтованість управлінських рішень.

Подальший розвиток BIM-орієнтованої КТС пов'язується з концепцією цифрового двійника (Digital Twin), що забезпечує замкнений цикл «обстеження — аналіз — вибір рішення — реалізація — моніторинг». Це формує методологічну основу реалізації принципів сталого розвитку та підвищення адаптивності системи підсилення каркасних будівель у довгостроковій перспективі (рис. 6.16), забезпечуючи досягнення цілей сталого розвитку (SDGs) через підвищення надійності, енергоефективності, ресурсної ефективності та екологічної безпеки. Для реалізації інформаційно-аналітичної підсистеми КТС достатнім є застосування BIM не нижче рівня 2, що забезпечує обмін даними між учасниками процесу реконструкції та підтримку багатовимірного моделювання» [276, 277].

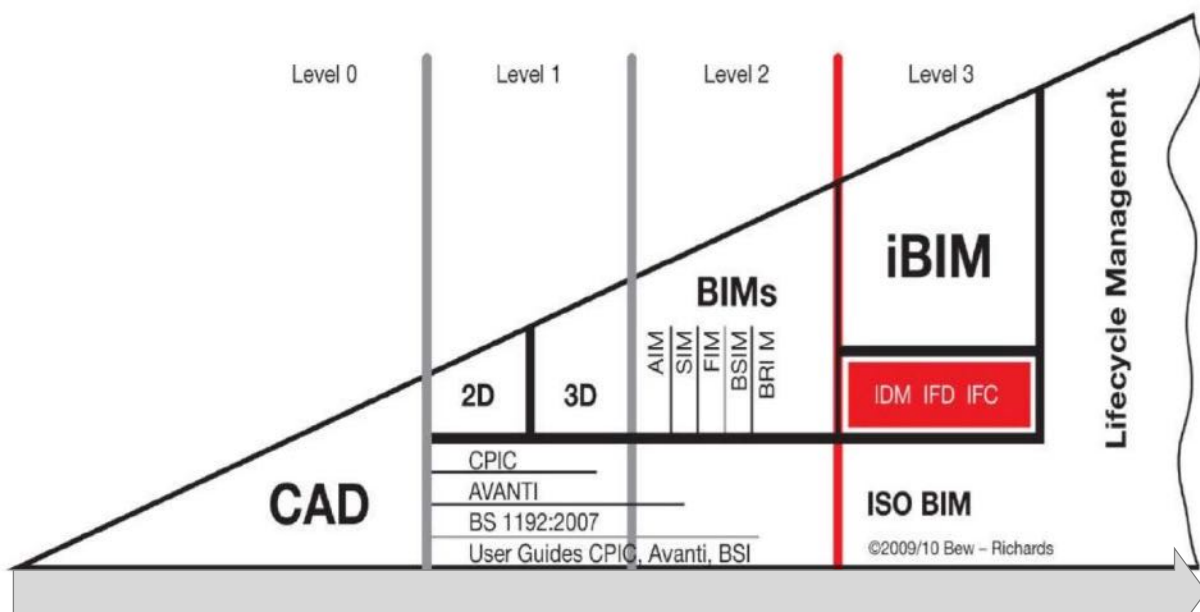


Рис. 6.13. Рівні зрілості BIM як основа інформаційного забезпечення процесів реконструкції [277]

Рисунок 6.13 ілюструє еволюцію підходів до інформаційного моделювання будівель — від ізольованого 2D-проектування до інтегрованого цифрового середовища спільної роботи. Для задач реконструкції та підсилення каркасних

будівель методологічно достатнім є застосування ВІМ не нижче рівня 2, що забезпечує координацію рішень, обмін даними та формування єдиного інформаційного простору проекту.

Рисунок 6.14 відображає розширення інформаційної моделі будівлі за рахунок часових (4D), вартісних (5D) та експлуатаційно-життєвих (6D) параметрів, що створює передумови для комплексної оцінки конструктивно-технологічних і організаційно-технологічних рішень за критеріями ефективності, експлуатаційної надійності та сталості.

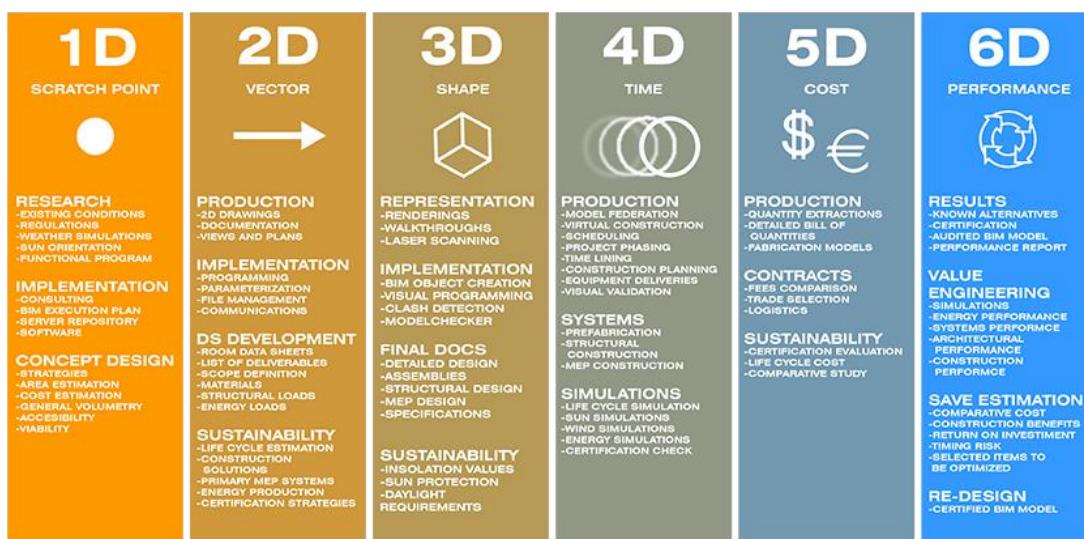


Рис. 6.14. Багатовимірна структура ВІМ як інструмент підвищення ефективності, надійності та сталості реконструкції [277]

Подальший розвиток ВІМ-орієнтованої КТС у методологічному вимірі пов'язується з концепцією цифрового двійника (Digital Twin) та елементів Construction 4.0 [175], що передбачає використання роботизованих систем, автоматизованого монтажу та інтелектуальних засобів підтримки виконання робіт. Такі підходи створюють передумови для реалізації принципів сталого розвитку, підвищення безпеки праці та зниження ресурсомісткості процесів реконструкції каркасних будівель (рис. 6.15–6.16) [124].

У межах запропонованої наукової концепції багатовимірна структура ВІМ інтерпретується з позицій забезпечення якості підсилення каркасних будівель.

Так, 4D-модельовання використовується для аналізу часових параметрів та оптимізації потоків робіт відповідно до принципів Lean-технологій; 5D-модельовання забезпечує оцінку капітальних та експлуатаційних витрат (CAPEX/OPEX) і використовується при виборі економічно доцільних моделей M_{KTi} та M_{OTi} ; 6D-модельовання дозволяє враховувати параметри життєвого циклу та критерії сталості реконструкції.

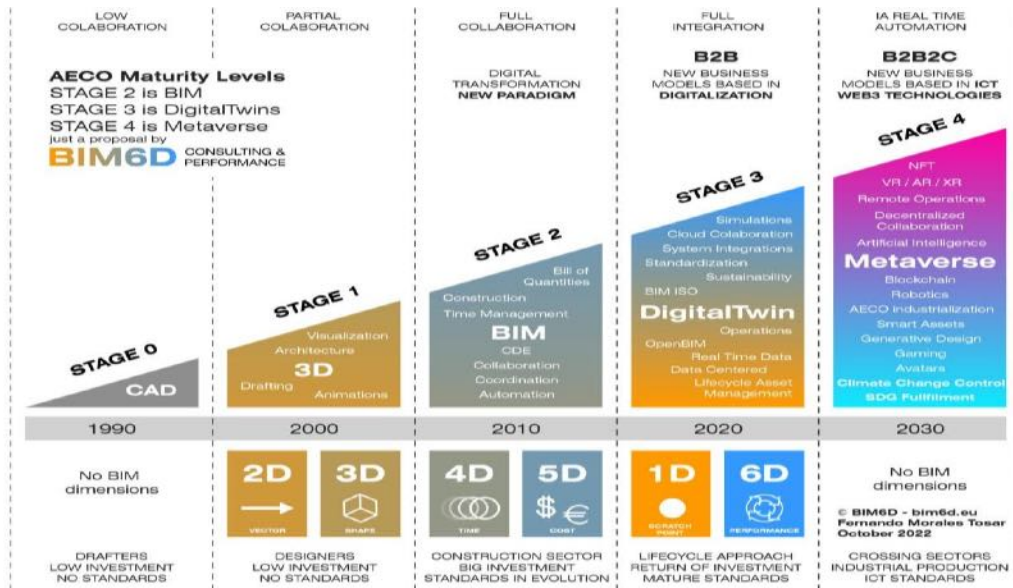


Рис. 6.15. Більше, ніж ВІМ для сектору АІБЕ (Архітектура, Інженерія, Будівництво, Експлуатація) [277]



Рис. 6.16. Цілі сталого розвитку в будівництві [295]

Така інтерпретація BIM забезпечує його безпосередню інтеграцію в інформаційно-аналітичну підсистему КТС як формалізований фактор підвищення ефективності, експлуатаційної надійності та сталості процесів підсилення каркасних будівель.

6.4.2. Lean-технології для оптимізації процесів і підвищення продуктивності під час реконструкції

Останнім часом у наукових дослідженнях активно розглядається застосування принципів ощадливого виробництва (Lean), зокрема в будівельній галузі. Відповідно до підходу П. Акерса, Lean розглядається як спосіб мислення, орієнтований на системне усунення втрат та безперервне вдосконалення процесів. У даному дослідженні класифікація втрат Lean (рис. 6.17), притаманних більшості виробничих і управлінських процесів, використовується як базис для ідентифікації факторів неефективності при формуванні конструктивно-технологічних схем підсилення каркасних будівель.

Впровадження Lean-інструментів у будівництві розглядається як ефективний засіб оптимізації витрат і системного зменшення втрат у процесах реконструкції. Ключовим інструментом ощадливого управління є система Last Planner®, що забезпечує колективне планування робіт і підвищення передбачуваності виконання процесів. Її складовою є підхід Pull Planning, який передбачає зворотне планування від контрольних етапів і сприяє раціональному розподілу ресурсів з урахуванням фактичної готовності попередніх операцій. У даному дослідженні принципи Last Planner® і Pull Planning застосовуються як інструменти узгодження КТР у КТС, зокрема при координації монтажних, вантажопідіймальних і підсилювальних операцій.

Lean-технології спрямовані на зменшення втрат і підвищення продуктивності шляхом раціонального використання трудових, матеріальних та енергетичних ресурсів. Їх застосування забезпечує усунення зайвих витрат на

всіх рівнях організації виробничого процесу, а також зниження ризиків, пов'язаних із неузгодженістю робіт, надлишковими запасами матеріалів і повторним виконанням операцій, що відповідає групам ризиків F₃–F₄.

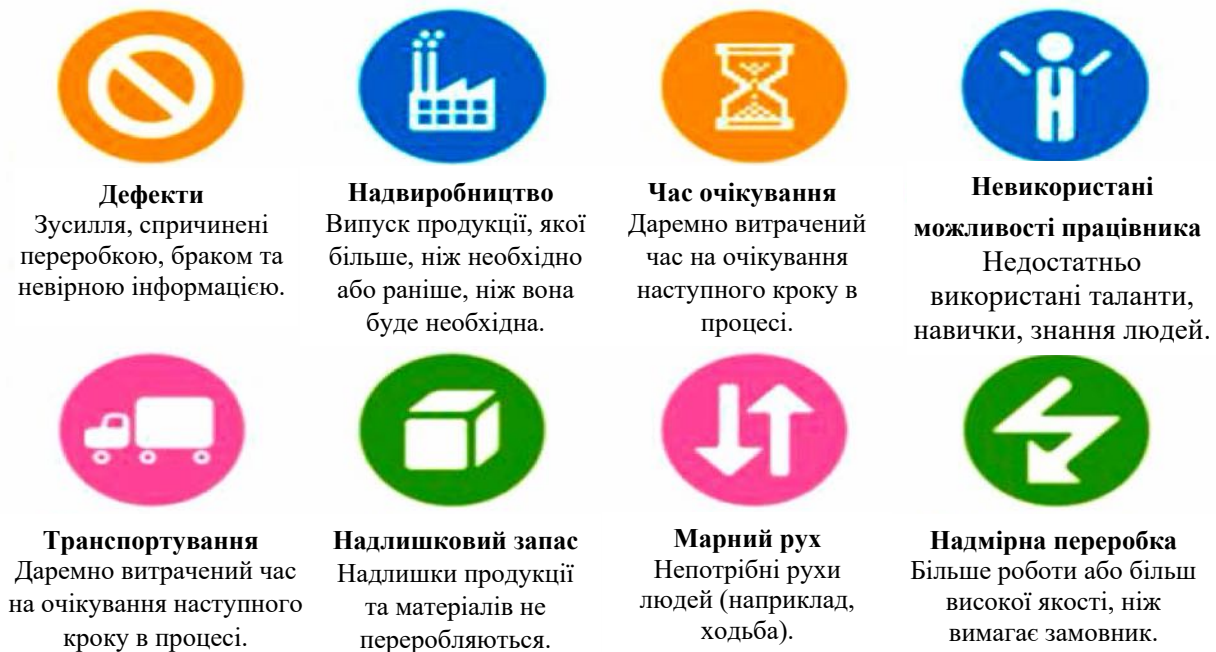


Рис.6.17. Вісім відходів (втрат) за визначенням Paul Akers (розроблено та узагальнено автором на основі джерел [278, с. 2], [279, с. 25])

Для реконструкції каркасних будівель ключового значення набувають скорочення тривалості робіт і підвищення ефективності використання робочого часу, що безпосередньо впливає на економічну результативність і конкурентоспроможність виконавців. Lean-підхід забезпечує інтеграцію процесів проектування, будівництва та управління на всіх етапах життєвого циклу, формуючи передумови для створення адаптивних і стійких конструктивно-технологічних схем. Актуальність трансформації традиційних організаційно-технологічних підходів у будівництві зумовлена необхідністю підвищення ефективності, безпеки та якості виконання робіт. Водночас у реконструкції каркасних будівель в Україні впровадження Lean потребує

адаптації з урахуванням технічної невизначеності існуючих конструкцій і підвищеного рівня виробничих ризиків.

У роботі Lean розглядається як структурний елемент КТС, що забезпечує оптимізацію потоків робіт, матеріалів та інформації, сприяє скороченню трудомісткості, підвищенню ефективності та стабілізації якості підсилення.

У ході дослідження встановлено, що ефективне впровадження принципів ощадливого будівництва потребує ідентифікації критичних точок у процесах реконструкції, пов'язаних із безпекою, якістю та організацією робіт. Ключовим завданням є виявлення та мінімізація втрат на різних етапах реалізації проєкту з їх подальшим зіставленням з групами ризиків F_1 – F_7 , що забезпечує обґрунтований вибір конструктивно-технологічних рішень.

Результати досліджень [280] свідчать про наявність значної кількості втрат, які суттєво впливають на загальну ефективність будівельного процесу, зокрема в умовах реконструкції. Серед них:

- неповні або неточні вихідні дані та технічні завдання, що зумовлюють прийняття недостатньо обґрунтованих проєктних рішень;
- відсутність системного аналізу та порівняльного обґрунтування альтернатив, що призводить до вибору неефективних рішень на стадії проєктування;
- залучення виробників матеріалів і технологій на пізніх етапах проєктування, що спричиняє неузгодженість рішень та зростання витрат;
- недостатня взаємодія між замовниками, проєктувальниками, підрядниками та постачальниками, яка ускладнює обмін інформацією та синхронізацію дій;
- виникнення дефектів і необхідність переробок унаслідок проєктних помилок або порушень технології виконання робіт;
- неузгоджені дії учасників інвестиційно-будівельного процесу, що призводять до затримок та подорожчання проєкту;

- невідповідність матеріалів проєктним рішенням або використання застарілих даних попередніх проєктів, що знижує ефективність використання ресурсів.

Наведені приклади втрат безпосередньо корелюють із факторами ризику F_1 – F_5 , що підтверджує доцільність використання Lean-класифікації як інструменту її систематизації.

За різними оцінками, сумарні втрати у будівельних проєктах можуть становити до 80% загальних витрат, що зумовлено проєктними помилками, нераціональним використанням матеріалів, невідповідністю нормативним вимогам та іншими організаційно-технологічними чинниками. Такі втрати призводять до зростання вартості реконструкції та порушення запланованих строків виконання робіт. У таблиці 6.11 наведено узагальнений аналіз типових причин надлишкових витрат інвестора (девелопера) та відповідні напрями оптимізації процесів реконструкції із застосуванням Lean-технологій. Запропонована систематизація використовується у дослідженні як аналітична основа для вибору конструктивно-технологічних рішень.

Таблиця 6.11

Оптимізація процесів реконструкції за допомогою Lean-технологій

Тип втрат	Причини	Методи оптимізації
Часові втрати	Затягування робіт, нерівномірний потік інвестицій	Визначення нормативного часу на кожну операцію, чітке планування графіків
Інформаційні втрати	Втрата важливої інформації, недооцінка ризиків	Впровадження BIM, регулярні звіти про хід виконання робіт
Виробничі втрати	Зміни рішень на етапах реалізації	Стандартизація процесів, оптимізація робіт з усіма стейкхолдерами
Вартісні втрати	Недооцінка витрат, спроби зекономити на проєктуванні	Точне розрахування обсягів робіт, аналіз вартості життєвого циклу об'єкта

Зазначені типи втрат корелюють із групами ризиків F₁–F₇, виділеними у розділі 4.6, що дозволяє використовувати результати Lean-аналізу як інформаційну основу для формування та коригування конструктивно-технологічних схем реконструкції.

Важливим інструментом оптимізації витрат на етапі підготовки та проведення тендерів у проєктах реконструкції є відомість обчислень (*Bill of Quantities*, BOQ) (рис. 6.18). BOQ містить структурований перелік матеріалів, обладнання, робіт і додаткових витрат, необхідних для реалізації проєкту, та використовується як базовий інструмент формування цінових пропозицій у межах тендерних процедур.

На відміну від традиційних кошторисів, BOQ не містить фактичної вартості робіт, що забезпечує прозорість порівняння пропозицій підрядників і зменшує ризики помилок на початкових етапах реалізації проєкту. В умовах України застосування BOQ наразі обмежується переважно великими або технічно складними проєктами, проте його використання дозволяє більш точно оцінювати обсяги робіт і знижувати невизначеність вартості.

S.N.	Description	Unit	Quantity	Rate per unit		Total Amount
				In Figure	In words	
1	E/w Excavation of soft clay & silty soil including disposal upto 10m lead & 1.5 m lift	cum	414.00	72.29	Seventy two and twenty nine paisa only	29,928.06
3	Structure back filling works 15 cm layer ways compaction two third of quantity	cum	136.17	118.75	One hundred eighteen and seventy Five paisa	16,170.19
5	Boulder soling works with supplying of materials	cum	1.20	1446.12	One thousand four hundred forty six and	1,735.34
6	P.C.C. 1:3:6 work with materials all complete	cum	0.96	10438.95	Ten thousand four hundre	10,021.39
7	P.C.C. 1:2:4 work with materials all complete	cum	12.00	11935.64	Eleven thousand nine hundred thirty five and	143,227.68
8	Supply of form work with shuttering, staging etc. and erecting, fitting, fixing, centering etc all complete including dismantling as per drawing and specification	sq.m	121.00	715.82	Seven hundred fifteen and eight two paisa only	86,614.22
9	Reinforcement steel work for cutoff wall with supplying ,cutting , bending , binding , placing all complete	kg	594.33	91.77	Ninety one and Seventy seven paisa only	54,541.66
					Total = NRs.	342,238.54
					Payle Amount	285,000.00
					Contribution	57,238.54

Рис. 6.18. Приклад відомості обчислень (Bill of Quantities)

Застосування BOQ у проєктах реконструкції дозволяє:

- забезпечити прозорість і структурованість планування витрат;
- зменшити ризики помилок і перевитрат на тендерному етапі;
- підвищити ефективність взаємодії між замовниками та підрядниками.

Зазначений підхід відповідає Lean-принципам, оскільки спрямований на зменшення втрат і невизначеностей на ранніх стадіях життєвого циклу проєкту.

Успішне впровадження концепції ощадливого будівництва пов'язане з ідентифікацією та системним усуненням втрат на всіх етапах реалізації проєкту. У даному дослідженні Lean-технології розглядаються не лише як інструменти підвищення ефективності, а як методологічна основа управління якістю та ризиками реконструкції каркасних будівель.

Інноваційний Lean-підхід у реконструкції ґрунтується на мінімізації втрат шляхом покращення координації між усіма учасниками проєкту — замовниками, проєктувальниками, підрядниками та постачальниками. На основі узагальнення теоретичних і прикладних досліджень у роботі сформульовано основні принципи застосування Lean-технологій у проєктах реконструкції каркасних будівель:

1. Уніфікація та стандартизація технологічних процесів із визначенням нормативного часу виконання операцій.
2. Інформаційне моделювання будівель (BIM) як інструмент координації, прогнозування витрат і строків.
3. Сучасні методи нормування часу, що враховують складність і варіативність робіт.
4. Раціональне використання матеріалів і екологічно орієнтовані технології.
5. Стандартизація та уніфікація конструктивних рішень для зниження вартості реконструкції.
6. Міждисциплінарна взаємодія на всіх етапах життєвого циклу проєкту.
7. Оцінка витрат протягом життєвого циклу будівлі.
8. Робота з персоналом і мотивація як фактор зниження втрат.

9. Технологічна узгодженість між підрозділами компанії.

10. Електронний документообіг як інструмент скорочення часу та управління змінами.

Зазначені принципи Lean-технологій корелюють з ідентифікованими групами ризиків F_1 – F_7 та категоріями втрат, і можуть розглядатися як інструменти їх системного зниження у процесі формування та реалізації конструктивно-технологічних рішень.

Відповідно до логіки Pull-підходу, у разі використання двома видами діяльності спільного ресурсу пріоритет надається операції, розташованій ближче до завершення технологічного процесу. У межах розроблюваної КТС цей принцип застосовано як правило розподілу обмежених ресурсів (підйомних механізмів, спеціалізованого обладнання, робочих бригад), що дозволяє мінімізувати простой та знизити ризики затримок (фактори F_3 , F_5).

Якість підсилення каркасних будівель у процесі реконструкції значною мірою визначається рівнем запобігання будівельним дефектам. Аналіз практики показує, що у традиційних організаційно-технологічних схемах дефекти часто виявляються на пізніх стадіях реалізації, що призводить до значних втрат часу та ресурсів.

У даному дослідженні запропоновано застосування принципів Рока-ґоке як елементу формалізованого алгоритму забезпечення якості підсилення, що дозволяє ідентифікувати та нейтралізувати потенційні помилки ще на етапах проектування та підготовки робіт [254, 270, 274, 278, 279, 287–289]. Такий підхід безпосередньо спрямований на зниження втрат за категоріями «дефекти» та «переробки» і відповідає факторам ризику F_2 та F_4 . Узагальнені принципи Рока-ґоке наведено в таблиці 6.12.

Зменшення втрат у процесах реконструкції неможливе без урахування впливу людського фактора та умов виконання робіт. На основі результатів, отриманих у розділах 4.1–4.3, у даному дослідженні обґрунтовується доцільність впровадження ергономічної моделі робочого процесу, яка враховує взаємодію

виконавця з виробничим середовищем, а також інтеграцію допоміжних дій, що супроводжують основний технологічний процес.

На продуктивність виконання робіт суттєво впливають мотивація та кваліфікація виконавця, температурні умови (34 °С, 23 °С, 8 °С, 0 °С, –10 °С, –18 °С), висота та просторове розташування робочої зони, освітлення, час доби, рівень шуму, фізичне навантаження, втома та психологічний стрес. Ігнорування зазначених чинників призводить до зростання ймовірності помилок, зниження продуктивності та появи додаткових втрат.

Таблиця 6.12

Принципи захисту від помилок

Шифр	Принцип	Опис
P_1	Усунення	Прагнення усунути можливість помилок шляхом перепроєктування процесу так, щоб завдання або його частина більше не були потрібні
P_2	Заміна	Замінює процес більш надійним для покращення узгодженості
P_3	Профілактика	Проектує продукт чи процес так, щоб помилка взагалі була неможлива.
P_4	Фасилітація	Використовує методи та поєднує кроки, що полегшують виконання роботи.
P_5	Виявлення	Включає виявлення помилки перед тим, як відбудеться подальший крок, щоб була можливість швидко виправити проблему.
P_6	Пом'якшення	Спрямоване на мінімізацію наслідків помилок.

У межах Lean-аналізу такі чинники інтерпретуються як джерела втрат або ризиків, що впливають на ефективність технологічного процесу реконструкції. Для їх формалізованого обліку у роботі використано систему категорій втрат [281], узагальнених у таблиці 6.13, яка охоплює як класичні види відходів Lean, так і специфічні для реконструкції фактори, пов'язані з умовами праці та організацією робіт.

Застосування відомості обчислень (BOQ) у проєктах реконструкції створює передумови для ідентифікації та кількісної оцінки частини зазначених втрат ще на передтендерному етапі. Деталізація обсягів робіт, матеріалів і технологічних

операцій у BOQ дозволяє зіставляти їх з категоріями втрат таблиці 6.13, зокрема L_1 (очікування), L_3 (надлишок матеріалів), L_4 (помилки проектування), L_9 (переробки) та L_{15} (потреби у роз'ясненні).

Таблиця 6.13

Категорії відходів або ризику, можливі при реалізації робіт з реконструкції

Шифр	Категорія втрат, відходів або ризиків
L_1	Відходи через періоди очікування
L_2	Дефекти
L_3	Надлишок матеріалів
L_4	Відходи через помилки проектування
L_5	Час транспортування/обробки
L_6	Затримки активності
L_7	Відходи внаслідок діяльності
L_8	Надмірний простір/запас
L_9	Переробки
L_{10}	Надвиробництво
L_{11}	Витрати на безпеку
L_{12}	Зношеність обладнання
L_{13}	Час відпочинку
L_{14}	Перевірки, лабораторні та інші види досліджень, винахідницька робота
L_{15}	Потреби у роз'ясненні
L_{16}	Помилки
L_{17}	Немає складської зони поблизу робочої площадки
L_{18}	Демотивація виконавця
L_{19}	Некомфортна температура (надмірно висока чи низька)
L_{20}	Недостатня кваліфікація
L_{21}	Надмірна висота розташування робочої зони
L_{22}	Незручне розташування робочої зони
L_{23}	Нічна зміна
L_{24}	Погане освітлення місця роботи
L_{25}	Напруження та втома виконавця
L_{26}	Стрес, який може почувати виконавець
L_{27}	Надмірний шум

BOQ у даному дослідженні розглядається не лише як кошторисно-тендерний документ, а як інструмент попереднього Lean-аналізу технологічних процесів реконструкції. Особливої актуальності такий підхід набуває для операцій з підвищеним рівнем технологічних і виробничих ризиків.

У процесах реконструкції каркасних будівель суттєву частку втрат формують помилки, що виникають під час вантажопідіймальних і монтажних операцій, зокрема під час стропування елементів підсилення. З позицій Lean-концепції такі помилки розглядаються як дефекти процесу, що призводять до додаткових витрат часу, ресурсів і зростання рівня ризиків.

Найбільш поширеними проявами втрат на даному етапі є:

- неправильний вибір або технічний стан стропів і вантажозахватних пристроїв;
- порушення геометрії стропування та перевищення допустимої вантажопідіймальності;
- недостатній контроль за кріпленням і стабільністю вантажу під час підйому;
- неузгодженість дій між стропальником, машиністом крана та іншими учасниками процесу;
- відсутність системної оцінки навколишніх перешкод і умов виконання робіт.

Зазначені прояви безпосередньо відповідають категоріям втрат L_2 (дефекти), L_5 (транспортування/обробка), L_6 (затримки активності), L_{16} (помилки) та пов'язані з факторами ризику F_2 , F_3 та F_6 . У межах дослідження обґрунтовано, що їх рівень може бути суттєво знижений шляхом стандартизації монтажних операцій, впровадження візуального контролю, чітких регламентів стропування та принципів захисту від помилок (Poka-Yoke), інтегрованих у конструктивно-технологічні схеми реконструкції.

6.4.3. Процеси роботизованого монтажу як драйвер ефективного організаційно-технологічного забезпечення реконструкції

У сучасних умовах цифровізації та автоматизації будівельної галузі суттєво зростає роль інтелектуального обладнання та роботизованих систем (Intelligent Equipment and Robots, IOR) як складової організаційно-технологічного забезпечення реконструкції будівель. Розвиток програмного забезпечення, засобів механізації та обчислювальних технологій створює передумови для впровадження роботизованих рішень у процеси підсилення каркасних будівель, що дозволяє підвищити точність, безпеку та передбачуваність виконання робіт.

У даному дослідженні процеси роботизованого монтажу розглядаються як логічне продовження BIM-орієнтованого проєктування (розд. 6.4.1) та Lean-оптимізації потоків робіт (розд. 6.4.2), спрямоване на зниження організаційно-технологічних ризиків і втрат, а також на підвищення ефективності формування конструктивно-технологічних схем реконструкції.

Аналіз сучасної практики показує [282-284], що у процесах реконструкції каркасних будівель низка монтажних операцій може бути частково або повністю автоматизована із застосуванням ІОР. У дослідженні систематизовано основні групи роботизованих процесів, до яких віднесено:

- демонтаж і розбірку існуючих конструктивних елементів;
- монтаж і позиціювання нових несучих елементів (колон, балок, елементів підсилення);
- виконання зварювальних і болтових з'єднань;
- монтаж внутрішніх конструкцій і допоміжних елементів;
- високоточні вимірювання та контроль геометрії;
- автоматизоване переміщення і подавання матеріалів.

Застосування ІОР у зазначених процесах у межах КТС розглядається як інструмент зменшення варіативності виконання операцій, мінімізації людського

фактора та зниження ймовірності виникнення дефектів, що корелює з ризиками F_2 , F_3 та F_6 .

На основі узагальнення літературних джерел і практичних прикладів у дослідженні виділено ключові ефекти впровадження ІОР, релевантні для процесів реконструкції:

1. Підвищення рівня безпеки. Використання напіваавтономних і автономних роботизованих систем для виконання небезпечних операцій (роботи на висоті, підйом і фіксація важких елементів, зварювання) дозволяє зменшити виробничі ризики та кількість нещасних випадків. У межах дослідження ІОР розглядаються як засіб зниження витрат за категорією L_{11} та мінімізації ризиків F_6 .

2. Підвищення продуктивності та точності. Автоматизація монотонних і трудомістких операцій забезпечує стабільну якість виконання робіт і зменшення похибок. Зокрема, застосування роботизованих кранових і зварювальних систем дозволяє підвищити продуктивність окремих операцій до 30–50%, що безпосередньо впливає на скорочення тривалості циклу реконструкції (фактори F_3 , F_5).

3. Компенсація дефіциту кваліфікованих кадрів. Умови нестачі кваліфікованої робочої сили в будівельній галузі України обґрунтовують доцільність впровадження ІОР як засобу стабілізації виробничих процесів. У дослідженні автоматизація розглядається не як заміна людини, а як інструмент зниження залежності якості робіт від індивідуальної кваліфікації виконавця (фактор F_1).

4. Автоматизований контроль якості. ІОР дозволяють інтегрувати контроль якості безпосередньо у технологічний процес. Роботизовані системи моніторингу та інспекції забезпечують оперативне виявлення відхилень і дефектів, що відповідає принципам Рока-Йоке та знижує втрати за категоріями L_2 і L_9 (рис. 6.19).

У дослідженні безпілотні літальні апарати (БПЛА) та роботизовані системи розглядаються як інструменти цифрового супроводу процесів обстеження, моніторингу та управління якістю реконструкції, що забезпечують отримання достовірних даних про технічний стан конструкцій та їх інтеграцію в BIM-моделі (рис. 6.20).



Рис. 6.19. Пот-робот для автономної фотозйомки 360°



Рис. 6.20. Використання дронів на будівельному майданчику

Слід зазначити, що впровадження інтелектуального обладнання та роботизованих систем (ІОР) не суперечить людиноцентричній концепції реконструкції, а є її логічним розвитком. У межах даного дослідження роботизація розглядається не як заміна людської праці, а як інструмент зниження небезпечних, фізично важких і помилкових операцій, що у довгостроковій перспективі сприяє підвищенню рівня безпеки, ергономіки та стабільності виробничих процесів.

У межах КТС передбачено структурно-функціональну модель вибору методів інструментального обстеження, яка базується на принципі відповідності між виявленим дефектом, контрольованим параметром та методом його визначення. Початковим етапом є візуальне обстеження конструкцій, під час якого виявляються дефекти, пошкодження та ознаки зміни технічного стану (розділ 4.1-4.2). Для підвищення ефективності огляду можуть застосовуватись

безпілотні літальні апарати, технології фотограмметрії, LIDAR та роботизовані системи контролю (рис. 6.20-6.21). Залежно від типу виявленого дефекту визначається параметр, що потребує детальнішого дослідження, та обираються відповідні методи інструментального контролю. Використання цифрових і роботизованих технологій не лише підвищує точність і оперативність діагностики, але й сприяє вдосконаленню організаційно-технологічного забезпечення реконструкції каркасних будівель. Це забезпечує зниження рівня технологічних і виробничих ризиків (зокрема факторів F_1-F_7), мінімізацію втрат відповідно до принципів Lean, підвищення якості та відтворюваності контрольних і монтажних операцій, а також створює передумови для подовження життєвого циклу підсилених конструкцій.

Одним із ключових бар'єрів впровадження ІОР у процесах реконструкції визначено відсутність системного організаційно-технологічного підходу. На рис. 6.21 наведено авторську схему інтеграції BIM-, Lean- та ІОР-технологій у систему організаційно-технологічного забезпечення процесів підсилення каркасних будівель, у межах якої роботизовані процеси розглядаються як складова цілісної моделі управління реконструкцією, а не як ізольоване технічне рішення. Схема відображає взаємозв'язок між цифровим проєктуванням, управлінням потоками робіт і ресурсів та застосуванням роботизованих і автоматизованих засобів виконання робіт з урахуванням умов будівельного майданчика і людиноцентричних принципів організації праці.

Запропонований підхід дозволяє узгодити застосування ІОР із вимогами безпеки, ергономіки та виробничих обмежень, забезпечуючи підвищення надійності підсилення несучих конструкцій і зниження сукупних витрат протягом життєвого циклу об'єкта.

Узагальнюючи, результати дослідження свідчать, що орієнтація на людиноцентричну модель реконструкції, доповнену BIM-, Lean- та ІОР-технологіями, є економічно доцільною не лише у довгостроковій перспективі для замовника, а й з позицій сталого розвитку будівельної галузі загалом. Оцінка

ефективності таких рішень має базуватися на поєднанні комп'ютерного моделювання, аналізу практичного досвіду та узгоджених рішень між усіма зацікавленими сторонами, що забезпечує прогнозоване скорочення витрат і підвищення якості реконструкції.



Рис. 6.21. Схема інтеграції BIM-, Lean- та IOP-технологій в організаційно-технологічне забезпечення процесів підсилення каркасних будівель

6.5. Систематизація та формалізація вибору конструктивно-технологічних рішень підсилення каркасних будівель за критеріями якості

Раціональний вибір КТР для підсилення елементів каркасних будівель є складним процесом, який вимагає оцінки причин ініціювання робіт, технічного стану елементів, критеріїв якості та умов виконання робіт. Запропонована система описує послідовний ланцюг прийняття рішень, у якому від причин ініціювання робіт V_j та вихідних характеристик конструктивного елементу K_x перехід здійснюється через критерії оцінки якості — ефективності R_i , експлуатаційної надійності N_i та сталості A_m (розд. 2.3):

$$V_j \longrightarrow K_x \rightarrow (R_i, N_i, A_m) \longrightarrow D_{ij} \longrightarrow M_{KT} \longrightarrow M_{OT} \quad (6.21)$$

Саме ці критерії уточнюють можливі варіанти та обмежують вибір моделі КТР M_{KT} , що, у свою чергу, визначає доступний спектр ОТР M_{OT} .

На відміну від існуючих підходів та традиційних класифікацій [5, 17, 21, 28, 93, 128, 138, 139, 154, 179], які є описовими, а не системними, а методи підсилення подаються у вигляді переліків дефектів або технологій без формалізації процесу вибору та інтеграції з організаційними аспектами, запропонована система інтегрує причинно-наслідкові залежності у вигляді функцій:

$$M_{KTi} = f(V_j, R_i, N_i, A_m), \quad (6.22)$$

$$M_{OTk} = g(M_{KTi}, R_i, N_i, A_m). \quad (6.23)$$

Таке формалізоване представлення вперше встановлює чіткий логічний зв'язок між факторами змін, критеріями якості та вибором технології підсилення. Це дозволяє реалізувати мультикритеріальний відбір рішень, що не представлено в нормативних документах і в більшості існуючих систем класифікації. Це робить систему алгоритмічною та придатною для подальшого цифрового моделювання, оптимізації та автоматизованого вибору рішень за допомогою ANN.

Причини ініціювання робіт V_j задають потребу у підсиленні та визначають потенційно придатні моделі КТР. Критерії якості, викладені в підрозділі 2.3, а саме ефективність R_i , експлуатаційна надійність N_i та інноваційний аспект сталість A_m , уточнюють і обмежують вибір моделі, що дозволяє уникати технічно нераціональних або економічно недоцільних рішень. Визначена модель M_{KTi} формує допустимі та оптимальні варіанти M_{OTk} , які враховують доступність фронту робіт, умови монтажу, вимоги до техніки та ресурси.

У процесі систематизації варіантів КТР важливим етапом є визначення фактичного стану елементів каркасу будівлі, який є ключовим вхідним

параметром у процесі вибору оптимального варіанта КТР. На нього впливають (розділ 3.5): внутрішні фактори змін C_i (втома матеріалу, попередні відновлювальні дії, перерозподіл зусиль); зовнішні фактори змін E_i (температура, вологість, агресивне середовище, механічні впливи); чинники, що впливають на строк експлуатації I_i (інтенсивність навантаження, режим роботи, циклічність); середовище в зоні об'єкта IS_k ; дефекти й пошкодження D_i , пов'язані з втратою міцності, корозією, деформаціями, тріщиноутворенням тощо.

Оскільки вимоги надійності та ефективності часто суперечать одна одній, остаточне рішення повинно враховувати нормативні вимоги Y_x , вимоги замовника Z_x , критерії сталості A_m , тип підходу T_x (мінімальне втручання, максимальне відновлення, адаптивна модернізація), складність технічного обслуговування $O_{\text{тех}}$, вартість життєвого циклу $X_{\text{жц}}$, тривалість життєвого циклу J , витрати енергетичних та водних ресурсів S та імовірні фактори ризику F_s . Таке поєднання параметрів створює умови для багатокритеріального вибору варіанта КТР та дає можливість адаптувати рішення до реальних умов експлуатації.

У практиці реконструкції каркасів будівель для досягнення необхідного рівня несучої здатності та довговічності зазвичай застосовують комбінації різних способів підсилення. Тому в межах систематизації варто враховувати не лише окремі варіанти КТР, а й їх можливі поєднання, які відповідають пріоритетам конкретного проєкту (швидкість реалізації, мінімальна вартість, тривалість ефекту, екологічність, зручність експлуатації). Для цього необхідно аналізувати всі доступні варіанти та відбирати той, який найкраще відповідає комплексним критеріям якості й умовам об'єкта, а також потребами та можливостями кожного окремого замовника робіт.

Загальна система формування варіантів $M_{\text{КТ}}$ залежно від дефектів і пошкоджень (розд. 4.2) каркасів будівель або причин підвищення несучої здатності (ПНЗ) (розд. 4.6) наведена на рис. 6.22. Вона є основою для багаторівневої класифікації та вибору $M_{\text{КТ}}$ у різних умовах та демонструє взаємозв'язок між:

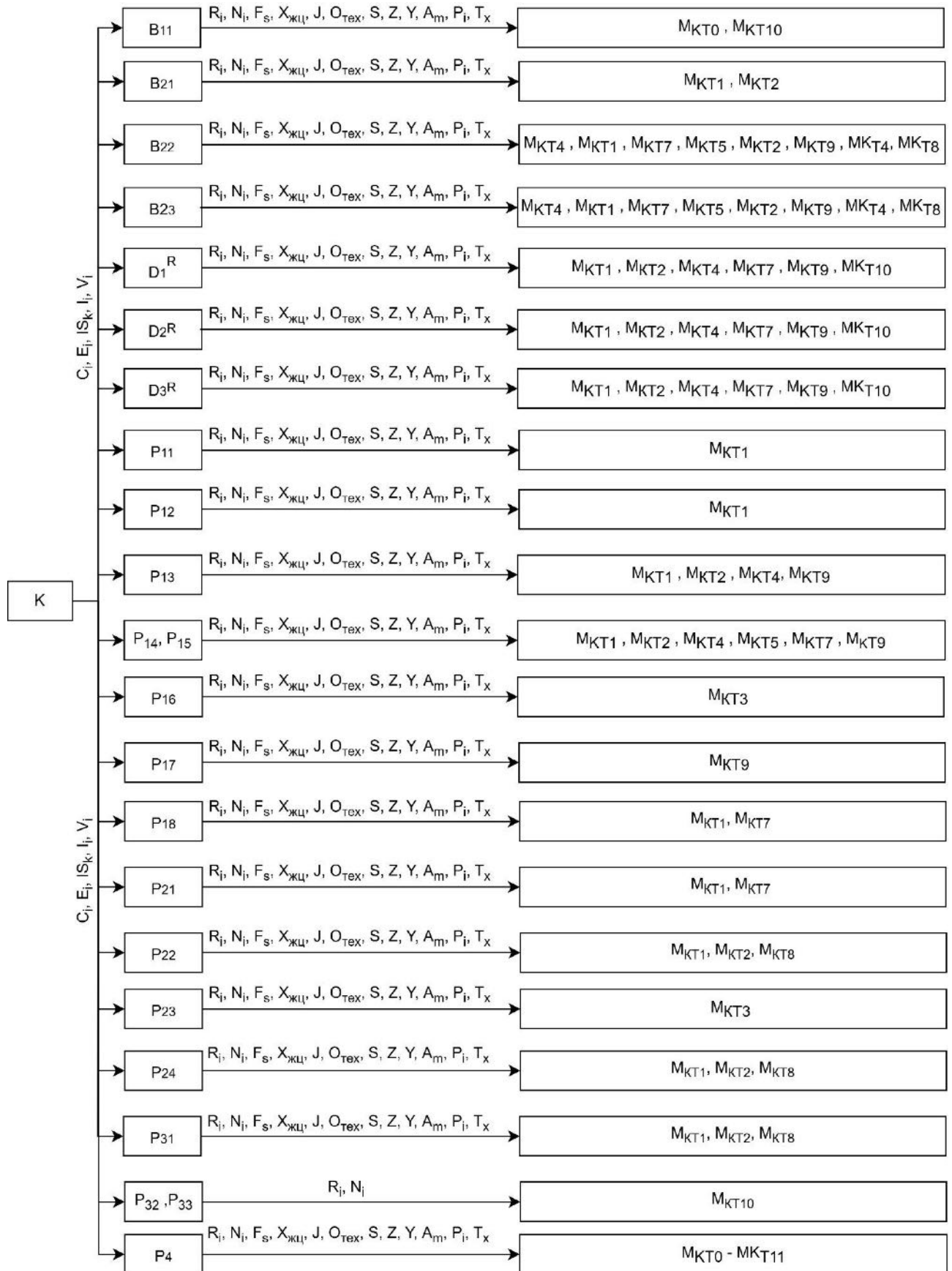


Рис. 6.22. Загальна система формування варіантів M_{KT} в залежності від причини підсилення

- типом дефектів, пошкоджень або ПНЗ;
- характеристиками матеріалів та умовами експлуатації;
- обмеженнями доступу та геометрії;
- можливими технологіями відновлення;
- відповідними моделями КТР.

У сучасних підходах до оцінки техніко-економічних показників (ТЕП) підсилення будівельних конструкцій зазвичай розглядаються лише стандартні роботи з підсилення [56], без врахування факторів навколишнього середовища, які можуть значно змінювати нормативні показники трудомісткості, тривалості або вартості. Одночасне врахування різних альтернатив КТР є складним процесом, що потребує систематизації та формалізації.

Для цього в роботі запропоновано використання поняття “аспектів” — кластеризація спільних властивостей у певні категорії, що дозволяє узагальнити та систематизувати інформацію. Аспектна структура забезпечує мультикритеріальний підхід до оцінки якості підсилення будівельних конструкцій, включаючи конструктивні, технологічні, логістичні, експлуатаційні, часові та економічні аспекти (табл. 6.14).

У наявній літературі (FEM Guidelines, FIB Model Code, AISC Manual [93, 128, 161]) та нормативних документах (ДБН, ДСТУ, Eurocode [6, 38, 43, 50, 69, 132]) аналіз технологій підсилення подається у вигляді окремих описів (підсилення сталевими накладками, FRP-матеріалами, зміна схеми роботи елементів тощо) і не структурований у формі аспектів. Наукова новизна запропонованого підходу полягає у тому, що вперше розрізнені параметри перетворено на цілісну систему аспектів, що дозволяє:

1. Встановлювати причинно-наслідкові зв'язки між причинами, критеріями якості та вибором технологічних рішень;
2. Поєднувати КТР та ОТР, відсутні у сучасних класифікаціях;
3. Використовувати мультикритеріальний підхід, який одночасно враховує ефективність, надійність та сталість;

4. Забезпечувати цифрову оптимізацію, оскільки функції оцінки $f(\cdot)$ і $g(\cdot)$ можуть бути реалізовані у алгоритмах автоматизованого вибору КТР та ОТР;
5. Впроваджувати пріоритезацію альтернатив та формувати основу для алгоритмізації і практичного застосування.

Таблиця 6.14

Аспекти оцінки якості підсилення будівельних конструкцій

Аспект	Описання аспекту	Приоритетність
Конструктивні	Цей аспект включає властивості, пов'язані з конструкцією та геометричними особливостями будівлі (міцність матеріалів, опори, з'єднання, система кріплення та інші конструктивні деталі).	х
Основна ціль	Причина необхідності підсилення елементу каркасу будівлі та ступінь відновлення.	х
Об'ємно-планувальні	Включає властивості, пов'язані з геометричними та просторовими особливостями будівлі.	х
Матеріальні	Охоплює властивості матеріалів, які можуть бути потенційно використані для підсилення каркасу будівлі (властивості сталі, композитних високоміцних матеріалів, бетону, дерева або інших матеріалів конструкції).	х
Технологічні	Включає властивості, пов'язані з процесами будівництва та монтажу каркасних будівель (технології зварювання, застосування прогресивних систем монтажу, контроль якості робіт тощо).	х
Експлуатаційні	Відноситься до властивостей, що впливають на експлуатаційну надійність будівлі під час її використання (властивості стійкості до навантажень, захист від корозії, термоізоляція, протипожежні заходи, обслуговування та ремонт тощо).	х
Безпека	Рівень безпеки	х
Логістичні втрати	Витрати, складності або час, пов'язані з перевезенням, логістикою	х
Трудомісткість		х
Час		х
Загальна вартість	Загальна вартість життєвого циклу реконструкції каркасу будівлі	х

Аналіз технологій, які є більш або менш поширеними для підсилення каркасів будівель, показує різноманіття варіантів. Однак деякі технології мають набагато більшу частоту застосування в порівнянні з іншими (рис. 6.23). Аналіз частоти використання показав такі результати:

- Найпоширеніша технологія – це збільшення перетину елементів приварюванням додаткових металевих елементів (M_{KT1}), яка застосовується в 35% випадків.

- Менш поширені технології включають використання композитних матеріалів (M_{KT7}) і заміну елементів (M_{KT8}), кожна з яких має частоту 1-2%.

- Помірно поширені технології – це установлення додаткових ребер, діафрагм, опор і розпірок (M_{KT2}) із частотою 30%, підведення нових конструкцій (M_{KT4}) – 12%.

Діаграма на рис.6.23 показує розподіл технологій підсилення каркасів будівель за частотою використання. Як видно, технологія M_{KT1} "Збільшення перетину наросчуванням додаткових металевих елементів" є найбільш поширеною, а M_{KT7} "Підсилення високоміцними FRP-матеріалами", застосовуються набагато рідше.

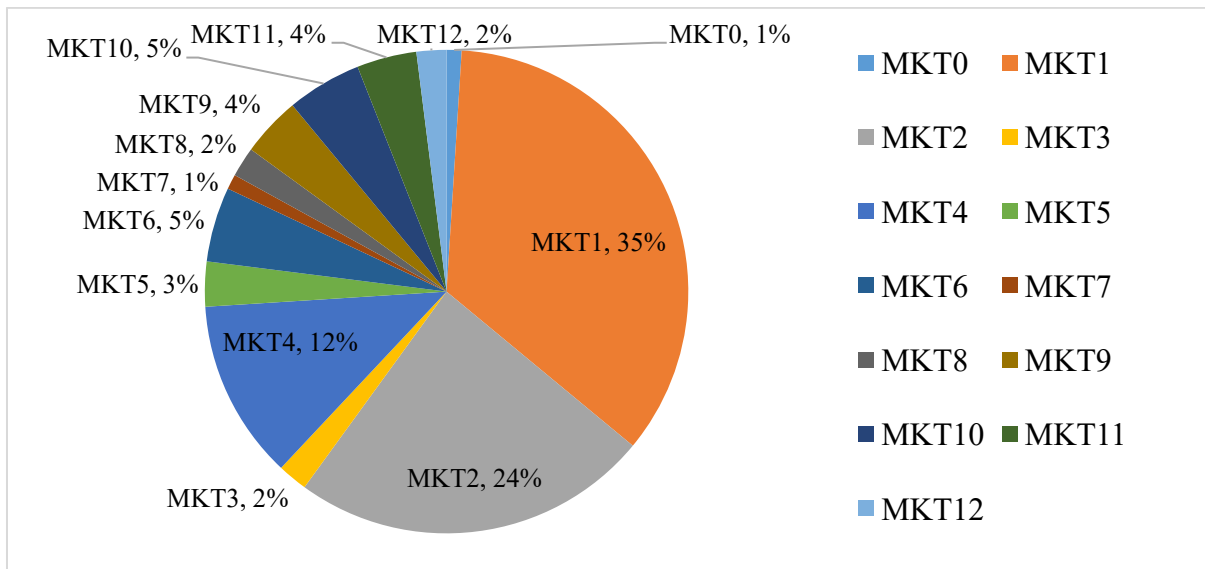


Рис. 6.23. Розподіл технологій підсилення каркасів будівель за частотою використання

Модель M_{KT_i} формується з урахуванням типу конструкції каркасу, її геометричних особливостей, умов експлуатації, можливості виконання робіт без зупинки основного виробництва, швидкості монтажу та мінімізації потреби у

влаштуванні робочих майданчиків. Логіка вибору моделі КТР та відповідної організаційно-технологічної моделі ОТР формалізується через послідовний ланцюг залежностей:

$$V_j \xrightarrow{T_x, O_{\text{тех}}, P_i, Z_x, Y_x, S, J} \left[\begin{array}{c} N_i \xrightarrow{F_S, X_{\text{жц}}} M_{\text{КТ}i} \\ R_i \xrightarrow{F_S} \begin{bmatrix} \text{RK}_k \\ \text{RT}_e \\ \text{RE}_t \\ \text{RC}_s \end{bmatrix} \\ A_m \end{array} \right] \xrightarrow{F_S, S, J, Z_x} M_{\text{ОТ}i} \quad (6.24)$$

Для зменшення невизначеності та підвищення обґрунтованості вибору у таблиці 6.15 сформовано систематизовану відповідність між моделями конструктивно-технологічних рішень та моделями організаційно-технологічного забезпечення. Такий підхід дозволяє інтерпретувати кожну $M_{\text{КТ}}$ (розділ 5.4) не як ізольоване технічне рішення, а як елемент керованої системи, реалізація якої потребує відповідної сукупності моделей $M_{\text{ОТ}}$ (розділ 4.1) залежно від складності втручання, рівня ризику та обраного підходу до реконструкції.

Пояснення до застосування відповідності $M_{\text{КТ}} — M_{\text{ОТ}}$

1. Універсальний характер окремих $M_{\text{ОТ}}$. Окремі моделі організаційно-технологічних рішень (зокрема моделі управління ризиками та ВІМ-орієнтованого цифрового моделювання) мають широкий функціональний спектр і можуть бути інтегровані з більшістю конструктивно-технологічних рішень незалежно від їх типу та складності.

2. Комбінований характер реалізації рішень. У практиці реконструкції реалізація кожного конструктивно-технологічного рішення, як правило, супроводжується застосуванням декількох взаємодоповнювальних організаційно-технологічних моделей. Таке поєднання формує синергетичний ефект, підвищуючи керованість процесу, надійність виконання робіт і стабільність досягнення заданих показників якості.

3. Адаптивний вибір складу M_{OT} . Конкретний набір організаційно-технологічних моделей визначається індивідуальними умовами об'єкта та включає технічний стан елементів каркасу, умови доступу та виконання робіт, бюджетні та часові обмеження, вимоги до безпеки, а також рівень технологічних і організаційних ризиків.

4. Неоднорідність конструктивних рішень у межах одного об'єкта. Каркас будівлі, як правило, характеризується різним характером пошкоджень і дефектів, що зумовлює необхідність застосування різних моделей M_{KT} для окремих його елементів або зон. Це, своєю чергою, потребує гнучкого комбінування конструктивних, технологічних та монтажних підходів у межах єдиного проєкту реконструкції.

5. Об'єктний характер окремих M_{OT} . На відміну від моделей M_{KT} , які застосовуються до конкретних елементів або фрагментів каркасу, значна частина організаційно-технологічних моделей має об'єктний характер і охоплює реконструкцію в цілому. До таких моделей належать, зокрема, BIM-орієнтоване цифрове моделювання, система управління ризиками та управління якістю, що забезпечують інтеграцію різномірних рішень у єдину керовану систему.

6. Синергетичний ефект поєднання M_{OT} . Поєднання окремих організаційно-технологічних моделей (наприклад, управління ризиками з Lean-технологіями або BIM-моделюванням) дозволяє досягти істотного підвищення ефективності, зниження втрат ресурсів і мінімізації помилок, що є особливо важливим для складних та багатостадійних реконструкційних процесів.

7. Обмеження доцільності застосування M_{OT} . Не всі організаційно-технологічні моделі є доцільними для кожного виду конструктивно-технологічних рішень. Зокрема, для локальних або маломасштабних втручань (наприклад, M_{KT10} — поточний ремонт дефектів і пошкоджень) застосування BIM-моделювання, Lean-технологій або роботизованих систем може бути технічно надмірним або економічно необґрунтованим.

Таблиця 6.15

Рекомендована відповідність моделей M_{KT} та M_{OT}

M_{KT}	M_{OT}
M_{KT0} – забезпечення дотримання нормативного технологічного процесу	$M_{OT2,1}$ (проектування та планування); $M_{OT2,3}$ (управління якістю); $M_{OT2,6}$ (системний аналіз ТЕП)
M_{KT1} – збільшення перетину елементів	$M_{OT1,1}$ (вибір технології застосування матеріалів підсилення); $M_{OT2,1}$ (планування); $M_{OT2,3}$ (управління якістю); $M_{OT2,4}$ (управління ризиками)
M_{KT2} – установлення додаткових ребер, діафрагм, опор і розпірок	$M_{OT1,1}$; $M_{OT2,1}$; $M_{OT2,3}$; $M_{OT2,4}$; $M_{OT2,5}$ (Lean-технології)
M_{KT3} – підсилення з'єднань елементів	$M_{OT1,1}$; $M_{OT2,3}$; $M_{OT2,4}$; $M_{OT2,8}$ (технології «людина–машина»)
M_{KT4} – підведення нових конструкцій і введення нових додаткових елементів	$M_{OT1,2}$ (проектування нових конструкцій); $M_{OT2,1}$; $M_{OT2,2}$ (управління проектом); $M_{OT2,4}$
M_{KT5} – зміна конструктивної схеми	$M_{OT1,2}$; $M_{OT2,1}$; $M_{OT2,2}$; $M_{OT2,4}$; $M_{OT2,6}$
M_{KT6} – збільшення просторової жорсткості	$M_{OT1,1}$; $M_{OT2,1}$; $M_{OT2,3}$; $M_{OT2,5}$
M_{KT7} – використання композитних матеріалів	$M_{OT1,1}$; $M_{OT2,3}$; $M_{OT2,4}$; $M_{OT2,7}$ (BIM-орієнтоване моделювання)
M_{KT8} – Повна або часткова заміна елементів каркасу	$M_{OT1,2}$; $M_{OT2,1}$; $M_{OT2,2}$; $M_{OT2,4}$; $M_{OT2,5}$
M_{KT9} – підсилення конструкцій шляхом попередньої напруги	$M_{OT1,1}$; $M_{OT2,3}$; $M_{OT2,4}$; $M_{OT2,8}$
M_{KT10} – поточний ремонт дефектів та пошкоджень	$M_{OT2,1}$; $M_{OT2,3}$; $M_{OT2,5}$
M_{KT11} – зменшення робочого прольоту конструкції	$M_{OT1,2}$; $M_{OT2,1}$; $M_{OT2,4}$; $M_{OT2,6}$
M_{KT12} – комбіновані конструктивно-технологічні системи	$M_{OT1,1}$; $M_{OT1,2}$; $M_{OT2,1}$; $M_{OT2,3}$; $M_{OT2,4}$; $M_{OT2,7}$; $M_{OT2,8}$

Саме на цьому етапі виникає потреба у системному аналізі впливу роботизованих технологій, оскільки їх використання не може розглядатися універсальним рішенням для всіх M_{KT} і M_{OT} . З огляду на це, у даній роботі роботизовані технології розглядаються не як окремі технічні інновації, а як інтегрована складова M_{KT} та M_{OT} , що є принципово новим підходом для реконструкції каркасних будівель.

Таблиця 6.16

Оцінка ефективності використання роботизованих технологій для різних КТР та ОТР

МкТ / Мот Моделі	Якість	Безпека	Час і Вартість	Використання робіт	Примітки
МкТ0 - Дотримання нормативного процесу	+1 (покращення точності виробництва)	+2 (зменшення небезпек при автоматизації)	+1 (скорочення часу та витрат на контроль)	Зменшення помилок на етапі виробництва	Роботи на автоматизацію контролю технологічних процесів
МкТ1 - Збільшення перетину елементів	0 (немає значних змін)	+1 (менше помилок при точному виконанні)	+1 (можливість більш швидкого виготовлення)	Підвищення точності при роботі з великими елементами	Роботи з автоматичним контролем розмірів
МкТ2 - Установлення додаткових ребер	+1 (покращення точності установки)	+1 (зменшення ризиків при роботі з важкими елементами)	0 (немає значного впливу)	Роботи, що потребують точності та мінімізації травматизму	Роботи з автоматизацією монтажу елементів
МкТ3 - Підсилення з'єднань елементів	+2 (покращення точності з'єднань)	+2 (менше травм при автоматизації з'єднань)	0 (немає значного впливу)	Підвищення точності з'єднань і скорочення часу	Автоматизація монтажу складних з'єднань
МкТ4 - Підведення нових конструкцій	+1 (покращення якості конструкцій)	+1 (підвищення безпеки при роботі з новими елементами)	+2 (зниження часу на установку нових елементів)	Використання робітників в зонах з високими ризиками	Роботи з введенням нових елементів
МкТ5 - Зміна конструктивної схеми	+2 (покращення якості)	0 (без впливу на безпеку)	+1 (скорочення часу на проектування)	Роботи на етапі змін конструкції	Роботи з автоматизацією проектування
МкТ6 - Збільшення просторової жорсткості	+1 (точність у виготовленні та монтажі)	+1 (покращення безпеки через автоматизацію)	0 (немає суттєвого впливу)	Роботи з підвищенням жорсткості конструкцій	Автоматизація роботи з важкими елементами
МкТ7 - Використання композитних матеріалів	+1 (покращення точності виготовлення матеріалів)	+1 (менше травм при обробці)	+2 (значна економія часу на виготовлення)	Заміна важкої праці на автоматизовану	Роботи з композитами, які потребують високої точності

Мкт / Мот Моделі	Якість	Безпека	Час і Вартість	Використання робіт	Примітки
Мкт8 - Повна або часткова заміна елементів каркасу	+2 (покращення якості заміни елементів)	+1 (менше травм при автоматизації заміни)	+1 (економія часу на демонтаж)	Підвищення ефективності при заміні каркасних елементів	Роботи з заміною конструкцій каркасу
Мкт9 - Підсилення конструкцій попереднім напруженням	+2 (покращення точності)	+2 (покращення безпеки при напруженні конструкцій)	+1 (економія часу на обробку елементів)	Роботи з напруженням елементів конструкцій	Роботи з автоматизованою установкою попереднього напруження
Мкт10 - Поточний ремонт дефектів та пошкоджень	+1 (покращення якості ремонту)	+1 (зменшення ризиків для працівників)	+2 (скорочення часу на ремонт)	Відсутність трудомістких процесів	Роботи з автоматизацією процесу ремонту
Мкт11 – зменшення робочого прольоту конструкції	+2 (покращення якості)	+1 (покращення безпеки через автоматизацію)	+1 (скорочення часу на проектування)	Використання робітників в зонах з високими ризиками	Роботи з введенням нових елементів
Мот1,1 - Модель вибору матеріалів і технологій	0 (немає значного впливу)	0 (немає суттєвого впливу)	+1 (автоматизація процесу вибору матеріалів)	Зменшення помилок у виборі	Роботи з вибором та постачанням матеріалів
Мот1,2 - Модель проектування нового каркасу	+1 (покращення якості проекту)	0 (немає суттєвого впливу)	+1 (економія часу на проектуванні)	Покращення процесу проектування	Роботи з BIM-моделюванням
Мот1,3 - Зменшення діючого навантаження	+1 (покращення якості конструкцій через зменшення навантаження)	+1 (зменшення ризиків при роботі з навантаженнями)	+1 (економія часу через оптимізацію навантаження)	Підвищення ефективності роботи	Роботи з оптимізацією навантажень
Мот2,1 - Проектування та планування	0 (немає прямого впливу на якість)	0 (немає значного впливу на безпеку)	+1 (швидше планування завдяки автоматизації)	Автоматизація етапів планування	Використання роботизованих систем для проектування
Мот2,2 - Модель управління проектом	+1 (покращення управління завдяки даним робота)	+1 (підвищення безпеки завдяки контролю робітників)	+1 (покращення часового менеджменту)	Використання для контролю виконання задач	Роботи з автоматизацією управлінських процесів

Мкт / Мот Моделі	Якість	Безпека	Час і Вартість	Використання робіт	Примітки
Мот2,3 - Модель управління якістю	+2 (покращення якості завдяки роботам)	+1 (покращення безпеки на виробництві)	+2 (економія часу завдяки автоматизації)	Зменшення людських помилок	Роботи з автоматизованим контролем якості
Мот2,4 - Модель управління ризиками	0 (немає прямого впливу на якість)	+2 (покращення безпеки на будівельному майданчику)	+1 (економія часу на управлінні ризиками)	Зменшення кількості ризиків для робітників	Роботи з автоматизацією управління ризиками
Мот2,5 - Leap-технології	+1 (покращення якості та ефективності)	+1 (покращення безпеки через зменшення рухів людей)	+2 (значна економія часу та ресурсів)	Оптимізація процесів	Роботи по автоматизації та оптимізації
Мот2,6 - Моделі системного аналізу	0 (немає прямого впливу на якість)	0 (немає суттєвого впливу на безпеку)	+1 (економія часу через аналіз)	Підвищення ефективності аналізу	Роботи з аналізом даних для прийняття рішень
Мот2,7 - ВІМ-моделювання	+2 (покращення якості проектів)	+1 (покращення безпеки завдяки точності)	+1 (скорочення часу на проектування та обчислення)	Зменшення часу на ручне проектування	Роботи з автоматизованим проектуванням та плануванням
Мот2,8 - Технології «людина-машина»	+1 (покращення точності за допомогою робіт)	+2 (покращення безпеки для працівників)	+1 (економія часу завдяки роботизованій підтримці)	Підвищення ефективності працівників	Роботи з інтеграцією робіт в процеси

Для кожного завдання робототехнічне адаптування оцінюється за шкалою від -2 до +2 наступним чином [284]:

-2: адаптація робіт значно погіршує показники завдань.

-1: адаптація робіт дещо погіршує показники завдань.

0: Робототехніка не впливає на показники завдань.

+1: адаптація робіт покращує показники завдань.

+2: адаптація робіт значно покращує показники завдань.

Після оцінки кожного завдання система обчислює загальний бал, щоб оцінити потенціал ІОР-технологій для покращення будівельних робіт:

Позитивний бал: вказує на те, що ІОР-технологія може полегшити процес будівництва.

Негативний бал: свідчить про те, що ІОР-технологія не покращить процес будівництва.

На відміну від існуючих досліджень, де роботизація подається у вигляді ізольованих прикладів автоматизації окремих операцій, у цій дисертації вперше виконано системну оцінку її впливу на всі моделі M_{KT} та M_{OT} . Це дало змогу сформулювати формалізований набір показників (якість, безпека, час, вартість, рівень доцільності використання роботів), за якими оцінено потенціал роботизації, що подано у таблиці 6.16.

Роботизація в цій роботі вперше введена як повноцінний критерій у процес багатокритеріального вибору M_{KT} та M_{OT} та інтегрована в загальну логіку прийняття рішень щодо підсилення конструкцій. Це створює можливість переходу до цифрового моделювання, оптимізації та автоматизованої підтримки прийняття рішень на основі концепції Construction 4.0 [175], що наразі відсутнє у чинних нормативних та методичних документах.

Висновки по шостому розділу

1. Встановлено, що процеси монтажу елементів підсилення каркасних конструкцій є стохастичними багатофакторними системами з високою варіативністю послідовностей дій, що вперше обґрунтовано через комбінаторний аналіз можливих перестановок операцій і необхідність їх оптимізації шляхом суміщення сумісних переходів. Проаналізовано та структуровано основні етапи підсилення, зокрема: підготовчі роботи, виготовлення елементів, монтаж і завершальні операції, що забезпечило формалізований опис процесу в єдиній логіці декомпозиції. Розроблено науково обґрунтовану модель нормування технологічних процесів підсилення на основі мікроелементного підходу з ієрархічною декомпозицією $TRP_b \rightarrow TRP_g \rightarrow TRP_p \rightarrow TRP_o \rightarrow W_r$, яка уніфікує розрахунок трудомісткості для різних типів елементів і умов реконструкції. Запроваджено формалізовану модель технологічної схеми TS з параметризацією технологічних переходів та інтеграцією атрибутів елемента $\{t, m, f, o\}$, моделей КТР/ОТР і факторів середовища I_{Sk} та ES_n у вибір механізації та процес. Обґрунтовано скорочення простору рішень через об'єднання сумісних операцій і перехід до мережеских

моделей, що забезпечує доведене зменшення трудомісткості на 15–20% без втрати якості й безпеки та створює основу для автоматизованого формування технологічних схем і прогнозування тривалості робіт.

2. Вперше сформовано репрезентативну емпіричну базу трудових витрат і тривалості процесів підсилення каркасних конструкцій на основі натурних хронометражних спостережень на реальному об'єкті реконструкції, що забезпечило статистично обґрунтоване встановлення норм часу. Розроблено та запроваджено адаптивну методику нормування трудомісткості для моделей КТР на основі поетапної декомпозиції монтажу на операції та мікрооперації з формуванням матриць складових норм витрат праці, придатних для аналітичного й табличного опрацювання. Встановлено, що інваріантні етапи процесу (W_1 , W_2 , W_5) забезпечують коректність порівняння моделей, а ключові відмінності трудомісткості формуються на етапах виготовлення (W_3) та монтажу (W_4); при цьому частка монтажних операцій становить 40–65% загальної трудомісткості. Обґрунтовано ефективність суміщення технологічно сумісних операцій як резерву підвищення продуктивності: для моделі МКТ1 загальна трудомісткість зменшується з 102,68 до 77,4 люд-год, що відповідає скороченню тривалості на 24,6% без втрати якості та безпеки. Запроваджені узагальнені показники та матриці норм витрат праці сформували кількісну основу для подальшого порівняльного аналізу моделей КТР і підготовки вхідних даних для оцінювання їх ефективності за системою критеріїв якості.

3. Вперше на основі формалізованого дискретного нормування трудових витрат і натурних хронометражних даних розроблено порівняльну методику оцінювання собівартості підсилення для альтернативних моделей M_{KT} із виділенням структури прямих витрат (матеріали, оплата праці, допоміжні ресурси) та резерву непередбачених витрат. Запроваджено підхід «аспектного» техніко-економічного аналізу та обґрунтовано систему багатокритеріального ранжування моделей за сукупністю показників Cost–Space–Labor–Time–Carrying Capacity–Sustainability, що забезпечує зіставлення технічно доцільних

альтернатив без змішування їхніх фізичних і економічних параметрів. Встановлено, що найбільш конкурентоспроможні рішення формуються не за одним критерієм вартості, а за балансом показників: за прийнятою шкалою мінімальні суми рангів отримали $M_{KT2.1}$ та $M_{KT9.1}$ ($\Sigma=16$), близький результат має M_{KT7} ($\Sigma=17$), тоді як базова M_{KT1} характеризується максимальною умовною вартістю в порівнянні альтернатив. Вперше запропоновано індекс порівняльної доцільності I_{pd} як нормовану міру позиції моделі в ранговому ряді ($0 \dots 1$), що дозволяє формалізовано обирати КТР відповідно до пріоритетів проекту реконструкції та використовувати результати як вхідні дані для подальшого синтезу КТС і прийняття рішень.

4. Встановлено, що найвищий ефект підвищення результативності реконструкції каркасних будівель досягається не окремими інноваціями, а синергією BIM–Lean–IOR, яка зменшує варіативність процесів, підвищує передбачуваність і забезпечує кероване скорочення втрат часу та ресурсів. Вперше обґрунтовано роль BIM як інформаційно-аналітичної підсистеми КТС, що інтегрує геометричні, часові (4D), вартісні (5D) та експлуатаційні (6D) параметри, забезпечуючи багатокритеріальний вибір моделей M_{KTi}/M_{OTi} і зниження ризиків помилок за критеріями $N_i-R_i-A_i$. Запроваджено BIM-орієнтований алгоритм моніторингу стану каркасу з безперервним зворотним зв'язком «обстеження–аналіз–рішення–реалізація–контроль» та методологічно обґрунтовано його розвиток до цифрового двійника (Digital Twin) як замкненого контуру управління життєвим циклом підсилення. Розроблено адаптацію Lean-інструментів для реконструкції з формалізацією типових втрат і ризиків та правилами розподілу дефіцитних ресурсів, що знижує дефекти й переробки. Вперше систематизовано й обґрунтовано застосування інтелектуального обладнання та роботизованих систем (IOR) як складової КТС (а не ізольованої механізації) для автоматизації небезпечних/високоточних операцій, інтегрованого контролю якості та зменшення впливу людського фактора, що підвищує безпеку, відтворюваність і довговічність результатів підсилення.

5. Встановлено, що раціональний вибір КТР для підсилення каркасних будівель є багатокритеріальною задачею, яка має враховувати причини ініціювання робіт V_j , вихідні характеристики елемента K_x , технічний стан і обмеження середовища виконання робіт, а також критерії якості R_i – N_i – A_m . Вперше обґрунтовано алгоритмічний причинно-наслідковий ланцюг прийняття рішень та формалізовано вибір у вигляді функцій $M_{KTi} = f(V_j, R_i, N_i, A_m)$ і $M_{OTk} = g(M_{KTi}, R_i, N_i, A_m)$, що забезпечує системну інтеграцію конструктивно-технологічних і організаційно-технологічних рішень та придатність до цифрової оптимізації/автоматизованого відбору (зокрема із застосуванням ANN). Запроваджено поняття “аспектів” як кластеризації властивостей (конструктивні, об’ємно-планувальні, матеріальні, технологічні, експлуатаційні, безпекові, логістичні, часові, трудомісткість, вартість життєвого циклу), що дозволяє одночасно враховувати суперечливі вимоги замовника Z_x , нормативні обмеження Y_x , підхід реконструкції T_x , ризики F_s та показники життєвого циклу $X_{жц}$, J. Розроблено загальну систему формування варіантів МКТ залежно від дефектів/пошкоджень і причин підвищення несучої здатності та систематизовано відповідність M_{KT} – M_{OT} як керовану структуру реалізації рішень, де кожна модель КТР інтерпретується не ізольовано, а як елемент КТС із визначеними організаційними “пакетами” забезпечення. Вперше запроваджено роботизацію (IOR) як повноцінний критерій у багатокритеріальному виборі M_{KT}/M_{OT} та сформовано формалізований набір показників її доцільності (якість, безпека, час/вартість), що створює основу для переходу до Construction 4.0-орієнтованого цифрового моделювання й підтримки прийняття рішень.

6. Основні результати розділу викладені роботах [19, 23, 24, 56, 71, 285].

РОЗДІЛ 7

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПІДСИЛЕННЯ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ

7.1. Загальні положення конструктивно-технологічної системи

У процесі реконструкції каркасних будівель множинність можливих конструктивно- та організаційно-технологічних рішень, варіативність фактичного стану конструкцій, а також наявність численних обмежень і суперечливих критеріїв якості зумовлюють необхідність переходу від локального вибору окремих технічних рішень до системного підходу. За таких умов традиційні описові методи обґрунтування технологій підсилення є недостатніми, що актуалізує потребу у формуванні цілісної методологічної основи прийняття рішень.

У межах даного дослідження сформульовано наукову концепцію конструктивно-технологічної системи (КТС) забезпечення якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції, у якій процес підсилення розглядається як керована багатокритеріальна система з визначеними вхідними параметрами, механізмами перетворення та цільовими результатами. Концепція орієнтована на інтеграцію технічних, організаційних, ресурсних, інформаційних та експлуатаційних складових у єдину логічну структуру.

Ключовим елементом КТС є BIM-орієнтована інформаційно-аналітична підсистема, що виконує функцію цифрового ядра та джерела актуалізованих даних. Вона інтегрує інтелектуальний контур управління якістю та стратегічного прийняття рішень і забезпечує формалізований вибір моделей конструктивно-технологічних (M_{KT_i}) та організаційно-технологічних рішень (M_{OT_i}) за критеріями ефективності, експлуатаційної надійності та сталості. Аналітично-цифрова інтеграція реалізується на основі BIM, Digital Twin, Lean-підходу, систем моніторингу технічного стану (SHM), оцінювання життєвого циклу (LCA) [220],

а також методів штучних нейронних мереж і машинного навчання (ANN/ML), що забезпечує алгоритмізацію та адаптивність управління якістю [285].

Конструктивно-технологічна система забезпечення якості підсилення каркасних будівель представлена у вигляді узагальненої блок-схеми (рис. 7.1), яка відображає логіку трансформації вихідного стану конструкцій у заданий цільовий стан, підсилений каркас будівлі, з урахуванням внутрішніх і зовнішніх обмежень та охоплює повний цикл прийняття рішень: від оцінки фактичного стану конструкцій до вибору оптимальних моделей підсилення, організації виконання робіт і контролю досягнення заданого рівня якості.

До вхідних параметрів конструктивно-технологічної системи належать причини ініціювання робіт, атрибути елементів каркасу, критерії підходу до реконструкції, а також фактори зовнішнього й внутрішнього середовища. Обмеження функціонування системи визначаються фізичними характеристиками об'єкта, ресурсними можливостями, часовими рамками, нормативно-правовими вимогами, умовами експлуатації, а також екологічними та безпековими аспектами. Сукупність цих факторів формує початкові умови реалізації проєкту реконструкції та допустимий простір прийняття рішень.

Рівень якості підсилення елементів каркасу зумовлюється узгодженою дією складових технологічного процесу, зокрема кваліфікації виконавців, застосовуваних технічних засобів і матеріалів, інформаційного забезпечення та системи управління якістю. Вплив зовнішніх чинників — нормативного середовища, організації робіт на будівельному майданчику, логістичних і кліматичних умов — підвищує складність забезпечення заданих показників якості, що є характерною особливістю процесів реконструкції.

Метою функціонування КТС є забезпечення заданого рівня якості, ефективності та експлуатаційної надійності підсилених елементів каркасу будівлі. Досягнення цієї мети реалізується шляхом урахування пріоритетів, сформованих на основі взаємодії конструктивних характеристик каркасу з вимогами замовника, умовами експлуатації та зовнішнім середовищем.

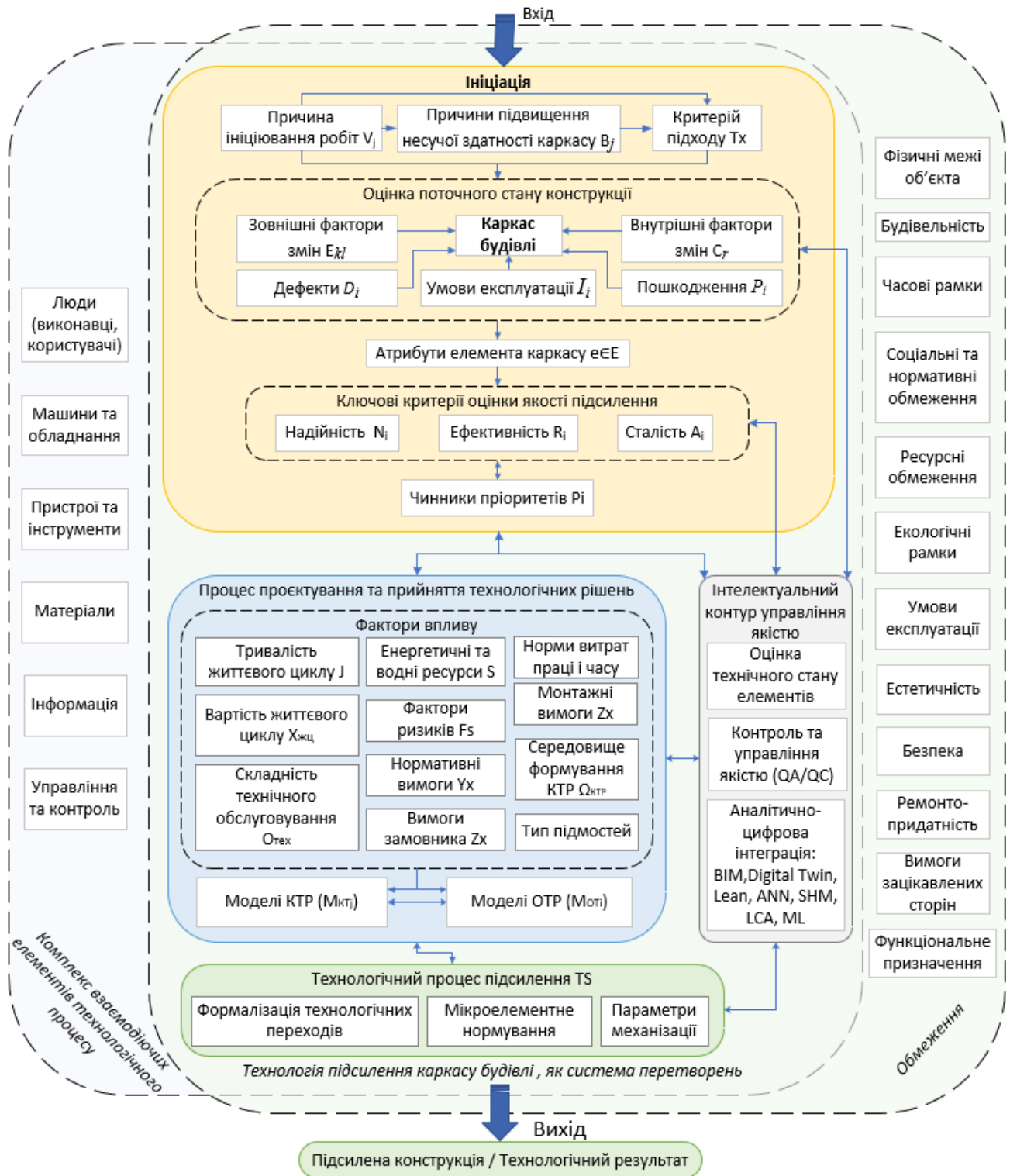


Рис.7.1. КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції

Функціонування системи передбачає структурну декомпозицію каркасу на окремі елементи з подальшим вибором раціональних способів їх підсилення, відновлення або заміни. У межах дослідження технологічна система підсилення

тракується як сукупність взаємопов'язаних матеріальних, технічних, людських та управлінських компонентів, що забезпечують кероване перетворення вихідного стану конструкцій у заданий цільовий стан.

У процесі вибору КТР та ОТР виникає об'єктивна суперечність між вимогами експлуатаційної надійності, ефективності, економічності та мінімізації впливу на довкілля. Для її формалізованого розв'язання у роботі застосовується методика CRIST (розділ 5.1), яка дозволяє враховувати взаємний вплив і пріоритетність зазначених критеріїв. Зокрема, підвищення надійності конструкцій, як правило, супроводжується зростанням матеріаломісткості, тоді як економічні та екологічні вимоги орієнтовані на її зниження. Саме ця суперечність визначає методологічну основу подальшого розвитку наукової концепції КТС.

Сучасні умови реконструкції каркасних будівель характеризуються зростанням вимог до надійності, довговічності, екологічності та керованості технологічних процесів, що зумовлює необхідність удосконалення існуючих і пошуку нових КТР. У цьому контексті підсилення конструкцій доцільно розглядати не як окрему технологічну операцію, а як складний системний процес, що потребує формалізації та структуризації.

З методологічної точки зору процес підсилення конструкцій доцільно розглядати як ієрархічну систему взаємопов'язаних рівнів. Нульовий рівень цієї системи представлено універсальною множиною M_N , що репрезентує узагальнену технологічну модель підсилення каркасу будівлі. Даний рівень інтегрує всі можливі комбінації КТР і ОТР та слугує теоретичною основою для подальшої формалізації КТС.

Паралельно з ієрархічним моделюванням процесу підсилення актуалізується потреба у перегляді підходів до класифікації методів підсилення каркасних будівель. Традиційна класифікація, що ґрунтується переважно на типі конструктивного елемента (балки, ферми, колони тощо), не відображає реальної технологічної сутності процесів підсилення та послідовності їх виконання. Зокрема, технологічно ідентичні методи, такі як підсилення сталевими

затяжками, у традиційній класифікації відносяться до різних груп залежно від типу елемента (ферма або підкранова балка), попри однакову технологічну послідовність робіт: улаштування анкерних вузлів, монтаж затяжок, регулювання зусиль та контроль напружено-деформованого стану. У результаті одна і та сама технологія розглядається як різні рішення, що зумовлює фрагментарність опису та ускладнює системний аналіз і порівняння варіантів підсилення.

Фрагментарність конструктивної класифікації ускладнює системний аналіз і порівняння варіантів підсилення, що суперечить вимогам інтегрованого проєктування та цифрової підтримки прийняття рішень. У зв'язку з цим у роботі запропоновано альтернативний підхід до класифікації методів підсилення, заснований виключно на технологічних ознаках, що забезпечує узгодженість з ієрархічною структурою КТС та можливість формалізованого вибору рішень.

У межах цього підходу метод підсилення розглядається як багаторівнева логіко-структурна система [157]. На першому рівні визначається повна множина можливих моделей (M_{KT}) та відповідних моделей (M_{OT}). На наступних рівнях здійснюється деталізація внутрішньої структури кожної моделі з урахуванням технологічних, організаційних та ресурсних особливостей.

Побудова логічних матриць взаємозв'язків між моделями M_{KT} і M_{OT} використовується як інструмент раціонального вибору технології підсилення. Такий підхід дозволяє одночасно враховувати технічні, економічні, екологічні, експлуатаційні та соціальні критерії, що створює передумови для формування уніфікованої та адаптивної нормативно-методичної бази.

Ієрархічна структура запропонованої моделі забезпечує можливість поетапного аналізу процесу підсилення з позицій трудомісткості, що є ключовим для обґрунтування нормативів витрат праці та ресурсів.

На першому рівні моделі виділяються дві базові компоненти: M_{KT_i} — множина всіх можливих моделей конструктивно-технологічного рішення; M_{OT_j} — множина всіх можливих моделей організаційно-технологічних рішень.

На другому рівні моделі деталізується внутрішня структура підмножин M_{KTi} та M_{OTj} , що дозволяє встановлювати логічні зв'язки між технологічними варіантами та формувати основу для їх подальшої формалізації.

У загальному вигляді структура універсальної множини M_N може бути представлена у формалізованому вигляді наступним співвідношенням:

$$M_N = M_{KTi} \times M_{OTj} = \left(\bigcup_i M_{KTi} \cup \bigcup_{l < i} M_{KTil} \right) \times \left(\bigcup_j M_{OTj} \cup \bigcup_{m < j} M_{OTjm} \right) \quad (7.1)$$

де M_{KTi} – базові конструктивно-технологічні моделі; M_{KTil} – комбіновані конструктивно-технологічні моделі (всі унікальні парні комбінації без повторів); M_{OTj} – базові організаційно-технологічні моделі; M_{OTjm} – комбіновані організаційно-технологічні моделі.

Наведена формула відображає технологічну модель підсилення каркасу будівлі зі структурою до другого рівня включно. Аналіз цієї структури засвідчив наявність логічних залежностей між елементами множин M_{KTi} та M_{OTj} , що свідчить про взаємозв'язок між конструктивно-технологічним моделями та організаційно-технологічним моделями. Для виявлення цих зв'язків виникла потреба в розширенні моделі до третього рівня.

Особливістю є те, що третій рівень структури характерний як для окремих моделей множин M_{OTj} , так і для окремих моделей M_{KTi} . На цьому рівні відбувається деталізація кожної базової або комбінованої моделі шляхом розкриття її складових елементів, технологічних етапів та взаємозв'язків між ними. Такий підхід дозволяє не лише глибше аналізувати трудомісткість і ресурсомісткість процесів, але й створювати алгоритми раціонального вибору рішень залежно від конкретних умов реалізації проекту.

У зв'язку з цим на третьому рівні моделі виникає потреба в застосуванні багатокритеріального прийняття рішень. У процесі проектування і будівництва

інженерно-технічні, організаційно-технологічні або господарські рішення приймаються в умовах багатоваріантності. Наприклад, один і той самий каркас будівлі або споруди можна підсилити, застосовуючи різні КТР (розділ 5.5), зокрема різні конструктивно-компонувальні або об'ємно-планувальні схеми, використовуючи різні матеріали підсилення і технології, а також застосовуючи різні методи виконання робіт із використанням різних засобів механізації. Таким чином, можливий вибір різних моделей ОТР.

Виникає завдання: із множини варіантів вибрати технічно можливий, ефективний з точки зору організації робіт та економічно доцільний (раціональний) варіант, при цьому враховуючи технічне завдання замовника, обраний критерій підходу T_x до реконструкції та чинник пріоритетів P_i .

Багатокритеріальне прийняття рішень з метою забезпечення якості та підвищення ефективності реконструкції пропонується вести за допомогою ієрархічної структури в методі аналітичного ієрархічного процесу АІП (analytic hierarch process, АНР), представленої на рис.7.2.

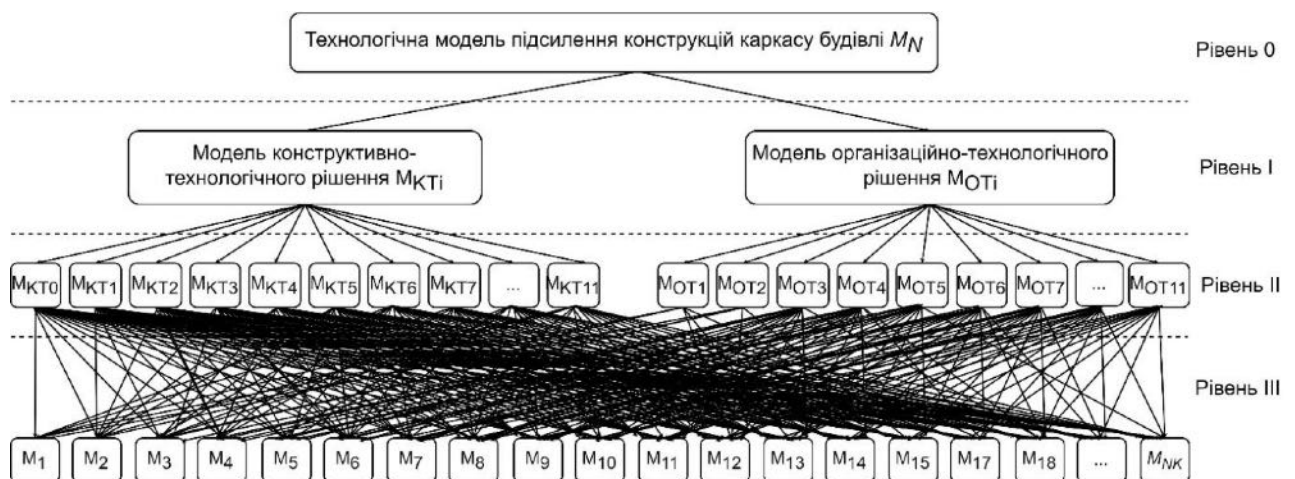


Рис. 7.2. Ієрархічна модель формування альтернативних моделей підсилення

Для багатокритеріального оцінювання та вибору раціональних альтернатив у роботі використано метод аналітичного ієрархічного процесу АНР (Analytic Hierarchy Process). Порівняння критеріїв та альтернатив здійснюється з використанням матриць попарного порівняння. Кожна матриця повинна бути

взаємно оберненою та позитивною, тобто її елементи повинні відповідати співвідношенню: $a_{ji} = 1/a_{ij}$.

Виходячи з наявності кількості моделей M_{KTi} та M_{OTj} , запишемо матрицю існуючих моделей M_N :

$$M_N = \begin{bmatrix} M_{1,1}, M_{1,2} \dots M_{1,11} \\ M_{2,1}, M_{2,2} \dots M_{2,11} \\ \dots \\ M_{13,1}, M_{13,2}, \dots M_{13,11} \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

Операції, що виникають внаслідок логічного зв'язку між множинами M_{KTi} і M_{OTj} , описуються логічною матрицею відношення. Для наочності побудуємо відповідну матрицю рішень, представлену у таблиці 7.1.

Таблиця 7.1

Матриця рішень для моделей технологічних рішень.

M_{OTj} M_{KTi}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,10	0,11
1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	1,10	1,11
2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	2,10	2,11
3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	3,10	3,11
4	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	4,10	4,11
5	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	5,10	5,11
6	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	6,10	6,11
7	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9	7,10	7,11
8	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8	8,9	8,10	8,11
9	9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9	9,10	9,11
10	10,1	10,2	10,3	10,4	10,5	10,6	10,7	10,8	10,9	10,10	10,11
11	11,1	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	11,10	11,11
12	12,1	12,2	12,3	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8	12,9	12,10	12,11

У даній матриці розглядаються:

- для першого критерію (конструктивно-технологічні рішення, M_{KT_i}) — 13 варіантів рішень;
- для другого критерію (організаційно-технологічні рішення, M_{OTj}) — 11 варіантів рішень.

Загальна кількість потенційних комбінацій становить 143 (13×11), однак важливо врахувати, що для одного КТР може бути прийнято кілька ОТР. Іншими словами, зв'язок між множинами є не функціональним, а відношенням багатов до багатьох, залежно від умов будівництва, наявності ресурсів, організаційних можливостей або обраної стратегії виконання робіт.

Рациональний варіант зазвичай вибирається шляхом порівняння техніко-економічних показників розглянутих варіантів, зіставлення показників нового проєкту з еталоном або побудованим спорудою. Приймається рішення, яке за умови нормативно достатніх надійності і безпеки вимагає менших витрат для свого здійснення або більше відповідає принципам сталості.

Для побудови цієї матриці використано логічну змінну, що фіксує наявність або відсутність відповідності між конкретними варіантами M_{KT_i} та M_{OTj} :

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{коли } (d_i, p_j) \in R, \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (7.3)$$

Для проєктувальників такі зв'язки мають принципове значення, оскільки дозволяють здійснювати цілеспрямований вибір методів підсилення конструкцій та організацію виконання робіт, з урахуванням конкретних технологічних умов і обмежень будівельного об'єкта.

На першому етапі використання логічної матриці доцільно впорядкувати:

- елементи множини M_{KT_i} — вертикально, згори донизу,
- елементи множини M_{OTj} горизонтально — зліва направо.

Це забезпечує структуроване відображення усіх можливих варіантів взаємодії між моделями та полегшує процес пошуку відповідностей.

Надалі вибір оптимального методу підсилення має базуватися на результатах техніко-економічної оцінки альтернативних рішень, що враховує: технічні характеристики конструкцій, витрати на реалізацію підсилення, часові обмеження виконання робіт, доступність матеріально-технічних ресурсів, а також потенційні ризики та умови експлуатації об'єкта після підсилення.

Запропонована логічна матриця виступає інструментом попереднього відбору до стадії багатокритеріального аналізу, що дозволяє значно підвищити обґрунтованість прийнятих проєктних рішень, а також узагальнює результати моделювання технологічних схем організації та механізації процесів монтажу елементів підсилення та формує системну основу для їх практичного впровадження в процес нормування трудових витрат і часу.

Наукова концепція дисертаційної роботи полягає у представленні процесу підсилення каркасних будівель під час реконструкції як цілісної конструктивно-технологічної системи забезпечення якості, в якій вибір рішень здійснюється не за типом конструктивного елемента, а на основі формалізованих причинно-наслідкових зв'язків між станом конструкцій, критеріями якості та моделями реалізації технологічного процесу.

У межах запропонованої концепції підсилення каркасу розглядається як ієрархічна система перетворень, що починається з причин ініціювання робіт та оцінки фактичного стану елементів і завершується формуванням підсиленого каркасу як результату взаємодії моделей M_{KT_i} та M_{OT_j} . Ключовою особливістю концепції є інтеграція критеріїв ефективності, експлуатаційної надійності та сталості у процес прийняття рішень на всіх рівнях системи.

На відміну від існуючих підходів, у яких методи підсилення подаються у вигляді переліків або локальних технічних рішень, у даній роботі вперше запропоновано технологічно орієнтовану класифікацію методів підсилення, що дозволяє:

- уніфікувати різні конструктивні рішення за їх технологічною сутністю;

- забезпечити логічну узгодженість між вибором МКТ та відповідних МОТ;
- реалізувати багатокритеріальний вибір рішень з урахуванням технічних, економічних, екологічних та експлуатаційних обмежень.
- включення роботизованих та цифрових технологій (BIM, Digital Twin, Lean, ANN, SHM) як повноцінних елементів КТС, а не як допоміжних засобів виконання окремих операцій.

Наукова методика полягає у комплексному підході до оцінки та вибору оптимальних КТР і ОТР, реалізованому у вигляді формалізованого алгоритму, що охоплює весь життєвий цикл процесу реконструкції каркасної будівлі.

1. Ініціація та діагностика стану каркасу. Комплексний процес реконструкції розпочинається з оцінки фактичного стану каркасу будівлі, який декомпонується на окремі конструктивні елементи. На цьому етапі здійснюється аналіз факторів, що впливають на строк експлуатації будівлі, зокрема внутрішніх чинників C_i , зовнішніх впливів E_i , умов експлуатації I_i , характеристик середовища формування КТР Ω_{KTR} . Крім того, визначаються атрибути елемента каркасу $e \in E$. На основі результатів обстежень, виявлених дефектів і пошкоджень D_i , нормативних вимог Y_x та вимог замовника Z_x , зокрема щодо необхідної тривалості життєвого циклу J , визначається основна причина ініціювання робіт V_j . Саме вона слугує вихідним імпульсом для подальшого формування стратегічного підходу та вибору моделей КТР та ОТР.

2. Вибір підходу до реконструкції є принциповим етапом функціонування КТС, оскільки саме він визначає стратегічну орієнтацію подальшого вибору к КТР і ОТР. Критерій підходу T_x безпосередньо залежить від причин ініціювання робіт V_j та формує допустимий простір альтернатив у межах КТС.

Залежно від домінуючої мети реконструкції — економічної ефективності, продовження ресурсу будівлі, забезпечення вимог користувачів або досягнення показників сталого розвитку — вибирається відповідний підхід до реконструкції. Кожен із підходів орієнтований на різні етапи життєвого циклу будівлі та передбачає пріоритетний облік певних факторів, зокрема енерго- та

водоспоживання, якості внутрішнього середовища, екологічних впливів, логістики, матеріалів, утворення відходів і процесів управління.

У межах даного дослідження критерій T_x використовується не як критерій оцінювання якості альтернатив, а як інструмент стратегічної фільтрації та вагового налаштування критеріїв якості R_i , N_i та A_i . Це дозволяє адаптувати процес багатокритеріального вибору моделей M_{KT_i} і M_{OT_i} до конкретних цілей реконструкції.

3. Формування альтернатив КТР включає вибір можливих методів відновлення каркасу, до яких належать: традиційні методи підсилення (M_{KT1} – M_{KT6} , M_{KT8} – M_{KT11}), підсилення фіброармованими системами (M_{KT7}) або ліквідація (L) і повна заміна елементу каркасу (Q). Водночас проводиться розгляд чинників (C_i), (E_i), (I_i), (L) та (Q), як сукупності функцій, що дозволяє прогнозувати поведінку елементів каркасу (K_i) у довгостроковій перспективі та оцінювати вартість життєвого циклу $X_{жц}$ та тривалість життєвого циклу J , складність технічного обслуговування O_{tex} та споживання ресурсів S .

4. Багатокритеріальний аналіз і вибір моделей КТР та ОТР. На основі зібраних даних виконується багатофакторний аналіз моделей КТР (M_{KT_i}) та ОТР (M_{OT_i}) з використанням апарату Artificial Neural Network (ANN). Оцінка альтернатив здійснюється за системою визначальних критеріїв якості (по кількісним та якісним показникам), до яких належать:

- критерій ефективності (R_i), що включає ефективність експлуатації (RE_s), ефективність технологічного процесу (RT_c), ефективність капітальних інвестицій (RK_s),
- критерій експлуатаційної надійності (N_i)
- критерій сталості реконструкції (A_m).

Додатково враховуються фактори ризику F_s та критерій підходу T_x , що дозволяє визначити найдоцільнішу модель технологічних рішень. Фактори ризику F_i , зокрема пов'язані з недосконалим застосуванням металевих елементів, FRP-систем та з'єднувальних виробів (F^M , F^F , F^B), визначають граничні умови

надійності, довговічності та технологічної доцільності підсилення. Їх вплив у межах наукової концепції реалізується через обмеження множини допустимих моделей та коригування вагових коефіцієнтів критеріїв ефективності R_i , експлуатаційної надійності N_i та сталості A_m . Зазначені множини не є альтернативними критеріями якості, а виконують роль вхідних обмежень та коригувальних параметрів, що впливають на допустимість, пріоритетність і ефективність застосування M_{KTi} і M_{OTj} , моделей.

5. Оптимізація та перевірка прийнятих рішень. Після визначення ключових показників якості виконується:

Після визначення ключових показників якості виконується:

- встановлення пріоритетів P_i (розд. 3.6);
- багатофакторна оптимізація прийнятих рішень;
- перевірка відповідності обраної моделі M_{KTi} критеріям ефективності, надійності та сталості.

У разі невідповідності розглядаються альтернативні варіанти КТР або рішення щодо демонтажу та редевелопменту. Аналогічна процедура застосовується до моделей M_{OTi} . У разі відповідності обраної моделі, спочатку пропонується перевіряти альтернативні методи підсилення фіброармованими системами (M_{KT7}) (МПЗА), критеріям ефективності, надійності та сталості, далі вона переходить до наступного етапу дослідження організаційно-технологічних рішень. Якщо ж модель не відповідає критеріям, розглядаються відповідні традиційні варіанти ($M_{KT1}-M_{KT6}$, $M_{KT8}-M_{KT11}$), а також демонтаж та редевелопмент. Подібним чином перевіряється ефективність моделей M_{OTi} , і якщо знайдене рішення є прийнятним, воно впроваджується в реальний проєкт та імплементується.

6. Формалізація системи та алгоритмічна структура. Для формалізованого опису процесу прийняття рішень у межах конструктивно-технологічної системи кожен з ключових критеріїв якості подається у вигляді множини часткових функцій оцінювання:

$$R_i = \{r_{ij}\}, N_i = \{n_{ij}\}, A_m = \{a_{ij}\}, \quad (7.4)$$

де r_{ij} , n_{ij} , a_{ij} — відповідно часткові функції оцінювання відповідно ефективності, експлуатаційної надійності та сталості альтернативних M_{KT_i} і M_{OT_j} .

Між критеріями R_i , N_i , A_i та множинами моделей M_{KT_i} , M_{OT_j} існує система відношень

$$Z_i = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}, \quad (7.5)$$

яка описує сукупність функціональних моделей M_{ij} та допустимих комбінацій їх застосування. Структура моделей і варіанти їх компоновки визначаються множиною чинників:

$$X_i = \{x_{ij}\} = \{C_i, E_i, I_i, T_x\}. \quad (7.6)$$

Взаємозв'язки між зазначеними множинами формують простір можливих та допустимих комбінацій рішень M_{KT_i} і M_{OT_j} у межах КТС та формалізуються у вигляді функціонального відношення:

$$Z_i = f(R_i, N_i, A_m, F_s, T_x) \quad (7.7)$$

або

$$\{M_{KT_i}, M_{OT_i}\}_{opt} = \arg \max Z_i(R_i, N_i, A_m, F_s, P_i, T_x) \quad (7.8)$$

Отже ланцюг КТС:

$$V_j \Rightarrow T_x \Rightarrow \{R_i, N_i, A_i\} \Rightarrow \{M_{KT_i}, M_{OT_i}\} \Rightarrow Z_i \Rightarrow \text{оптимальне рішення}$$

Тобто:

- V_j — чому ініційовано реконструкцію;
- T_x — яким стратегічним шляхом її реалізовувати;

- R_i, N_i, A_i – як оцінювати альтернативи;
- M_{KT} / M_{OT} – чим та як саме виконувати підсилення.

Множина факторів ризику $F_s = \{f_s\}$ характеризує імовірність та наслідки несприятливих технологічних, організаційних, експлуатаційних, екологічних подій, тоді як критерій підходу T_x визначає стратегічну орієнтацію реконструкції (наприклад, мінімальне втручання, адаптивна реконструкція, підсилення з продовженням ресурсу, редевелопмент тощо). Вплив F_s та T_x реалізується шляхом коригування вагових коефіцієнтів критеріїв R_i, N_i, A_m та обмеження допустимої множини моделей M_{KT_i} і M_{OT_j} .

Функціональні моделі M_{ik} можуть застосовуватися як окремо, так і в поєднанні, утворюючи компоновки

$$M_i = \{M_{i1}, M_{i2}, \dots, M_{ij}\}, \quad (7.9)$$

що формують матрицю можливих рішень:

$$(M_1, M_2, M_3, \dots, M_N). \quad (7.10)$$

При цьому одна і та сама функція може реалізовуватися різними структурними моделями та способами їх застосування, що формує множину альтернативних КТР і ОТР та їх допустимих поєднань у межах КТС. Запропонована формалізація забезпечує комплексний облік факторів, що впливають на:

- підвищення експлуатаційної надійності каркасу будівлі (N_i);
- ефективність процесів реконструкції (R_i), зокрема трудомісткість і тривалість робіт, вартість будівельно-монтажних процесів, співвідношення CAPEX/OPEX;
- мінімізацію втрат трудових, матеріальних та енергетичних ресурсів;
- підвищення продуктивності праці та ефективності організаційно-технологічних потоків;

- досягнення критеріїв сталості з урахуванням екологічних, соціальних і управлінських аспектів протягом життєвого циклу реконструкції.

Методологічно процес прийняття рішень у межах КТС реалізується у вигляді ієрархічної системи трьох взаємопов'язаних рівнів. На стратегічному рівні на основі причин ініціювання робіт V_j формується критерій підходу до реконструкції T_x (розд. 3.6), який визначає загальну орієнтацію та обмеження процесу прийняття рішень. На тактичному рівні здійснюється багатокритеріальне оцінювання альтернатив за критеріями ефективності R_i , експлуатаційної надійності N_i та сталості A_i з урахуванням заданого підходу. На операційному рівні виконується вибір конкретних моделей конструктивно-технологічних (МКТ) та організаційно-технологічних (МОТ) рішень, що забезпечують реалізацію обраної стратегії з досягненням заданих показників якості. Алгоритмічна структура системи подана у вигляді блок-схеми комплексного процесу (рис. 7.3), що відображає логіку взаємодії факторів, критеріїв і моделей у межах КТС.

Запропонована КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції формує цілісну наукову концепцію, у межах якої вибір рішень інтерпретується як багатокритеріальна задача з урахуванням технічних, організаційних, ресурсних, часових, екологічних та експлуатаційних обмежень. КТС забезпечує узгодження критеріїв ефективності, експлуатаційної надійності та сталості реконструкції на основі формалізованого аналізу альтернативних конструктивно-технологічних і організаційно-технологічних рішень.

Реалізація концепції передбачає використання інформаційно-аналітичної підсистеми КТС, реалізованої на основі ВІМ у поєднанні з принципами ощадливої організації процесів та інтелектуальними методами обробки даних (див. п. 6.4).

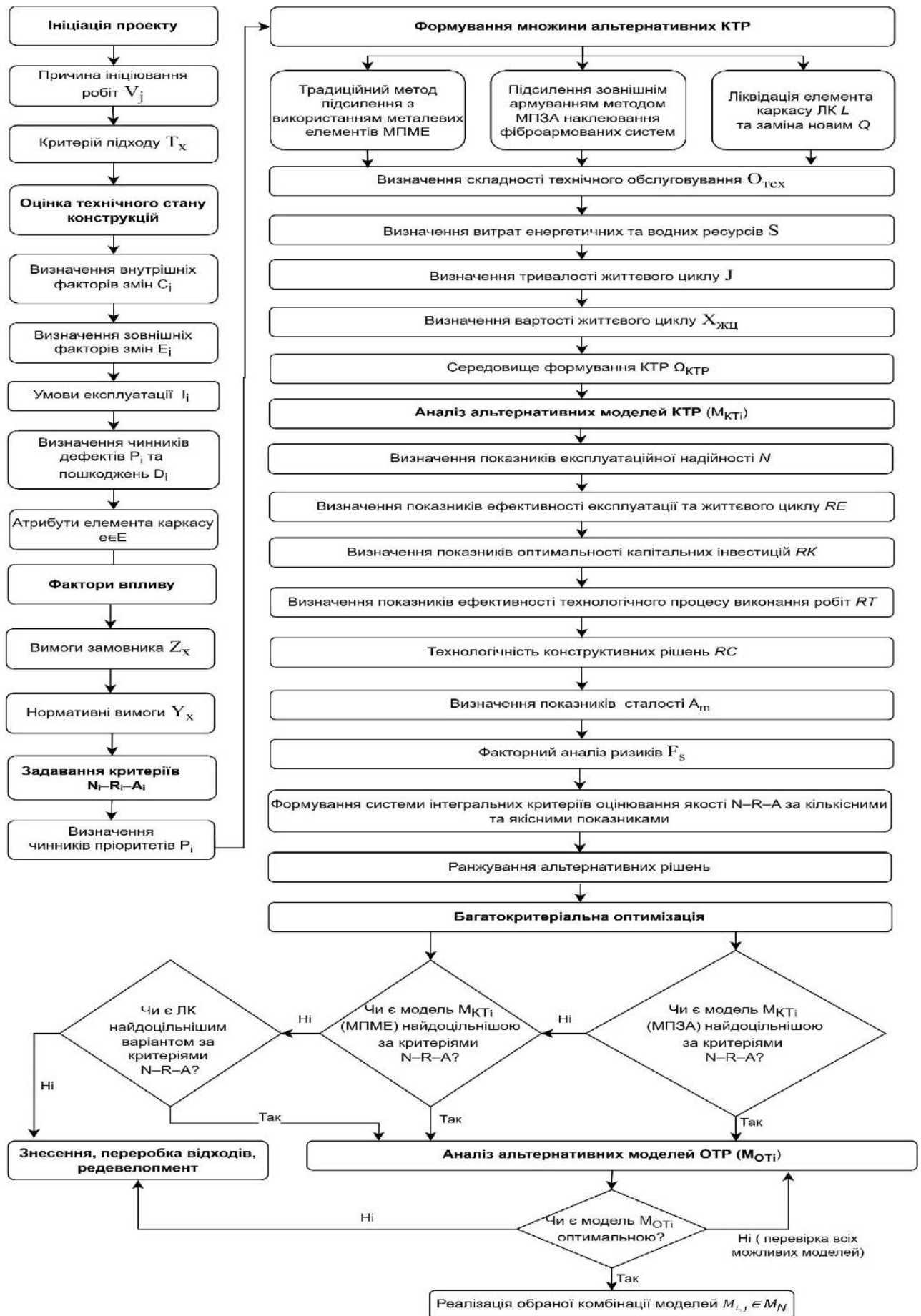


Рис. 7.3. Алгоритмічна структура формування й відбору КТР для забезпечення якості підсилення каркасних будівель

7.2. Модифікація конструктивно-технологічної системи забезпечення якості підсилення каркасних будівель з застосуванням BIM та Lean-технологій для досягнення сталого розвитку

Сформована у попередньому розділі КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель є відкритою ієрархічною системою, що допускає цільову модифікацію залежно від прийнятої стратегії реконструкції, умов реалізації проєкту та домінуючих критеріїв якості. Одним із ключових напрямів такої модифікації є інтеграція цифрових та процесно-орієнтованих підходів, зокрема BIM та принципів ощадливої організації процесів (розділ 6.4.2), як інструментів підвищення ефективності, керованості та сталості технологічних процесів.

На відміну від традиційного застосування BIM і Lean як окремих допоміжних інструментів управління проєктом або оптимізації будівельних процесів, у межах даного дослідження вони розглядаються як структурні компоненти КТС, що впливають на формування, оцінювання та вибір моделей (М_{КТ}) і (М_{от}).

Lean-підхід у КТС використовується для формалізації та оптимізації потоків виконання технологічних операцій підсилення [271], які в умовах реконструкції характеризуються фрагментарністю, обмеженою доступністю фронту робіт і високою варіативністю умов. Потік процесів у цьому контексті розглядається як узгоджений рух матеріалів, інформації, виконавців та обладнання крізь технологічну систему, що дозволяє мінімізувати непродуктивні втрати, простої та зайві переміщення [223].

Ключовим принципом Lean-модифікації КТС є концепція «витягування», відповідно до якої попередні технологічні операції розглядаються як постачальники для наступних. Це дозволяє пріоритизувати використання спільних ресурсів на користь операцій, що знаходяться ближче до завершення технологічного циклу, зменшуючи ризик локальних затримок і порушення ритму робіт [254].

Особливе значення у КТС має застосування принципів Рока-Йоке, які інтегруються в етапи проєктування та організації робіт і спрямовані на

попередження технологічних помилок. З урахуванням того, що частка витрат на переробки у будівельних проєктах може досягати близько 5 % від контрактної вартості, раннє виявлення потенційних помилок стає критично важливим фактором забезпечення якості підсилення. Принципи захисту від помилок (Рока-Уокер), систематизовані в підрозділі 6.4.2, інтегровані в модифіковану конструктивно-технологічну систему як інструмент попередження технологічних дефектів на етапах проєктування, організації та виконання робіт. Їх застосування дозволяє знизити ймовірність переробок, підвищити стабільність якості та керованість технологічних процесів у межах КТС. Модифікована КТС передбачає використання імітаційного моделювання технологічних процесів підсилення з метою аналізу трудомісткості, тривалості операцій і вартості реалізації різних моделей МКТ. Процес підсилення розглядається як циклічний, що дозволяє багаторазово відтворювати окремі операції, аналізувати їх часові параметри та статистичні характеристики, а також ідентифікувати «вузькі місця».

Алгоритм моделювання процесів із застосуванням принципів Lean-технологій (рис. 7.4) відображає послідовність уточнення технологічної карти, перевірки адекватності моделі реальним умовам, застосування інструментів скорочення втрат і подальшої оцінки ключових показників якості. Такий підхід дозволяє перейти від інтуїтивного вибору технології до формалізованого аналізу альтернатив. Спостереження за реалізацією аналогічних процесів підсилення та їх аналіз використовуються як інформаційно-аналітична база для виявлення типових помилок, втрат і ризиків, що враховуються при формуванні альтернатив МКТ у межах запропонованої КТС. Алгоритм, наведений на рис. 7.5, є розвитком та системною інтеграцією детального алгоритму формування й відбору КТР (рис. 7.3) шляхом включення Lean-ядра, BIM-орієнтованого середовища та багатокритеріальної оцінки якості (R–N–A).

Цифрова трансформація КТС реалізується через інтеграцію BIM-технологій, які забезпечують єдине інформаційне середовище для оцінки технічного стану каркасу, моделювання варіантів підсилення, аналізу вартості

життєвого циклу та екологічних наслідків. У межах запропонованої системи BIM не обмежується функціями візуалізації, а використовується як інструмент підтримки прийняття рішень, що поєднує дані аудиту будівлі, результати імітаційного моделювання та критерії пріоритетності.

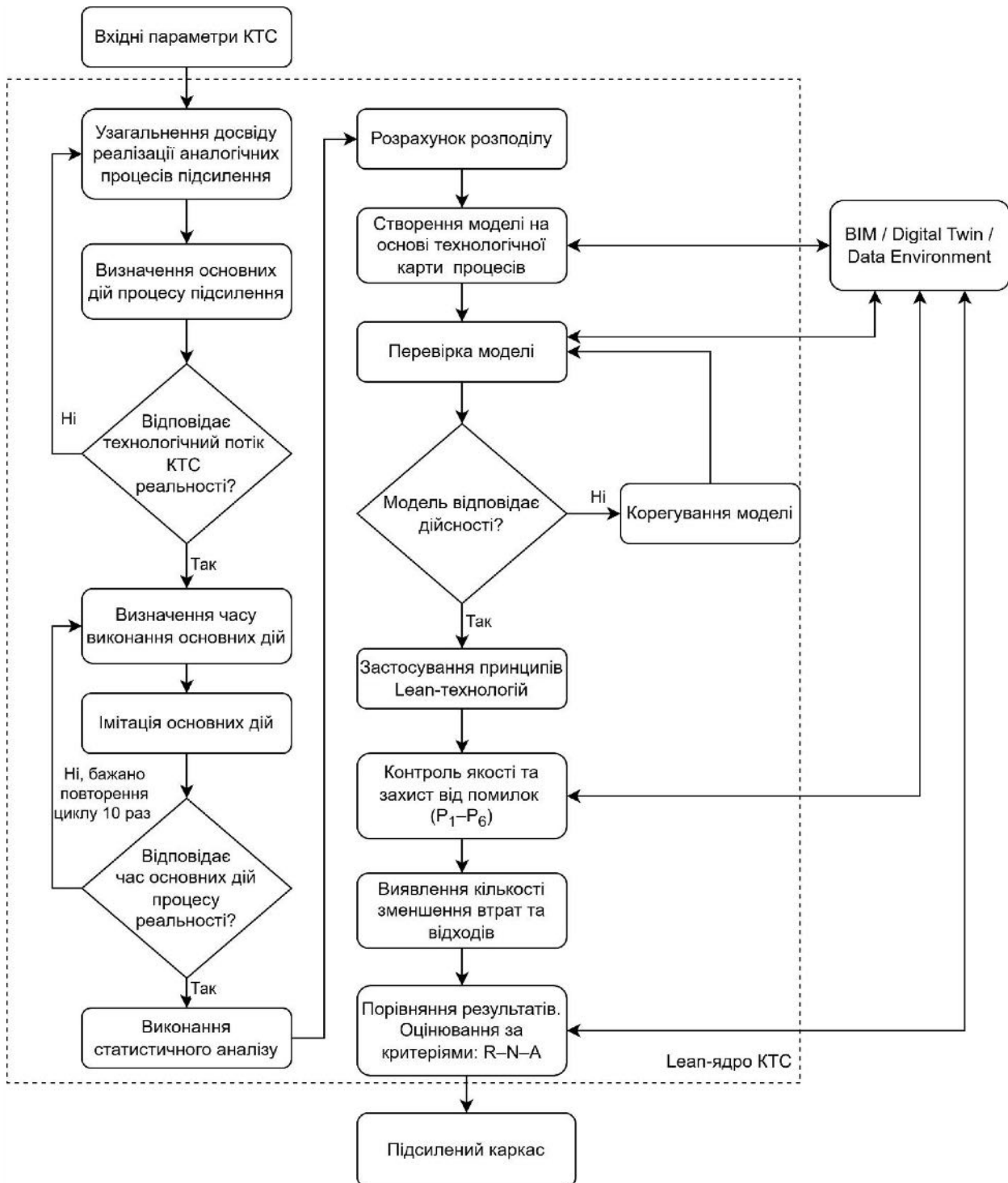


Рис.7.4. А Алгоритм функціонування модифікованої КТС підсилення каркасних будівель із застосуванням BIM та Lean-технологій

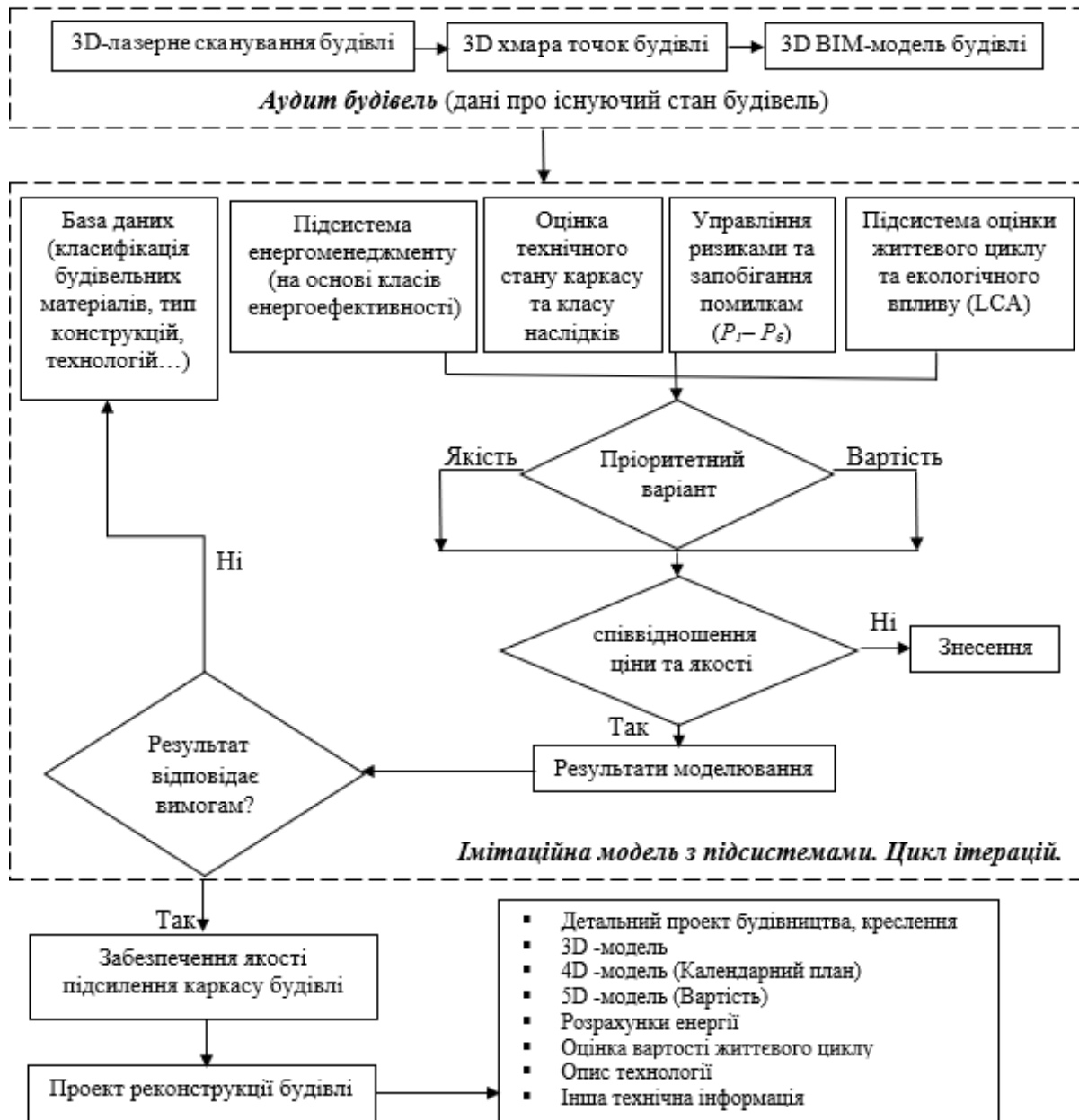


Рис. 7.5. Алгоритм цифровізації моделювання конструктивних і технологічних рішень для підсилення каркасних будівель із застосуванням BIM та Lean-технологій для забезпечення сталого розвитку

Алгоритм цифровізації конструктивних і технологічних рішень (рис. 7.5) відображає поетапну інтеграцію 3D-сканування, BIM-моделей, підсистем оцінки технічного стану, енергоефективності та життєвого циклу з ітераційним уточненням рішень. Така структура дозволяє здійснювати порівняльну багатокритеріальну оцінку альтернатив за критеріями якості, вартості та сталості з подальшим коригуванням моделей MKT і MOT.

Модифікація КТС шляхом інтеграції BIM та Lean-технологій забезпечує:

- формалізацію процесів вибору та оптимізації моделей МКТ і МОТ;
- зменшення технологічних і організаційних ризиків;
- підвищення керованості, прогнозованості та сталості реконструкційних процесів;
- перехід від описового до алгоритмічного підходу у забезпеченні якості підсилення каркасних будівель.

Запропонований підхід створює методологічну основу для подальшої автоматизації прийняття рішень і впровадження концепцій Construction 4.0 у процеси реконструкції.

7.3. Формування та оптимізація організаційно-технологічних рішень з урахуванням принципів сталого розвитку

Сформований алгоритм моделювання процесів із застосуванням принципів Lean-технологій (рис. 7.3) забезпечує методологічну основу для формалізованого вибору КТР підсилення каркасних будівель. Наступним етапом є методичне застосування зазначеного алгоритму для формування та оптимізації ОТР з урахуванням екологічних, ресурсних і соціальних факторів, що визначають сталий характер реконструкції та узгоджуються з життєво-цикловим підходом.

Для забезпечення ефективності технологічного процесу реконструкції каркасних будівель з мінімальним впливом на навколишнє середовище та раціональним використанням ресурсів доцільним є застосування комплексного підходу до формування і оптимізації ОТР, що базується на принципах сталого розвитку, ощадливого виробництва та багатокритеріального оцінювання якості.

Взаємодія між ресурсами, видами діяльності та інформаційними потоками у процесі підсилення каркасу будівлі формалізована у вигляді моделей процесів, наведених у підрозділі 6.1 (рис. 6.2, 6.3), де вони використовуються як базис для

Lean-аналізу, ідентифікації втрат, а також для формування заходів оптимізації КТР з урахуванням критеріїв надійності N_i , ефективності R_i та сталості A_i .

Технологічний процес підсилення починається з доставки матеріалів із місць зберігання та їх перевірки на відповідність проєктним рішенням. Подальші етапи включають підготовку, різання та підгонку елементів. На цих стадіях ключовим є мінімізування матеріальних втрат, що безпосередньо впливає на показники ресурсної ефективності (R_i), екологічної сталості (A_2) та економічної сталості (A_1). Виявлені дефекти усуваються до початку монтажу, що дозволяє знизити ймовірність переробок, скоротити тривалість робіт і підвищити технологічну надійність реалізації КТР (N_6).

Окрему групу заходів становлять рішення, спрямовані на зменшення викидів CO_2 , мінімізацію утворення будівельних відходів та оптимізацію логістичних процесів. Їх реалізація сприяє покращенню екологічних показників сталості (A_2), а також зниженню непрямих витрат життєвого циклу об'єкта.

Усі види діяльності, ідентифіковані в карті процесів, поділяються на дві категорії:

- діяльність, що додає вартість, безпосередньо спрямована на підвищення несучої здатності, довговічності та функціональності підсилених конструкцій;
- діяльність, що не додає вартість, яка забезпечує організацію та підтримку процесу, але не змінює споживчих властивостей кінцевого результату.

Урахування соціальних і культурних аспектів реконструкції є особливо важливим у випадку виконання робіт в експлуатованих будівлях. Використання локально доступних матеріалів і технологій, адаптованих до регіональних умов, сприяє зменшенню транспортних витрат, зниженню викидів CO_2 та підвищенню соціальної сталості (A_3). Залучення місцевих трудових ресурсів та дотримання вимог безпеки забезпечують безперервність функціонування об'єкта і знижують соціальні ризики реконструкції.

Застосування принципів Lean-технологій у процесі формування ОТР забезпечує:

- раціональне використання матеріалів шляхом оптимізації розкрою, повторного використання залишків і впровадження принципів циркулярної економіки;
- підвищення енергетичної ефективності за рахунок використання енергоощадного обладнання та технологій;
- оптимізацію логістики шляхом планування маршрутів, зменшення обсягів транспортування та використання місцевих ресурсів;
- зниження викидів парникових газів і обсягів відходів через повторне використання та рециклінг матеріалів.

Реалізація зазначених заходів відповідає принципам сталого будівництва та сприяє формуванню замкнених матеріальних циклів, що забезпечує узгодженість ОТР із життєво-цикловим підходом [120, 275].

Деталізація видів робіт та їх взаємозв'язків у межах технологічного процесу є необхідною умовою підвищення ефективності реконструкції. Оптимізація процесу підсилення спрямована на формування надійної конструкції з мінімальними витратами ресурсів і часу, продовження життєвого циклу будівлі та зниження ризиків дефектів і переробок шляхом їх раннього виявлення та попередження.

На основі аналізу карт процесів, результатів моделювання технологічних схем організації робіт (розд. 6.1), розрахунково-аналітичних досліджень трудомісткості й тривалості монтажу (розд. 6.2) та собівартості робіт (розд. 6.3), а також ідентифікованих категорій втрат сформовано комплекс заходів оптимізації технологічного процесу підсилення, узагальнений у табл. 7.2. Запропоновані заходи спрямовані на підвищення ефективності реалізації ОТР, зниження витрат ресурсів і часу, а також на покращення інтегральних показників якості за системою критеріїв.

З огляду на те, що можливості впливу на вартість і якість реконструкції є найбільшими на ранніх етапах прийняття рішень, доцільним є застосування формалізованого алгоритму оптимізації ОТР, який дозволяє оцінювати альтернативи до початку реалізації робіт. Це зумовлює необхідність

використання наглядної та інтегрованої системи моделювання, здатної підтримувати ітераційне уточнення рішень.

У межах авторської методики оцінювання якості моделі підсилення каркасних будівель кожна група операцій O_k впливає на відповідні показники надійності (N_i), ефективності (R_i) та сталості (A_i). Узагальнений зв'язок може бути представлений у вигляді функціональної залежності:

$$\{O_1 \dots O_6\} \Rightarrow \{N_i, R_i, A_i\} \Rightarrow Q_M \quad (7.11)$$

де Q_M — інтегральна оцінка якості моделі.

Система забезпечення якості підсилення каркасу будівлі шляхом оптимізації технологічного процесу, сформована на основі вхідних даних алгоритму, наведеного на рис. 7.3, представлена на рис. 7.6. Запропонована система відображає операційну модель оптимізації ОТР підсилення каркасних конструкцій, узгоджену з ієрархією відповідних критеріїв якості.

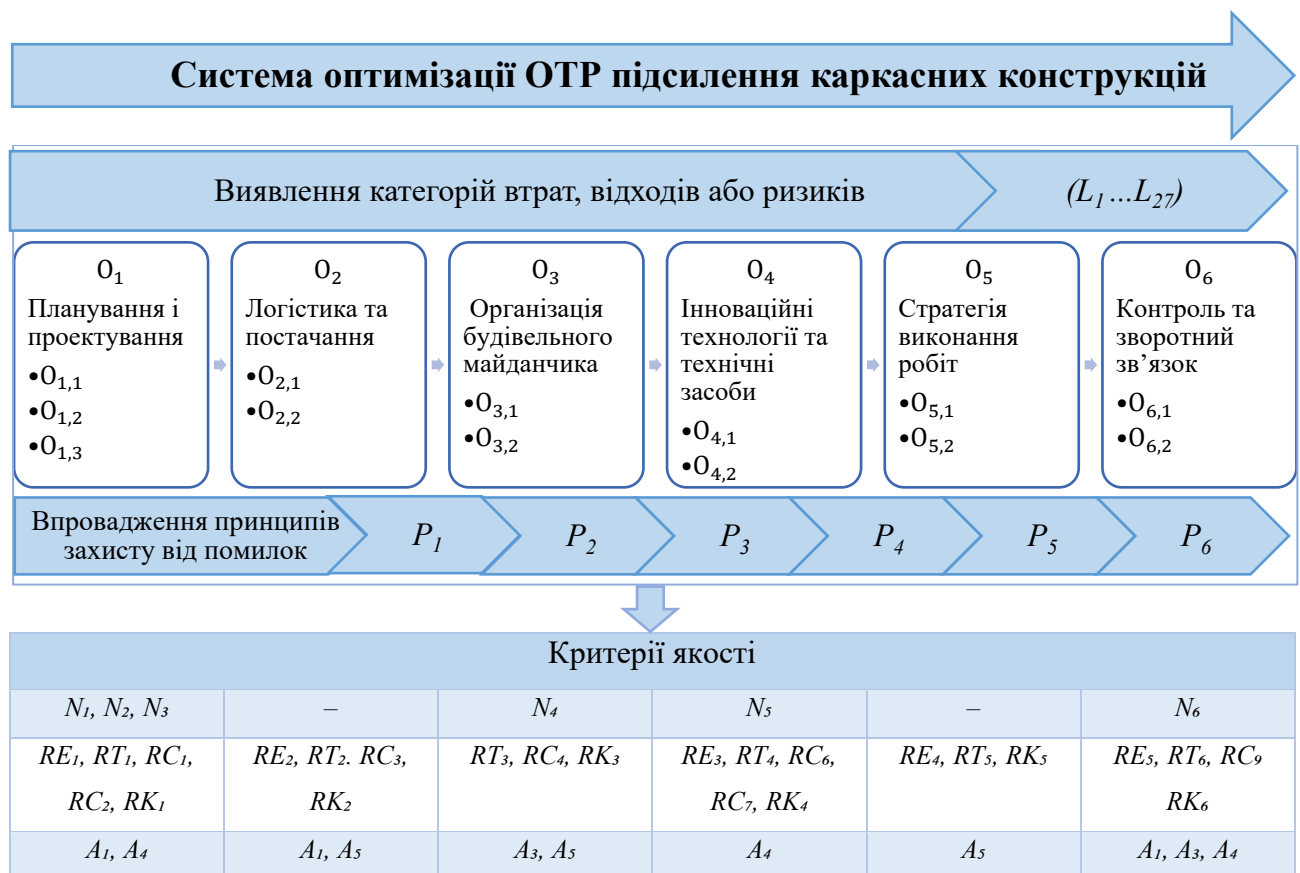


Рис. 7.6. Операційна система оптимізації підсилення каркасних конструкцій у відповідності до критеріїв якості

Операційна модель оптимізації ОТР підсилення каркасних конструкцій

Позн.	Група операцій	Опис операції	Очікуваний результат
O_1	Планування та проєктування		
$O_{1,1}$	Технічне обґрунтування потреб підсилення	Аналіз технічного стану каркасу, виявлення дефектів, визначення зон концентрації напружень	Обґрунтований вибір типу та обсягу підсилення, зниження ризиків помилкових КТР
$O_{1,2}$	Вибір КТР	Порівняння альтернативних КТР з урахуванням умов експлуатації та обмежень реконструкції	Підвищення надійності та технологічної доцільності рішень
$O_{1,3}$	Календарно-ресурсне планування реконструкції	Розроблення графіків виконання робіт, розподіл ресурсів, узгодження МОТ	Мінімізація ризиків затримок та неефективних операцій (RT_i), оптимізація ресурсів
O_2	Логістика та постачання		
$O_{2,1}$	Планування термінів і маршрутів доставки	Узгодження поставок з календарним графіком виконання робіт	Скорочення очікування та непродуктивних витрат
$O_{2,2}$	Вхідний контроль матеріалів і виробів	Перевірка відповідності матеріалів проєктним і нормативним вимогам	Запобігання дефектам, підвищення якості виконання
O_3	Організація будівельного майданчика		
$O_{3,1}$	Організація зон складування	Рациональне розміщення матеріалів з урахуванням черговості використання	Скорочення переміщень і витрат часу
$O_{3,2}$	Організація робочого простору	Формування безпечних і ергономічних робочих зон	Зниження виробничих ризиків, покращення соціальних показників (A_3)
O_4	Інноваційні технології та технічні засоби		
$O_{4,1}$	Застосування модульних і уніфікованих систем	Використання елементів підсилення заводської готовності	Підвищення технологічності КТР, скорочення трудомісткості (RC_6)
$O_{4,2}$	Використання сучасного обладнання та механізації	Застосування спеціалізованих механізмів і автоматизованих засобів	Зменшення трудових витрат і тривалості робіт (RT_3), підвищення безпеки працівників
O_5	Стратегія виконання робіт		
$O_{5,1}$	Формування послідовності виконання операцій	Визначення критично важливих операцій і залежностей між ними	Зменшення ризиків порушення графіка
$O_{5,2}$	Паралелізація процесів	Організація суміщеного виконання окремих робіт	Скорочення загальної тривалості реконструкції
O_6	Контроль та зворотний зв'язок		
$O_{6,1}$	Оперативний контроль якості	Контроль відповідності виконаних робіт проєктним рішенням	Запобігання дефектам і відхиленням, зниження витрат на переробку помилок
$O_{6,2}$	Аналіз результатів і коригування рішень	Оцінювання фактичних показників та коригування КТР і ОТР	Підвищення відповідності критеріям $N_i-R_i-A_i$

*  - діяльність, що додає вартості,  - діяльність, що не додає вартості

Модель забезпечує логічний перехід від вибору КТР і ОТР до контролю умов їх реалізації та формування зворотного зв'язку в межах життєвого циклу реконструкції. У межах системи поєднано результати структурно-функціонального аналізу технологічних операцій, моделювання процесів транспортування обладнання і матеріалів та виконання робіт з підсилення, а також ідентифіковані категорії втрат і ризиків та відповідні заходи оптимізації.

Встановлення відповідності між групами операційної оптимізації (O_1 – O_6) та критеріями якості моделі (N_i , R_i , A_i) дозволяє формалізувати процедуру прийняття рішень, забезпечити узгодженість локальних оптимізаційних заходів із загальною системою оцінювання якості та підвищити обґрунтованість вибору ОТР з позицій сталого розвитку.

7.4. Результати апробації системи підвищення якості підсилення каркасних будівель

Для перевірки ефективності запропонованої системи забезпечення якості КТР підсилення каркасних будівель було проведено апробацію в умовах, наближених до реальної практики реконструкції, у межах виконання робіт з технічного обстеження, проектування та реконструкції об'єктів цивільного і промислового призначення. Апробація ґрунтувалась на порівняльному аналізі чотирьох технологічних моделей (M_{KT1} – M_{KT4}), які відрізняються рівнем організаційно-технологічної оптимізації, застосованими КТР для підсилення каркасної конструкції та ступенем урахування принципів Lean-підходу:

1. Перша модель $M_1(M_{KT1}, M_{OT2.1})$ – відображає традиційний технологічний процес підсилення металевого каркасу будівлі без інтеграції Lean-підходів та системного управління якістю.

2. Друга модель $M_2(M_{KT1}, M_{OT2.2}, M_{OT2.3}, M_{OT2.5})$ – є оптимізованою версією традиційного процесу, що передбачає впровадження Lean-технологій для мінімізації втрат часу, ресурсів і непродуктивних операцій у процесах підсилення.

3. Третя модель $M_3(M_{KT1}; M_{OT2.2}, M_{OT2.3}, M_{OT2.4}, M_{OT2.5})$ – є оптимізованою версією другої, що включає комплексне управління якістю робіт, враховуючи життєвий цикл каркасу будівлі та його економічну доцільність.

4. Четверта модель $M_4(M_{KT7}; M_{OT2.2}, M_{OT2.3}, M_{OT2.4}, M_{OT2.5})$ – передбачає застосування FRP-систем як альтернативного методу підсилення, інтегрованого з Lean-підходом, процедурами управління якістю та ризик-орієнтованим управлінням процесами реконструкції.

Для кожної моделі було проведено по десять імітаційних прогонів з метою отримання статистично обґрунтованих показників тривалості робіт, трудомісткості, використання ресурсів і потенційних втрат.

Базовою для порівняння прийнято традиційну модель виконання робіт з підсилення каркасу (M_{KT1}), у якій процес організовано за звичайною послідовною логікою виконання операцій без формалізованого управління потоками ресурсів і інформації і представляє собою наступну функцію:

$$M_1 = \{Y_1 \dots Y_{29}; M_{KT1}; M_{OT2.1}\} \quad (7.12)$$

Структура технологічного процесу цієї моделі представлена у вигляді мережевої схеми (рис. 7.7), яка відображає взаємозв'язок окремих видів робіт, їх тривалість та черговість виконання. Загальна середня трудомісткість процесу для моделі M_1 складає:

$$\theta_{M2} = 0.01667 \cdot \sum \theta_{md} = 65,68 \text{ люд.-год.}$$

Подальший розвиток моделі передбачає включення елементів Lean-оптимізації, зокрема усунення втрат часу, зменшення кількості зайвих переміщень матеріалів і обладнання, а також підвищення прозорості інформаційних потоків. Удосконалені моделі (M_{KT2} та M_{KT3}) характеризуються застосуванням принципів витягувального планування (pull-логіки), підвищеним рівнем координації між виконавцями та впровадженням процедур попереднього контролю якості виконання операцій.

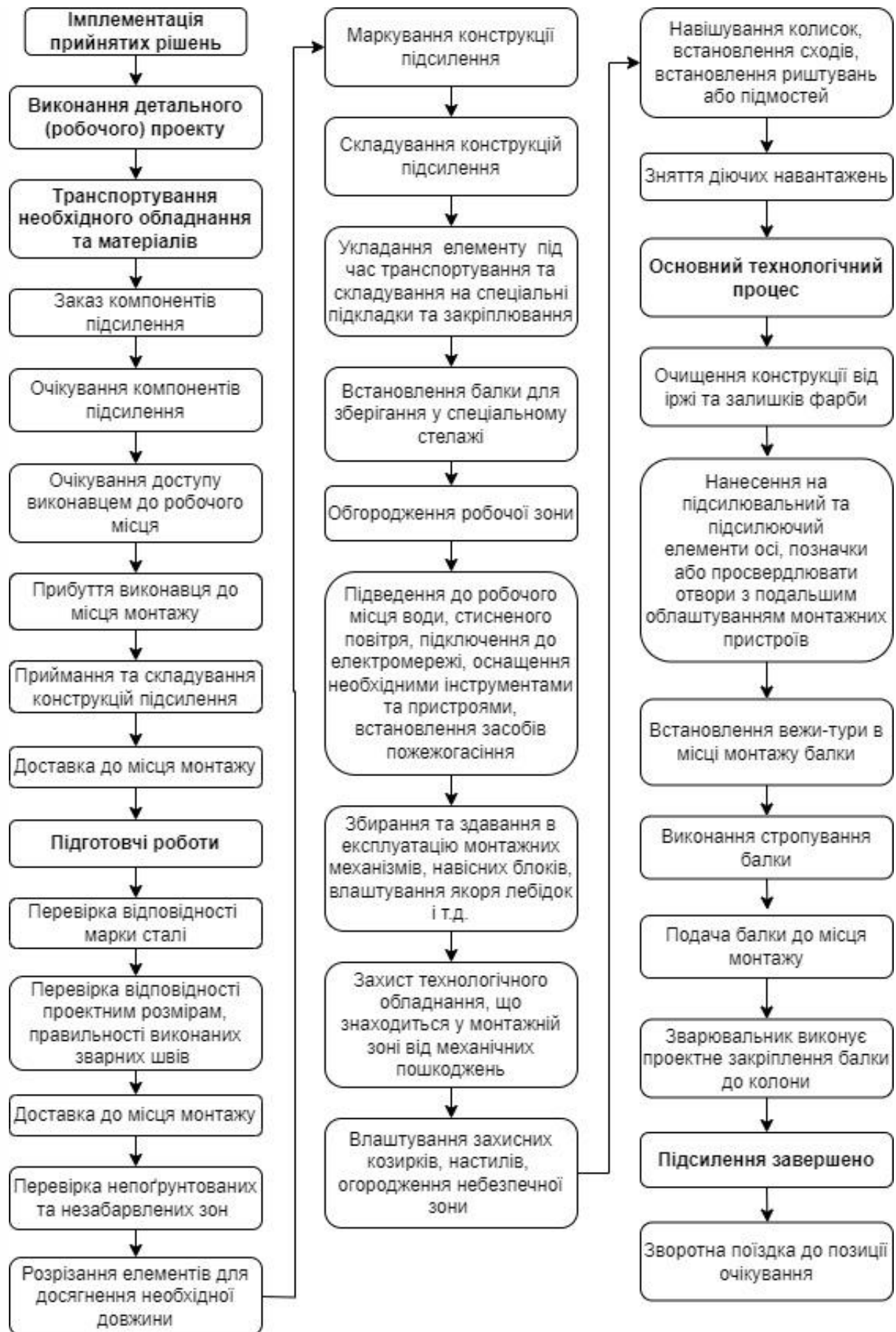


Рис. 7.7. Модель структури реалізації технологічного процесу для моделей

$$M_1(M_{kti}, M_{oti})$$

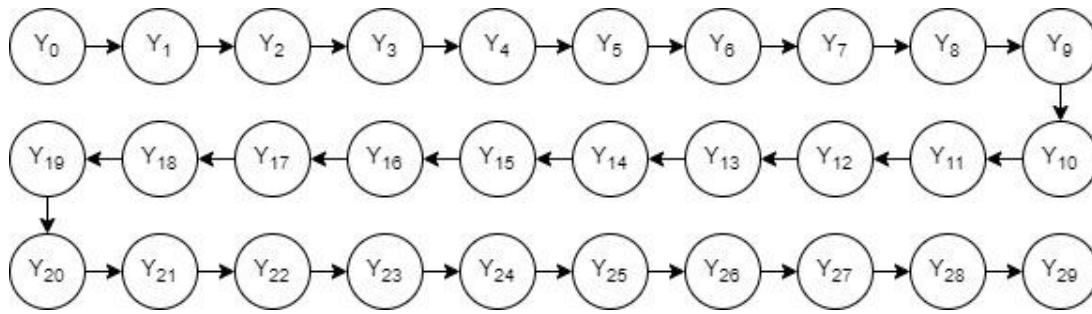


Рис. 7.8. Мережева модель процесу реалізації технологічного процесу для моделей $M_1(M_{KT1}, M_{OT2.1})$

Друга технологічна модель представляє собою наступну функцію:

$$M_2 = \{Y_1 \dots Y_{29}; M_{KT1}; M_{OT2.2}; M_{OT2.3}; M_{OT2.5}\} \quad (7.13)$$

У таблиці 7.3 наведено технологічний процес для моделі M_2 з позначенням можливих ризиків в процесі виконання робіт з підсилення елементу металевого каркасу, а також принцип оптимізації й захисту процесів від помилок, втрат, прискорення процесу та підвищення рівня продуктивності. Важливо чітко бачити всі необхідні задачі і кроки, а також оптимальну послідовність робіт, щоб уникнути повернення до попередніх етапів та збереження принципових рішень, що запобігає додатковим витратам часу та ресурсів.

Застосована концепція бережливого виробництва реалізована у Lean-моделі, зображений на Рис. 7.9. Вона представлена у вигляді мережевої технологічної моделі M_2 , що передбачає паралельну ефективну послідовність операцій відповідно до моделі організаційно-технологічних рішень M_{OT2} .

Для виявлення проблем в імітаційній моделі M_3 після ключових операцій впроваджено контрольні точки якості (перевірки на помилки) для проведення самоконтролю, що є частиною мір по комплексному управлінню якістю робіт. Це дозволяє своєчасно ідентифікувати відхилення, забезпечуючи відповідність процесів встановленим стандартам та мінімізуючи ризик дефектів (рис. 7.10). Після кожної перевірки виконується прийняття рішення щодо відповідності

елементів встановленим вимогам: чи не мають вони дефектів та пошкоджень, а також чи дотримано всіх технологічних норм. Це дозволяє своєчасно виявляти відхилення та мінімізувати їхній вплив на загальний процес.

Таблиця 7.3

Система оптимізації підсилення каркасу для реалізації традиційного технологічного процесу для моделі M_2

Функція	Дія	Ризики	Оптимізація
Y_1	Виконання робочого проекту підсилення	L_1, L_4, L_9, L_{16}	
Y_2	Замовлення компонентів	L_{15}, L_{16}	P_3, P_4, P_5, P_6
Y_3	Очікування компонентів (паралельна робота)	L_6	P_1, P_5
Y_4	Очікування доступу до робочого місця	L_6	P_3
Y_5	Прибуття виконавця	L_6	P_1, P_2, P_5
Y_6	Приймання та складування конструкцій	$L_6 L_3 L_5 L_{17}$	P_1, P_2, P_3
Y_7	Доставка до місця монтажу	L_5, L_6	P_1, P_4, P_3, P_5, P_6
Y_8	Перевірка відповідності сталі	$L_1 L_{14} L_9$	P_3, P_5, P_6
Y_9	Контроль зварних швів та розмірів	$L_2 L_7$	P_3, P_5, P_6
Y_{10}	Перевірка фарбування зон підсилення	$L_2 L_7 L_4 L_{10} L_{16} L_{20} L_{16}$	P_3, P_5, P_6
Y_{11}	Різання елементів	$L_2 L_9 L_{11} L_{16} L_{20}$	P_3, P_4, P_5, P_6
Y_{12}	Маркування конструкцій	$L_4 L_{16} L_5$	P_5, P_6
Y_{13}	Складування підсилювальних конструкцій	$L_{17} L_{19} L_8$	P_1, P_3, P_5, P_6
Y_{14}	Закріплення конструкцій для транспортування	$L_8 L_2 L_6 L_5$	P_1, P_3, P_5, P_6
Y_{15}	Встановлення балки на зберігання	$L_{19} L_{15} L_2 L_6 L_7$	P_1, P_3, P_5, P_6
Y_{16}	Обгородження робочої зони	$L_{12} L_{16} L_{15}$	P_1, P_3
Y_{17}	Підготовка робочого місця	$L_{12} L_6 L_2 L_5 L_{22} L_{21} L_{15}$	P_1, P_3, P_5, P_6
Y_{18}	Монтажні механізми, лебідки	$L_{12} L_5 L_7 L_{11} L_{15} L_{22} L_{21}$	P_1, P_3, P_4, P_6
Y_{19}	Захист обладнання	$L_2, L_{16}, L_{15},$	P_1, P_3, P_5, P_6
Y_{20}	Влаштування захисних елементів	$L_{11} L_{12} L_6 L_9 L_5$	P_1, P_3, P_4, P_6
Y_{21}	Монтаж риштувань, сходів	$L_{11} L_{12} L_6 L_9 L_5$	P_1, P_3, P_4, P_6
Y_{22}	Часткове зняття навантажень	$L_2 L_7 L_{11} L_1 L_7$	P_1, P_3, P_4, P_6
Y_{23}	Очищення конструкцій	$L_7 L_9 L_{16} L_2 L_{10} L_{12} L_{20}$	P_1, P_4, P_6
Y_{24}	Нанесення розмітки, свердління	$L_{16} L_{12} L_{24}$	P_1, P_3, P_3, P_6
Y_{25}	Встановлення вежі-тури	$L_{11} L_2 L_6 L_{16} L_{22} L_{21}$	P_1, P_3, P_4, P_6
Y_{26}	Стропування балки	$L_2 L_9 L_{12} L_{15} L_{16}$	P_1, P_3, P_4
Y_{27}	Монтаж балки	$L_2 L_9 L_{11} L_{12} L_{15} L_{16} L_{17}$	P_1, P_3, P_4, P_6
Y_{28}	Закріплення балки та зварювання	$L_2 L_9 L_{11} L_{12} L_{15} L_{20} L_{21} L_{22}$	P_1, P_3, P_4, P_6
Y_{29}	Повернення до позиції очікування	$L_5 L_6$	P_3, P_4

Загальна середня трудомісткість процесу для моделі M_2 наступна

$$\theta_{M2} = 0.01667 \cdot \sum \theta_{md} = 45,18 \text{ люд.-год.}$$

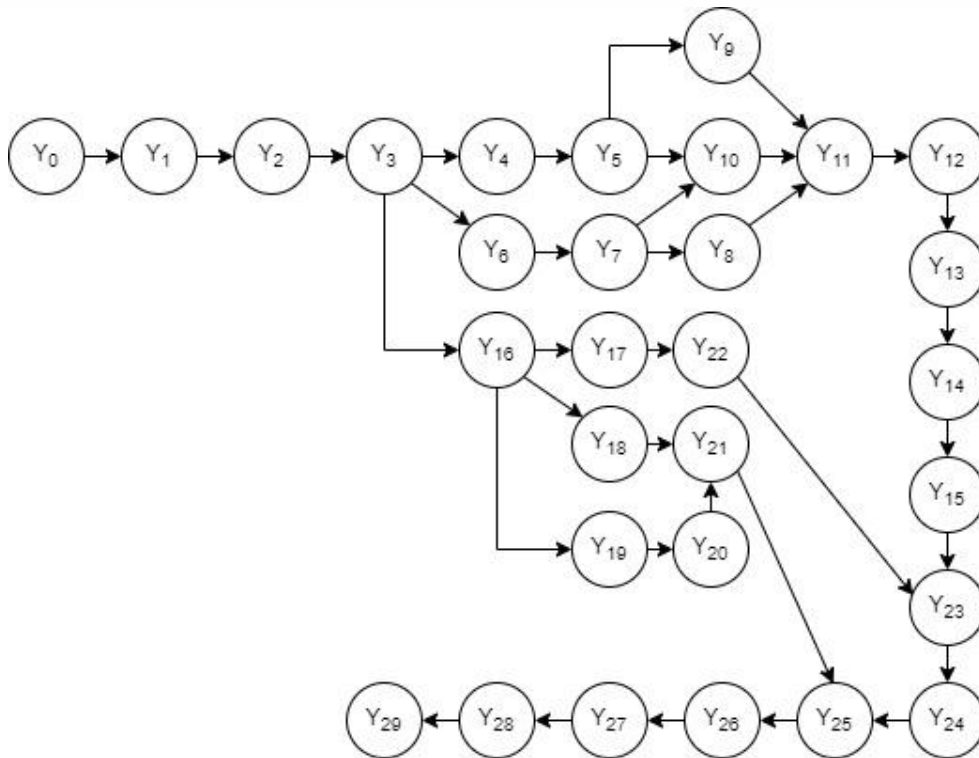


Рис. 7.9. Мережева модель процесу реалізації технологічного процесу для моделі M_2

Все це показано в покращеній Lean-моделі у вигляді мережевої технологічної моделі M_3 на рис. 7. 11, яка представляє собою наступну функцію:

$$M_3 = \{Y_1 \dots Y_{29}; M_{KT1}; M_{OT2.2}; M_{OT2.3}; M_{OT2.4}; M_{OT2.5}\} \quad (7.14)$$

Загальна середня трудомісткість процесу для моделі M_3 наступна

$$\theta_{M3} = 0.01667 \cdot \sum \theta_{md} = 46,18 \text{ люд.-год.}$$

У таблиці 7.4 наведено результати оптимізації трудових витрат у процесі підсилення конструкцій, що демонструють суттєве скорочення люд.-год. у ключових процесах завдяки Lean-моделі.

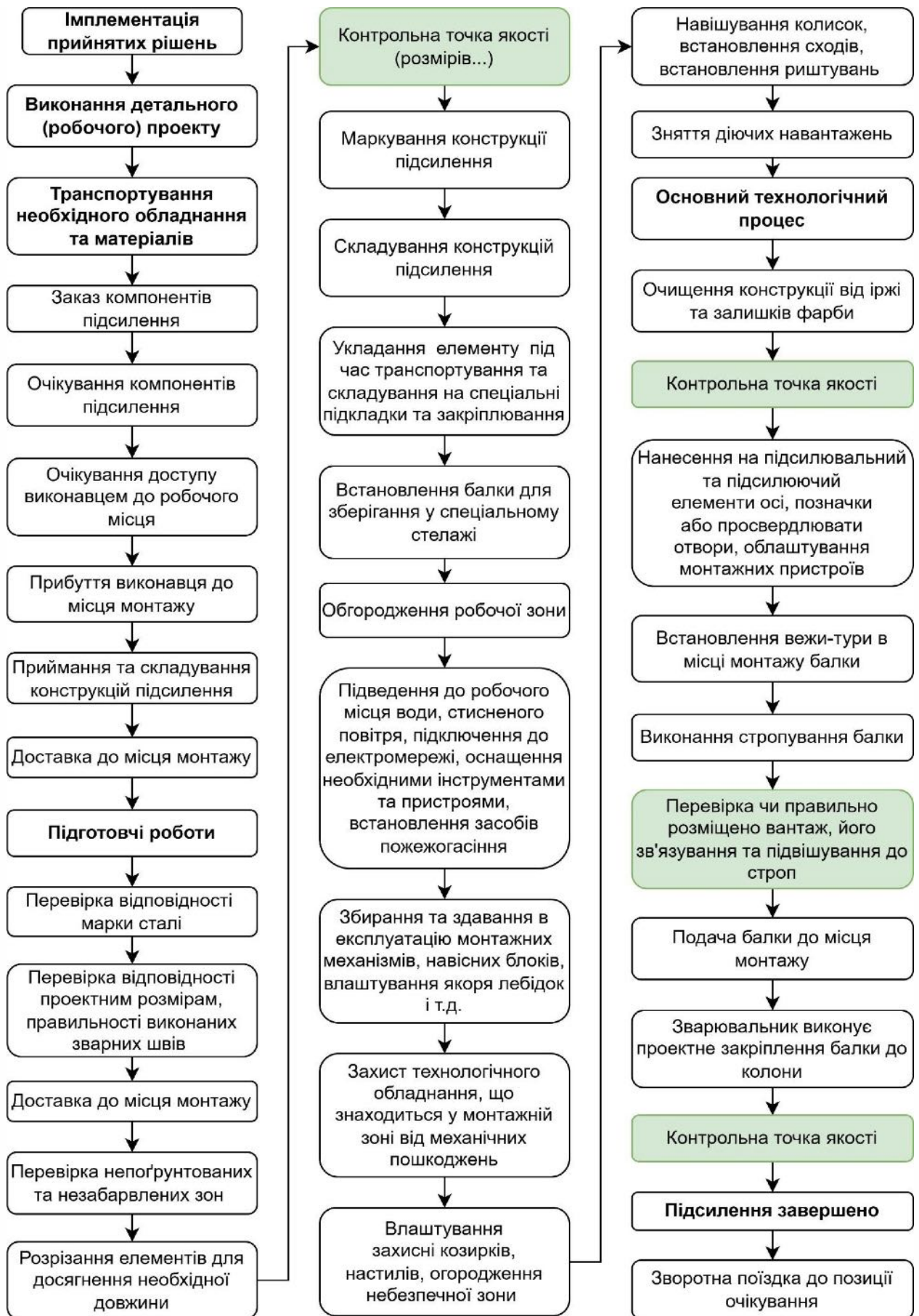


Рис. 7.10. Імітаційна модель структури реалізації Lean-моделі підсилення балки для моделі M_3

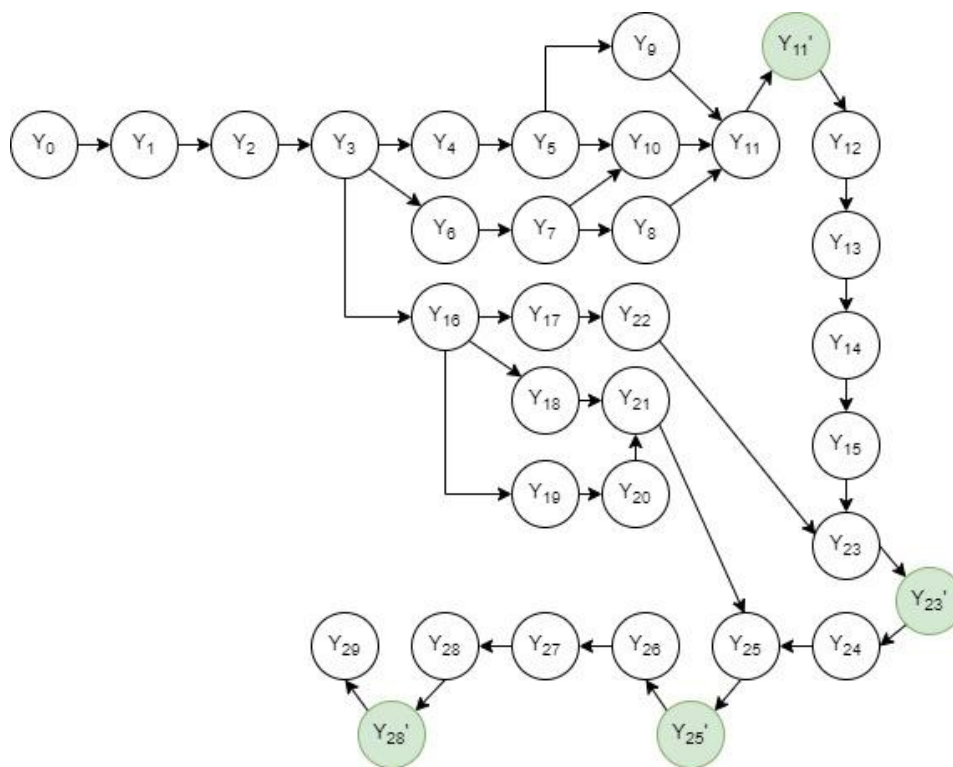


Рис. 7.11. Мережева модель процесу реалізації технологічного процесу для моделі M_3

Таблиця 7.4

Результат оптимізації трудових витрат та усунення втрат у процесі підсилення конструкцій, порівняння традиційної та Lean-моделі

Типи відходів	Традиційна модель M_1 , люд.-год.	Покращена Lean-модель M_3 , люд.-год.	Покращення, %
Переробки	5	3	40.0
Очікування	21	13.7	34.8
Транспортування/розвантаження	15	13.5	10.0
Непотрібні запаси, кг	26	18.2	30.0
Загальне покращення (цикл процесу)	65.68	46.18	29.7

Графік (рис. 7.12) візуалізує ці покращення, відображаючи зменшення трудовитрат, непотрібних запасів у кожній категорії та загальне скорочення виробничого циклу.

Графік, що візуалізує покращення Lean-моделі порівняно з традиційною, представлений на рис. 7.13. Він показує зменшення витрат люд.-год. і

непотрібних запасів у кожній категорії, а також загальне скорочення циклу процесу.

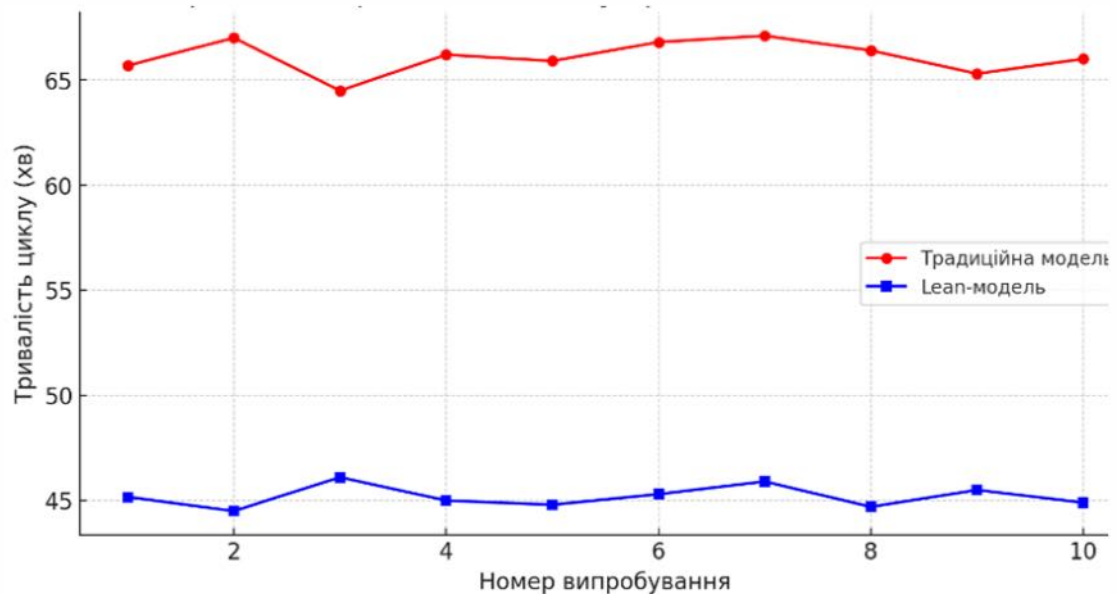


Рис. 7.12. Порівняння тривалості циклу у традиційної M_1 та Lean-моделі M_3

Отже, результати показують, що якщо два види діяльності використовують спільні ресурси, їх розподіл відбувається так, щоб мінімізувати затримки у наступних операціях. Спостереження показують, що транспортування ефективніше, коли його виконує один працівник, а не двоє окремих виконавців. Lean-модель дозволяє гнучко розподіляти завдання між працівниками, що зменшує трудомісткість процесу та підвищує продуктивність.

Оптимізація процесів включає виконання додаткових завдань під час очікування (наприклад, підготовка інструментів), встановлення чітких норм складування та захист матеріалів від псування (відведення води для запобігання корозії), а також використання підйомного обладнання для зменшення трудовитрат. Як видно з графіка, Lean-модель дозволяє зменшити витрати у всіх ключових процесах, забезпечуючи швидше та ефективніше виконання робіт.

У традиційній моделі значна частина часу витрачається на очікування, транспортування, розвантаження та утримання надлишкових запасів, що призводить до втрат ресурсів. Впровадження Lean-принципів дозволяє оптимізувати ці процеси: скоротити час очікування завдяки попередньому

узгодженню поставок і паралельному виконанню робіт (-34,8%), зменшити непотрібні запаси шляхом контрольованого зберігання та організації робочої зони (-30%), а також підвищити ефективність транспортування та розвантаження за рахунок автоматизації та кращої логістики (-10%). У підсумку загальна тривалість процесу скоротилася з 65,68 люд.-год. до 46,18 люд.-год., що підвищило ефективність на 29,7%.

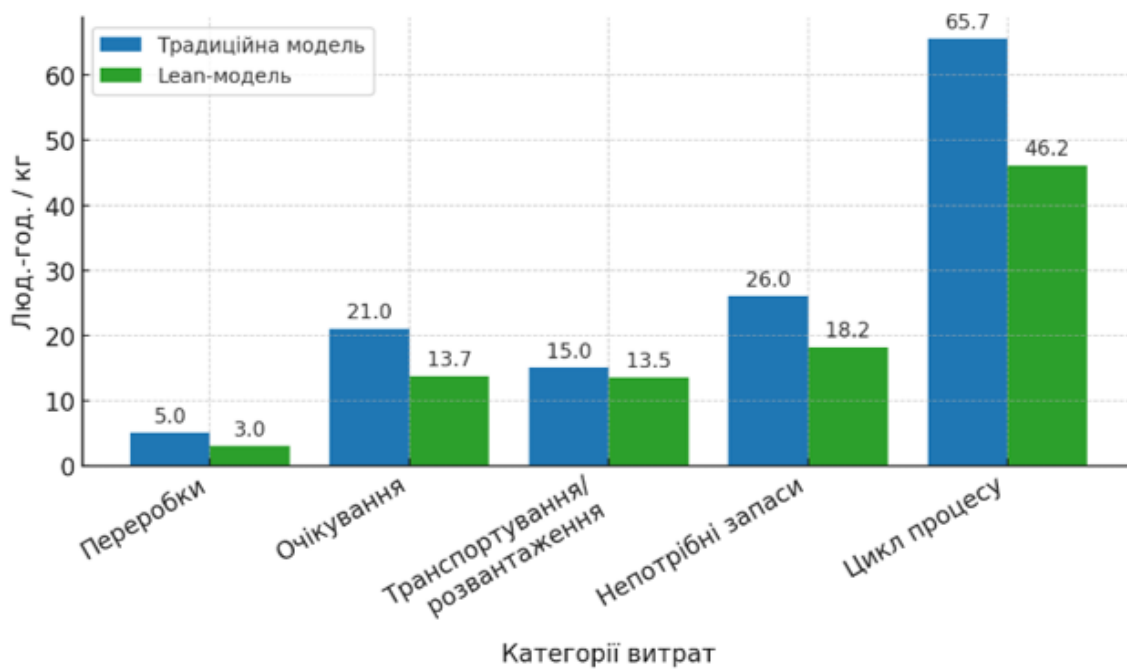


Рис.7.13. Порівняння втрат технологічного процесу в традиційній M_1 та у Lean-моделі M_3 (надлишкові запаси – кг; інші категорії – люд.-год.)

Іншим значним покращенням, досягнутим шляхом впровадження принципів бережливого Lean-виробництва, є підвищення продуктивності, розрахунок якої представлено в таблиці 7.5. Продуктивність P визначається як кількість продукції, виробленої за одиницю часу:

$$P = \frac{\text{Вихід}}{\text{Витрати}} = \frac{\text{Встановлені обсяги}}{\text{Робочий час}} \quad (7.15)$$

Графік на рис. 7.14 відображає порівняння середньої продуктивності для традиційної та Lean-моделі.

Таблиця 7.5

Розрахунок середньої продуктивності з впровадженням Lean-технологій

Параметр	Традиційна модель M_1	Lean-модель M_3	Покращення, %
Трудомісткість, люд.-год.	65,68	46,18	29,7
Обсяг роботи, кг	495	495	-
Продуктивність P , кг/люд.-год.	7,53	10,72	42,3

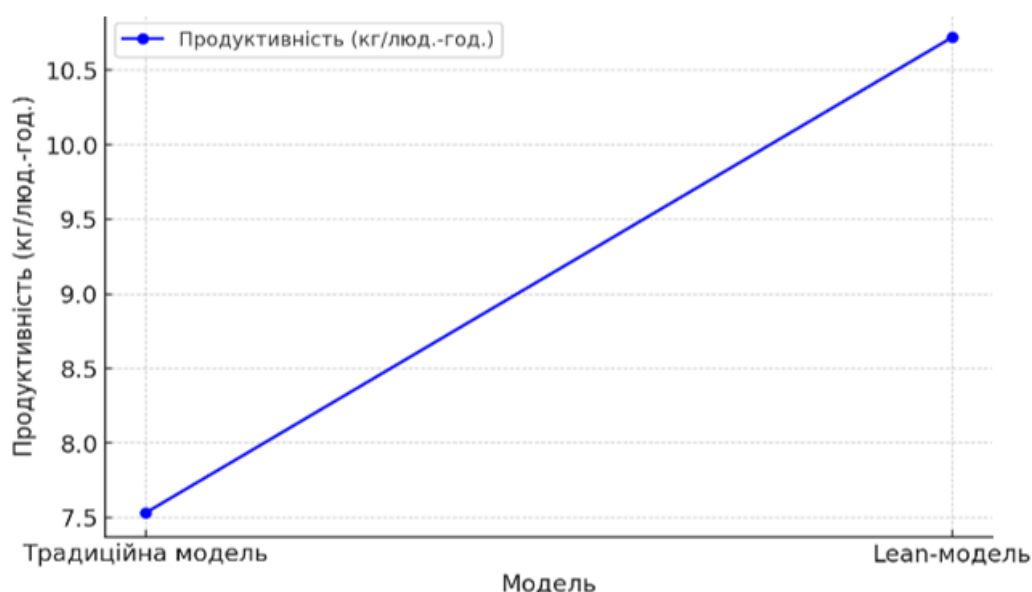


Рис. 7.14. Порівняння середньої продуктивності для традиційної та Lean-моделі

Окрему групу становить модель M_4 , яка передбачає використання альтернативної технології підсилення з застосуванням композитних матеріалів. Вона представляє собою наступну функцію:

$$M_4 = \{Y_1 \dots Y_{27}; M_{KT7}; M_{OT2.2}; M_{OT2.3}; M_{OT2.4}; M_{OT2.5}\} \quad (7.16)$$

В нашому випадку застосування Lean-підходу може бути досягнуте через впровадження Lean-моделі для традиційних конструктивно-технологічних рішень шляхом оптимізації організаційно-технічних процесів або через аналіз можливих КТР та ОТР із використанням моделі M_{OT3} та виявлення найефективнішого технології підсилення. Зокрема, йдеться про використання

фіброармованих полімерів як альтернативи сталевим елементам, що є ключовим аспектом моделі M_{KT7} .

Для цієї моделі побудовано окрему мережеву схему виконання робіт (рис.7.15), що відображає зміну структури технологічного процесу, скорочення кількості операцій та зменшення трудомісткості порівняно з традиційними методами підсилення, завдяки використанню можливості паралельного виконання операцій та перевірку на помилки.

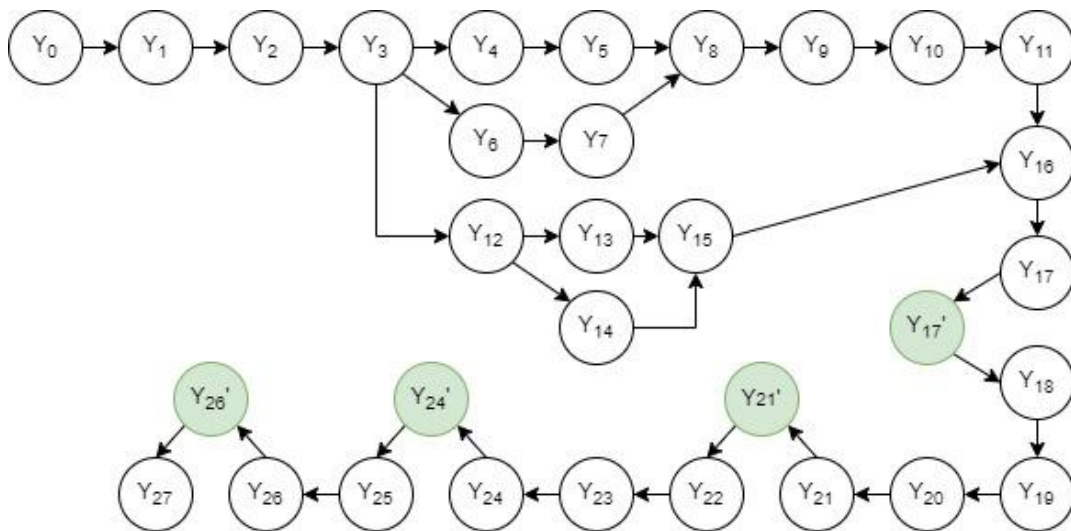


Рис. 7.15. Мережева модель процесу реалізації технологічного процесу для моделей M_4

Імітаційна модель структури реалізації Lean-моделі підсилення балки фіброармованою системою для моделі M_4 представлена на рисунці 7.16. У таблиці 7.6 наведено технологічний процес для моделі M_4 з позначенням можливих ризиків в процесі виконання робіт з підсилення елемента металевих каркасу, а також принцип оптимізації й захисту процесів від помилок, втрат, прискорення процесу та підвищення рівня продуктивності.

Загальна трудомісткість процесу для моделі M_4 наступна

$$\theta_{M4} = 0.01667 \cdot \sum \theta_{md} = 34,42 \text{ люд.-год.}$$

Узагальнена порівняльна оцінка якості конструктивно-технологічних рішень (КТР) підсилення каркасних будівель виконана на основі авторської системи критеріїв $N_i-R_i-A_i$, яка інтегрує показники надійності (N_i), ефективності

(R_i) та сталості (A_i) технологічних моделей реконструкції. Запропонований підхід забезпечує багатовимірне оцінювання КТР з урахуванням технічних, організаційно-технологічних, ресурсних та життєво-циклових аспектів.

Таблиця 7.6

Система оптимізації процесу підсилення каркасу для реалізації
традиційного технологічного для моделі M_4

Функція	Дія	Ризики	Оптимізація
Y_1	Виконання проекту підсилення	L_1, L_4, L_9, L_{16}	P_3, P_4, P_5, P_6
Y_2	Заказ компонентів	L_{15}, L_{16}	P_1, P_5
Y_3	Очікування компонентів	L_6	P_3
Y_4	Очікування доступу до робочого місця	L_6	P_1, P_2, P_5
Y_5	Проїзд виконавця	L_6	P_1, P_2, P_3
Y_6	Приймання та складування конструкцій	$L_6 L_3 L_5 L_{17}$	P_1, P_5, P_6
Y_7	Доставка до місця монтажу	L_5, L_6	P_1, P_4, P_3, P_5, P_6
Y_8	Перевірка відповідності FRP	$L_6 L_3 L_5 L_{17}$	P_1, P_5, P_6
Y_9	Маркування конструкцій	$L_4 L_{16} L_5$	P_5, P_6
Y_{10}	Складування конструкцій	$L_{17} L_{19} L_8$	P_1, P_3, P_5, P_6
Y_{11}	Укладання під час транспортування	$L_8 L_2 L_6 L_5$	P_1, P_3, P_5, P_6
Y_{12}	Обгородження робочої зони	$L_{12} L_{16} L_{15}$	P_1, P_3
Y_{13}	Оснащення робочого місця	$L_{12} L_6 L_2 L_5 L_{22} L_{21} L_{15}$	P_1, P_3, P_5, P_6
Y_{14}	Навішування колик, риштувань	$L_{11} L_{12} L_6 L_9 L_5$	P_1, P_3, P_4, P_6
Y_{15}	Часткове зняття навантажень	$L_2 L_7 L_{11} L_1 L_7$	P_1, P_3, P_4, P_6
Y_{16}	Підготовка поверхні	$L_7 L_9 L_{16} L_2 L_{10} L_{12} L_{20}$	P_1, P_4, P_6
Y_{17}	Зняття покриття та корозії	$L_7 L_9 L_{16} L_2 L_{10} L_{12} L_{20}$	P_1, P_4, P_6
Y_{18}	Знежирення поверхні	L_6	
Y_{19}	Шліфування та полірування	$L_{11} L_{12} L_{24} L_{16}$	P_1, P_4, P_6
Y_{20}	Видалення сміття	L_{16}	P_1, P_4, P_6
Y_{21}	Сушка поверхні	L_{16}	P_1, P_4, P_6
Y_{22}	Хімічне травлення	$L_{11} L_{15} L_{16}$	P_1, P_3, P_6
Y_{23}	Ґрунтування	L_{16}	P_1, P_4, P_6
Y_{24}	Заповнення нерівностей	L_{16}	P_1, P_4, P_6
Y_{25}	Нанесення FRP	$L_{16} L_{24}$	P_1, P_4, P_5, P_6
Y_{26}	Встановлення механічних з'єднувачів	$L_{16} L_{24}$	P_1, P_4, P_5, P
Y_{27}	Зворотна поїздка	$L_5 L_6$	P_3, P_4

Апробація методики виконана шляхом зіставлення чотирьох альтернативних моделей, що поєднують різні КТР (M_{KTi}) та ОТР (M_{OTi}):

- традиційну модель виконання робіт;

- модель з частковим впровадженням Lean-принципів;
- модель з розширеним Lean-контролем якості;
- комплексну модель з поєднанням FRP-підсилення та Lean-організації процесів.

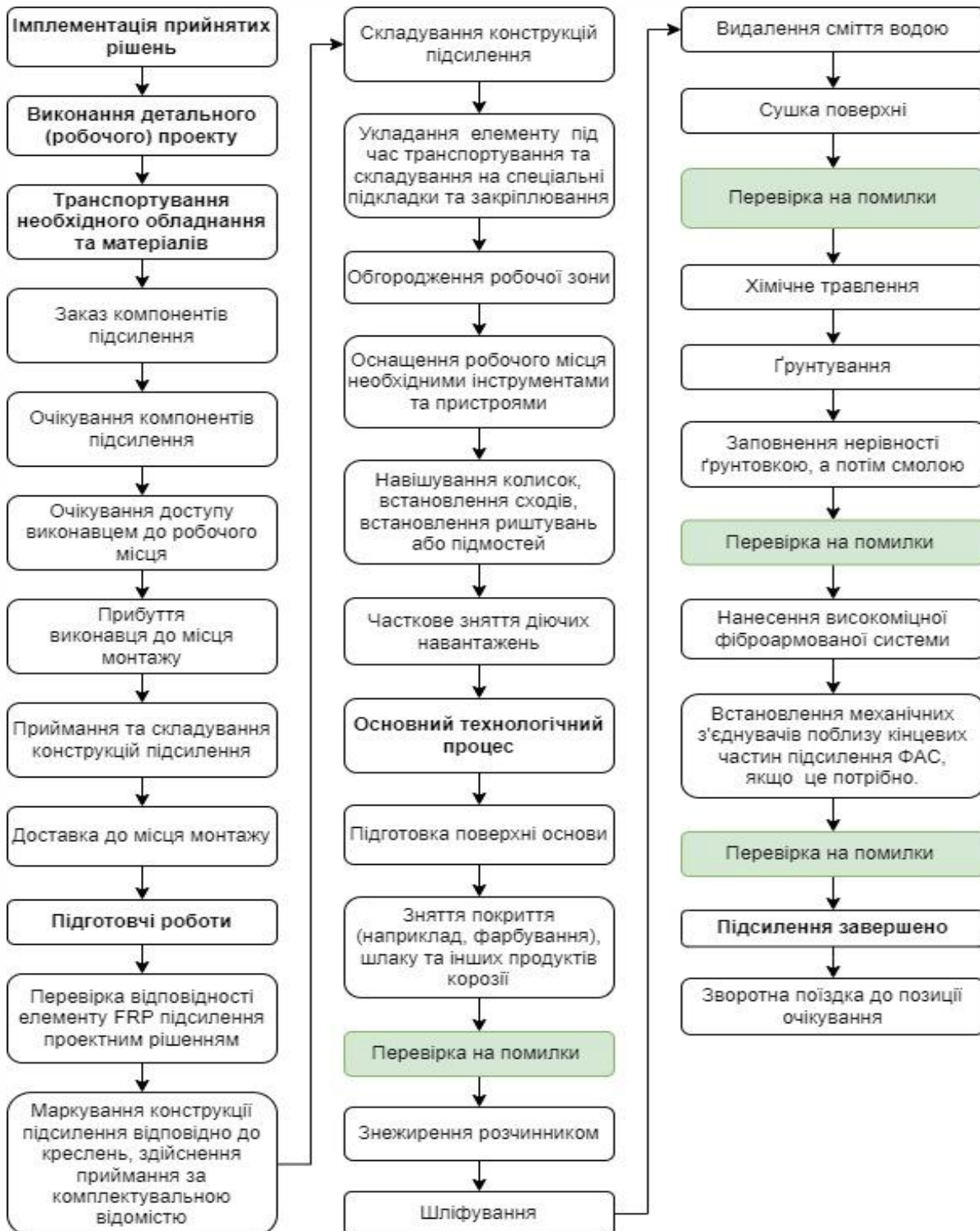


Рис. 7.16. Імітаційна модель структури реалізації Lean-моделі підсилення балки фіброармованою системою для моделі M_4

Результати порівняльної оцінки наведено в табл. 7.7, де представлено інтегровану характеристику якості моделей за системою $N_i-R_i-A_i$. Інтегральна оцінка демонструє послідовне зростання рівня якості КТР при переході від традиційної організації робіт до комплексного поєднання FRP-систем підсилення, Lean-технологій та ризик-орієнтованого управління, що підтверджує ефективність і доцільність запропонованого авторського підходу.

Аналіз результатів за критеріями надійності (N_i) здійснювався за групою критеріїв, які характеризують здатність підсилених конструкцій та технологічного процесу забезпечувати безвідмовну, безпечну та прогнозовану експлуатацію каркасів упродовж життєвого циклу. У межах апробації найбільш чутливими до організаційно-технологічних рішень виявилися критерії:

- N_5 — організація контролю якості робіт;
- N_7 — дотримання правильності монтажу;
- N_{11} — стійкість до зовнішніх впливів;
- N_{13} — ймовірність відмов підсилених конструкцій.

Порівняльна оцінка технологічних моделей виконана з використанням підходів [16] з урахуванням співвідношення трудомісткості, чисельності виконавців та тривалості циклу монтажу. У межах дослідження застосовано спрощену інтегральну оцінку ефективності, орієнтовану на виробничо-технологічні показники, без проведення повномасштабного аналізу життєвого циклу (LCA) [220]. LCA-оцінка у даній роботі розглядається в структурі КТС (рис. 7.1) як перспективний інструмент інтелектуального контуру управління якістю та стратегічного прийняття рішень. Її повноцінна реалізація передбачає використання деталізованих даних щодо матеріальних потоків, енергоспоживання, експлуатаційних сценаріїв і демонтажу конструкцій, що виходить за межі поставлених у дисертації завдань і потребує окремого спеціалізованого дослідження.

Для традиційної моделі M_1 характерний підвищений рівень ризику виникнення дефектів і втрат, що зумовлено реактивним характером контролю якості, який здійснюється після завершення окремих операцій.

Таблиця 7.7

Результати багатокритеріального оцінювання альтернативних моделей підсилення

Група критеріїв	Код критерію	Характеристика критерію	Модель 1 Традиційна	Модель 2 Lean	Модель 3 Lean + якість	Модель 4 FRP + Lean + якість
Надійність N_i	N_5	Організація контролю якості робіт	Реактивний, після виконання операцій	Частковий, орієнтований на усунення втрат	Самоконтроль у процесі	Самоконтроль + скорочення критичних операцій
	N_7	Дотримання правильності монтажу	Значною мірою залежить від кваліфікації	Покращене за рахунок стандартизації та уніфікації	Стабільно високе	Високе, знижений вплив людського фактора
	N_{11}	Стійкість до зовнішніх впливів	Обмежена	Аналогічна базовій	Аналогічна базовій	Підвищена (корозійна стійкість FRP)
	N_{13}	Ймовірність відмов конструкцій	Мінімальна	Знижена	Мінімальна	Низька
	$\sum N_i$	Інтегральний рівень надійності	Середній	Середній	Високий	Високий
Ефективність R_i	RT_3	Рівень впровадження Lean-принципів	Відсутній	Частковий	Розширений	Комплексний
	RT_{21}	Частота ризикових подій	Висока	Середня	Мінімальна	Низька
	RK_2	Трудомісткість процесу, люд.-год	65,68	45,17	46,18	34,42
	RC_4	Продуктивність, кг/люд.-год	7,53	9,7	10,72	12,8
	$\sum R_i$	Інтегральний рівень ефективності	Середній	Середній	Високий	Дуже високий
Сталість A_i	A_5	Тривалість реконструкції	Найбільша	Скорочена	Скорочена, стабільна	Мінімальна
	A_2	Оптимізація матеріальних втрат	Відсутня	Часткова	Системна	Системна + зменшення маси
	A_4	Конструктивно-технологічна сталість	Обмежена	Помірна	Висока	Максимальна
	$\sum A_i$	Інтегральний рівень сталості	Низький	Середній	Високий	Дуже високий
Інтегральна оцінка	Q_M	Загальна якість моделі	Базова / Середня	Підвищена	Висока	Дуже висока
Ранг	—	Пріоритетність альтернативи	IV	III	II	I

Найбільш критичними є процеси різання, зварювання та стропування, помилки в яких призводять до переробок, зростання трудомісткості та зниження загальної якості робіт.

У Lean-моделях M_3 та M_4 реалізовано принцип вбудованого контролю якості, що передбачає раннє виявлення та усунення помилок безпосередньо під час виконання технологічних операцій. Це дозволило мінімізувати передачу дефектів на наступні стадії процесу, знизити витрати на виправлення помилок і забезпечити стабільну відповідність виконання робіт нормативним вимогам.

Найбільш стабільні показники надійності отримано для моделі M_3 , у якій контроль якості інтегрований у мережеву структуру процесу, а коригувальні рішення приймаються без часових затримок.

Застосування FRP-систем у моделі M_4 додатково підвищує показники N_{11} та N_{13} за рахунок корозійної стійкості матеріалів і скорочення кількості зварних з'єднань, що традиційно є зонами підвищеного ризику відмов.

Оцінка ефективності технологічних моделей (R_i) включає показники трудомісткості, тривалості процесу, продуктивності, управління ризиками та рівня впровадження Lean-принципів.

Порівняльний аналіз показав, що впровадження Lean-технологій забезпечило:

- скорочення загальної трудомісткості процесу на 29,7 %;
- зменшення часу очікування ресурсів на 34,8 %;
- зниження обсягів надлишкових запасів приблизно на 30 %.

Зростання продуктивності з 7,53 до 10,72 кг/люд.-год (на 42,3 %) є кількісним підтвердженням підвищення ефективності організаційно-технологічних рішень. Найвищі показники ефективності зафіксовано у моделі M_4 , де Lean-організація робіт поєднана зі зменшенням кількості технологічно складних операцій за рахунок застосування FRP-підсилення.

Оцінка сталості та життєво-циклових показників (A_i) виконувалось за групою критеріїв A_i , які відображають довготривалу експлуатаційну, ресурсну

та організаційну ефективність реконструкції. У межах апробації визначальними стали:

- A_2 — екологічна сталість і оптимізація матеріальних втрат;
- A_4 — конструктивно-технологічна сталість;
- A_5 — організаційна сталість і тривалість реконструкції.

Lean-моделі характеризуються скороченням тривалості реконструкції за рахунок усунення непродуктивних простоїв і стабілізації потоків робіт. Застосування FRP-систем додатково забезпечує продовження терміну служби конструкцій, зменшення маси підсилювальних елементів та зниження навантаження на існуючий каркас, що позитивно впливає на показники сталості протягом життєвого циклу.

Аналіз показав, що мінімальні значення трудомісткості та тривалості циклу досягнуті для моделі M_4 , що узгоджується з її найвищою інтегральною оцінкою якості КТР за системою $N_i-R_i-A_i$.

7.5.Рекомендації по застосуванню конструктивно-технологічної системи забезпечення якості підсилення каркасних будівель

Запропонована в роботі комплексна технологічна система КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель орієнтована на практичне використання при реконструкції об'єктів різного функціонального призначення та класу наслідків. КТС забезпечує формалізований вибір і узгодження конструктивно-технологічних (M_{KT}) та організаційно-технологічних (M_{OT}) моделей на основі системи критеріїв надійності N_i , ефективності R_i та сталості A_i .

Рекомендації щодо застосування КТС спрямовані на забезпечення керованості процесу реконструкції, підвищення обґрунтованості прийняття рішень та досягнення балансу між технічними, економічними, екологічними й соціальними вимогами.

1. Застосування принципів ощадливого виробництва (Lean)

Рекомендовано впроваджувати принципи ощадливого виробництва як інструмент мінімізації технологічних втрат і підвищення ефективності організаційно-технологічних процесів підсилення каркасів. Застосування Lean-технологій доцільно орієнтувати на:

- зниження непродуктивних витрат часу, матеріалів та енергії;
- оптимізацію послідовності технологічних операцій і зменшення простоїв;
- усунення помилок на ранніх стадіях шляхом стандартизації операцій та впровадження механізмів превентивного контролю;
- заміну малоефективних або ризикованих операцій більш надійними технологічними рішеннями.
- Реалізація Lean-підходу безпосередньо впливає на критерії ефективності RT , RK та технологічні складові надійності N_6 , що забезпечує скорочення тривалості робіт і підвищення стабільності результатів реконструкції.

2. Комплексне моделювання та багатокритеріальне прийняття рішень

Вибір оптимальних моделей КТР і МОТ доцільно здійснювати на основі багатокритеріального аналізу з використанням укрупнених інтегральних критеріїв. Для формалізації процедури вибору рекомендовано:

- формувати множину альтернативних моделей КТР з урахуванням технічного стану каркасу, умов виконання робіт та вимог нормативної надійності;
- оцінювати альтернативи за критеріями надійності N_i , капітальних і експлуатаційних витрат RK , RE , екологічної та соціальної сталості A_i ;
- застосовувати метод аналітичної ієрархії (АНР) для визначення ваг критеріїв і ранжування альтернатив.

На практичних етапах прийняття рішень рекомендовано використовувати не більше 7–9 укрупнених критеріїв одночасно, що забезпечує керованість моделі та відповідає когнітивним можливостям експертного оцінювання.

3. Управління ресурсами та оптимізація життєвого циклу

У межах КТС управління ресурсами доцільно здійснювати з позицій життєво-циклового підходу. Рекомендовано:

- оптимізувати планування реконструкційних заходів з урахуванням циклічності технологічних операцій;
- використовувати автоматизовані системи контролю розподілу матеріальних, трудових і часових ресурсів;
- узгоджувати капітальні витрати (CAPEX) та експлуатаційні витрати (OPEX) з урахуванням заданого терміну служби підсилених елементів каркасу;
- застосовувати результати аналізу повної вартості життєвого циклу як один із базових критеріїв ефективності.

4. Контроль ризиків та адаптація до умов невизначеності

Реконструкція каркасних будівель супроводжується підвищеним рівнем технічної та організаційної невизначеності. У зв'язку з цим рекомендовано:

- здійснювати системний аналіз технічних, часових, фінансових та нормативних ризиків;
- використовувати цифрові моделі процесів для візуалізації потоків робіт та інформації;
- передбачати можливість адаптації організаційно-технологічних рішень у разі зміни умов виконання робіт;
- інтегрувати результати оцінювання ризиків у систему критеріїв надійності та ефективності.

5. Забезпечення екологічної та соціальної сталості

При застосуванні КТС рекомендовано враховувати екологічні та соціальні наслідки реконструкції як складові інтегральної оцінки якості підсилення. Основними напрямками є:

- скорочення викидів парникових газів і обсягів відходів;
- оптимізація логістики та використання місцевих матеріалів;
- повторне використання та рециклінг конструктивних елементів;
- мінімізація впливу будівельних робіт на користувачів експлуатованих будівель;
- забезпечення безперервності функціонування об'єкта за можливості.

Ці заходи безпосередньо відображаються у критеріях сталості A_i та сприяють узгодженню технічних рішень з принципами сталого розвитку.

6. Використання цифрових та інноваційних технологій

ВІМ-моделювання рекомендовано застосовувати як базовий інструмент реалізації КТС на всіх етапах життєвого циклу будівлі — від обстеження та проектування до експлуатації та можливого повторного підсилення. Додатково доцільним є:

- використання модульних і збірних рішень для скорочення тривалості монтажу;
- застосування автоматизованих та механізованих засобів виконання робіт;
- інтеграція цифрового моніторингу стану конструкцій у систему експлуатаційної надійності.

Застосування КТС підвищення якості підсилення каркасних будівель ґрунтується на системному поєднанні конструктивних, технологічних, організаційних та експлуатаційних рішень. Запропоновані рекомендації забезпечують практичну реалізацію методології, розробленої у розділах 2–7, та дозволяють підвищити обґрунтованість вибору КТР, знизити ризики реконструкції й досягти оптимального балансу між надійністю, ефективністю та сталим розвитком об'єкта.

Висновки по сьомому розділу

1. Вперше сформульовано та розроблено наукову концепцію КТС забезпечення якості, у якій підсилення інтерпретується як керована система перетворень із визначеними вхідними параметрами, обмеженнями та цільовими результатами, а вибір рішень здійснюється за кількісними та якісними критеріями ефективності R_i , експлуатаційної надійності N_i та сталості A_i . Запроваджено ВІМ-орієнтовану інформаційно-аналітичну підсистему як «цифрове ядро» КТС та обґрунтовано застосування CRIST/логічної матриці відношень для формалізованого узгодження MKT_i – MOT_i і попереднього відбору

допустимих комбінацій у просторі рішень «багато-до-багатьох». Розроблено технологічно орієнтовану класифікацію методів підсилення та ієрархічну модель універсальної множини M_N (з базовими й комбінованими M_{KT}/M_{OT}), що забезпечує уніфікацію технологічно ідентичних процесів незалежно від типу елемента каркасу і створює основу для алгоритмізації та цифрової підтримки прийняття рішень (АНР/ANN) з урахуванням ризиків F_s та стратегічного критерію підходу T_x . Обґрунтовано, що запропонована КТС забезпечує замкнений цикл «діагностика – вибір – реалізація – контроль», інтегруючи технічні, організаційні, ресурсні й екологічні чинники та підвищуючи керованість і відтворюваність досягнення заданого рівня якості підсилення.

2. Встановлено, що КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель є відкритою ієрархічною системою, яка потребує цільової модифікації залежно від стратегії реконструкції та домінуючих критеріїв якості, а найбільш результативним напрямом є інтеграція BIM і Lean як структурних компонентів системи, а не допоміжних інструментів. Розроблено модифіковану КТС із Lean-ядром, у якій формалізовано потоки робіт, ресурсів і інформації та обґрунтовано застосування принципів пріоритизації спільних ресурсів на користь операцій, що наближені до завершення циклу, з метою зниження затримок і втрат. Запроваджено інтеграцію механізму попередження технологічних помилок і мінімізації переробок, що підвищує стабільність якості та керованість процесів підсилення. Обґрунтовано та реалізовано імітаційне моделювання в межах КТС для багаторазового відтворення операцій, оцінювання трудомісткості / тривалості / вартості та виявлення «вузьких місць» із подальшою багатокритеріальною оцінкою якості за системою R–N–A. Вперше розроблено алгоритм цифровізації прийняття рішень, що поєднує 3D-сканування, BIM-середовище, оцінку технічного стану та показників життєвого циклу з ітераційним коригуванням моделей MKT_i – MOT_i , забезпечуючи перехід від описового до алгоритмічного забезпечення якості та сталого розвитку реконструкції.

3. Встановлено, що формування та оптимізація КТР підсилення каркасних будівель мають здійснюватися на основі інтеграції принципів сталого розвитку, Lean-аналізу та багатокритеріальної оцінки якості, що забезпечує узгодження екологічних, ресурсних і соціальних факторів із показниками надійності N_i , ефективності R_i та сталості A_i . Розроблено формалізовану операційну модель оптимізації (O_1 – O_6), у межах якої встановлено функціональний зв'язок між групами технологічних операцій та інтегральною оцінкою якості КТР Q_{ktr} , що дозволяє кількісно оцінювати вплив кожного етапу процесу на досягнення цільових критеріїв. Вперше обґрунтовано застосування Lean-ідентифікації втрат і життєво-циклового підходу як інструментів ранньої оптимізації КТР до початку реалізації робіт, що забезпечує мінімізацію матеріальних витрат, викидів CO_2 , будівельних відходів та непрямих витрат життєвого циклу. Запроваджено систему відповідності між заходами операційної оптимізації та ієрархією критеріїв N_i – R_i – A_i , що формалізує процедуру прийняття рішень і підвищує обґрунтованість вибору КТР у контексті сталого розвитку. Обґрунтовано, що інтеграція ресурсної ефективності, логістичної оптимізації, циркулярних принципів використання матеріалів і механізмів зворотного зв'язку створює методологічну основу для переходу від локальної оптимізації операцій до системного управління якістю реконструкції протягом життєвого циклу об'єкта.

4. Встановлено, що поетапне нарощування організаційно-технологічної зрілості (від традиційної моделі до Lean-моделей із вбудованим контролем якості та до FRP-підсилення) забезпечує стійке зростання інтегральної якості КТР за системою критеріїв N_i – R_i – A_i і зміну пріоритетності альтернатив ($IV \rightarrow I$). Вперше обґрунтовано на основі серії імітаційних прогонів (10 для кожної моделі) кількісний ефект Lean-оптимізації: скорочення трудомісткості циклу з 65,68 до 46,18 люд.-год (–29,7%), зменшення очікування ресурсів на 34,8%, переробок на 40% та надлишкових запасів приблизно на 30%. Розроблено та апробовано мережеві (імітаційні) моделі технологічних процесів M_1 – M_4 , що дозволили формалізувати вплив «витягувального» планування, стандартизації та Рока-ґоке-перевірок на зниження частоти ризикових подій і підвищення керованості

процесу. Запроваджено підхід «вбудованої якості» у технологічну структуру Lean-моделей, завдяки чому підвищено показники надійності (зокрема за критеріями контролю якості та правильності монтажу) і мінімізовано перенесення дефектів на наступні стадії. Обґрунтовано, що комплексна модель FRP + Lean + якість (M₄) забезпечує найвищі показники ефективності та сталості (зокрема за рахунок скорочення технологічно критичних операцій і підвищеної корозійної стійкості матеріалу), досягаючи максимальної продуктивності 12,8 кг/люд.-год та найнижчої трудомісткості 34,42 люд.-год, що підтверджує практичну результативність запропонованої системи підвищення якості підсилення.

5. Розроблено узагальнені методичні рекомендації щодо застосування КТС підвищення якості підсилення каркасних будівель як керованого багатокритеріального процесу узгодження КТР і МОТ за інтегрованою системою критеріїв $N_i-R_i-A_i$. Методологія ґрунтується на Lean-оптимізації процесів, багатокритеріальному моделюванні та ранжуванні альтернатив (із застосуванням АНР), життєво-циклового управлінні ресурсами (CAPEX/OPEX), системному контролі ризиків та інтеграції екологічних і соціальних аспектів у прийняття рішень. Обґрунтовано доцільність обмеження кількості укрупнених критеріїв до 7–9 для забезпечення керованості експертного оцінювання та відтворюваності результатів. Запроваджено інтеграцію ВІМ як цифрового ядра реалізації КТС протягом усього життєвого циклу об'єкта з використанням модульних рішень, механізації та цифрового моніторингу. Рекомендації подано як формалізований регламент практичного впровадження, що забезпечує алгоритмізований вибір, адаптацію рішень до змін умов реконструкції та підвищення прогнозованості якості результату.

6. Результати наукових досліджень, викладених у дисертаційній роботі, апробовані на будівельних об'єктах при реконструкції цивільних і промислових будівель [32, 55, 56, 77].

7. Основні результати розділу викладені роботах [71, 120, 177, 275, 285, 286].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено складну наукоємну проблему щодо формування КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель, у якій процес підсилення інтерпретується як керована система перетворень із визначеними вхідними параметрами, обмеженнями та цільовими результатами, а вибір КТР здійснюється за кількісними та якісними критеріями ефективності R_i , експлуатаційної надійності N_i та сталості A_i . Це значно підвищило рівень обґрунтованості вибору КТР та дозволило інтегрувати технічні, організаційні, економічні й екологічні чинники у процес прийняття рішень при підсиленні каркасних конструкцій.

Значення результатів роботи для науки полягає у тому, що створено спеціалізовану наукоємну КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель, яка формалізує процес вибору КТР з урахуванням критеріїв ефективності, надійності та сталості, а також взаємозв'язків між технічним станом конструкцій, організаційно-технологічними параметрами виконання робіт і експлуатаційними вимогами.

Значення результатів роботи для практики полягає у тому, що розроблена система дозволяє підвищити ефективність реконструкції каркасних будівель, оптимізувати вибір технологій підсилення, зменшити трудомісткість і витрати ресурсів, а також забезпечити більш високий рівень надійності та довговічності підсилених конструкцій. Запропонований науково-прикладний інструментарій дав змогу інтегрувати результати обстеження конструкцій, оцінку технічного стану, вибір КТР та організацію виконання робіт у єдину систему підтримки прийняття рішень, орієнтовану на забезпечення якості підсилення каркасних будівель протягом усього життєвого циклу об'єкта.

На підставі одержаних результатів дослідження сформульовано такі висновки:

1. Встановлено, що продовження життєвого циклу каркасних будівель шляхом реконструкції є об'єктивною необхідністю, зумовленою фізичним і

моральним зносом, зростанням експлуатаційних навантажень, змінами нормативної бази, кліматичними впливами та наслідками бойових дій. Обґрунтовано, що забезпечення безпечної та ефективної експлуатації потребує переходу від локального вибору окремих технічних рішень до системного управління якістю підсилення на рівні всього каркасу будівлі. Уточнено систему показників якості для процесів і продуктів підсилення, у якій визначальними є технологічність, надійність, економічність, екологічність, безпека, довговічність та організація робочого простору, а також виявлено недостатню формалізацію процедур оцінки ризиків, оптимізації витрат і вибору рішень у чинній практиці реконструкції.

2. Розроблено методологію забезпечення якості підсилення каркасних будівель під час реконструкції, яка базується на системному, життєво-цикловому та багатокритеріальному підходах. Визначено наукове трактування якості підсилення як інтегральної характеристики КТР, що поєднує конструктивні, технологічні та експлуатаційні аспекти протягом життєвого циклу об'єкта. Запропоновано систему критеріїв і ключових показників ефективності, яка охоплює надійність, ефективність і сталість, та сформовано поетапну структуру методики дослідження з використанням аналізу ризиків, цифрових інструментів BIM/LCA та принципів ощадливого управління процесами.

3. Досліджено комплекс методів обстеження технічного стану елементів каркасу будівлі та систематизовано методи інструментального контролю за функціональними ознаками, досліджуваними параметрами, способами випробувань і застосовуваним обладнанням. Розроблено багатofакторну систему нормування витрат праці й часу на процеси підсилення, у якій чинники впливу структуровано за п'ятьма групами та враховано техніко-технологічні, організаційні, ергономічні та зовнішні фактори. Розвинуто методику цілочислового мікроелементного нормування процесів підсилення з введенням інтегрального коригувального коефіцієнта та узагальненої функції норми часу, що забезпечує формування гнучких нормативів, адаптованих до реальних умов реконструкції каркасних будівель.

4. Встановлено, що дефекти й пошкодження елементів каркасних будівель формуються під впливом сукупності проєктних, технологічних, монтажних та експлуатаційних чинників і є індикаторами системних недоліків на різних етапах життєвого циклу об'єкта. Систематизовано дефекти бетонних, залізобетонних і металевих конструкцій, а також запропоновано їх класифікацію за причинами виникнення, характером прояву та ступенем впливу на безпеку й працездатність. Розроблено функціонально-структурний підхід до опису дефектів, пошкоджень і типових ризиків недосконалого застосування матеріалів та виробів для підсилення, що створило методичну основу для формалізації факторів, які визначають якість підсилення та вибір відповідних КТР.

5. Виявлено і систематизовано фактори, що впливають на формування КТС підвищення якості підсилення каркасних будівель, зокрема просторово-планувальні параметри, параметри робочих місць виконавців, умови виробничого середовища, технічний стан елементів каркасу, а також конструктивні, організаційні, часові та ресурсні обмеження. Розроблено формалізовані моделі просторово-планувальних параметрів і параметрів робочих місць, які доводять їх визначальний вплив на трудомісткість, тривалість і якість процесів підсилення. Запроваджено систему базових моделей КТР та варіантів ОТР, що вперше структуровані з позицій організаційно-технологічної реалізації в умовах реконструкції та слугують вхідною основою для подальшого синтезу КТС.

6. Розроблено науково обґрунтовану модель нормування та моделювання технологічних схем організації й механізації процесів монтажу елементів підсилення каркасів на основі мікроелементного підходу та ієрархічної декомпозиції будівельного процесу. Встановлено, що процеси монтажу елементів підсилення є стохастичними бюлагатофакторними системами з високою варіативністю послідовностей дій, а їх оптимізація досягається за рахунок формалізації технологічних переходів і суміщення сумісних операцій. Вперше обґрунтовано, що застосування формалізованих мережевих моделей і мікроелементного нормування забезпечує скорочення трудомісткості до 20% без

погіршення якості та безпеки робіт, створюючи основу для автоматизованого формування технологічних схем і прогнозування тривалості процесів.

7. Вперше сформовано репрезентативну емпіричну базу трудових витрат, тривалості та собівартості процесів підсилення каркасних конструкцій на основі натурних хронометражних спостережень, дискретного нормування та порівняльного аналізу альтернативних моделей M_{KT} . Розроблено методику порівняльного оцінювання собівартості і багатокритеріального ранжування моделей за сукупністю показників трудомісткості, вартості, просторових обмежень, надійності, несучої здатності та сталості. Запроваджено індекс порівняльної доцільності як формалізовану міру позиції моделі у ранговому ряді, що дозволяє здійснювати обґрунтований вибір КТР відповідно до пріоритетів конкретного інвестиційно-будівельного проєкту реконструкції.

8. Обґрунтовано та запроваджено формалізований механізм узгодження моделей $M_{KTi}-M_{OTi}$ з інтеграцією факторів ініціювання підсилення у просторі рішень «багато-до-багатьох» на основі логічної матриці відношень і запропонованого комплексу CRIST, що забезпечує перехід від описового вибору рішень до алгоритмізованого попереднього відбору допустимих комбінацій.

9. Вперше сформульовано наукову концепцію КТС забезпечення якості підсилення каркасних будівель, у межах якої процес підсилення розглядається як керована багатокритеріальна система з BIM-орієнтованою інформаційно-аналітичною підсистемою як цифровим ядром та інтегрованим інтелектуальним контуром управління якістю і стратегічного прийняття рішень. У межах цієї концепції розроблено модифіковану КТС із Lean-ядром та алгоритмами цифровізації, а також обґрунтовано застосування логічної матриці відношень і комплексу CRIST, а також сучасних цифрових технологій управління життєвим циклом будівель та інтелектуально-аналітичних методів підтримки прийняття рішень для формалізованого узгодження $M_{KTi}-M_{OTi}$ і підтримки прийняття рішень за критеріями ефективності R_i , надійності N_i та сталості A_i .

10. Апробовано запропоновану систему підвищення якості підсилення каркасних будівель шляхом порівняльного аналізу чотирьох технологічних

моделей, які поєднують традиційні рішення, Lean-підхід, вбудований контроль якості та FRP-підсилення. Встановлено, що поетапне нарощування організаційно-технологічної зрілості забезпечує стійке зростання інтегральної якості моделі за системою критеріїв N–R–A, а комплексна модель FRP + Lean + якість є найбільш результативною. Порівняно з традиційною моделлю трудомісткість виконання робіт зменшилась на 47,6 %, а продуктивність зросла майже на 70 %. Обґрунтовано кількісний ефект Lean-оптимізації: скорочення трудомісткості циклу з 65,68 до 46,18 люд.-год, зменшення очікування ресурсів на 34,8 %, переробок на 40 %, надлишкових запасів приблизно на 30 % та зростання продуктивності до 12,8 кг/люд.-год у найефективнішій моделі. Розроблено узагальнені методичні рекомендації щодо практичного застосування КТС як керованого багатокритеріального процесу узгодження КТР і МОТ, що забезпечує алгоритмізований вибір, адаптацію рішень до змін умов реконструкції та підвищення прогнозованості якості кінцевого результату.

11. Результати досліджень апробовано при реконструкції цивільних і промислових каркасних будівель, де підтверджено можливість використання розробленої КТС, нормативно-методичного та алгоритмічного інструментарію для обґрунтованого вибору технологій підсилення, скорочення витрат праці й ресурсів, зменшення ризиків реконструкції, підвищення експлуатаційної надійності, довговічності та сталості будівельних об'єктів.

Список використаних джерел

1. ДСТУ Б А.3-13:2010. Номенклатура показників якості будівельної продукції. Основні положення. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 12 с.
2. Регламент (ЄС) № 305/2011 Європейського Парламенту та Ради від 9 березня 2011 року про встановлення гармонізованих умов для розповсюдження будівельної продукції та скасування Директиви Ради 89/106/ЄЕС. Офіційний вісник Європейського Союзу, 2011. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2011/305/oj/eng>
3. ISO 9000:2015. Quality management systems — Fundamentals and vocabulary. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015.
4. ДСТУ ISO 9001-95. Системи якості. Модель забезпечення якості в процесі проектування, розроблення, виробництва, монтажу та обслуговування. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1995.
5. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2018.
6. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014. 199 с.
7. ДСТУ Б В.2.6-10-96. Конструкції будинків і споруд. Конструкції сталеві будівельні. Методи випробування навантаженням. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1996.
8. ДСТУ EN 1090-2:2018. Виконання сталевих та алюмінієвих конструкцій. Частина 2. Технічні вимоги до сталевих конструкцій. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2018.
9. Arditi D., Gunaydin H. M. Total quality management in the construction process. International Journal of Project Management, 1997. Vol. 15, № 4. P. 235–243.
10. Тугай О. А., Борисова Н. О., Приходько Д. О. Новітні інформаційно-аналітичні моделі управління підготовкою будівництва на засадах

девелопменту. Управління розвитком складних систем. Київ: КНУБА, 2010. Вип. 1. С. 39–42..

11. Тонкачєєв Г. М., Лівінський О. М., Курок О. І., Дудар І. Н. Організація, планування та управління будівництвом. Київ: МП «Леся», 2016. 567 с.

12. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016.

13. ДСТУ Б А.1.1-11-94. Система стандартизації та нормування в будівництві. Показники якості і методи оцінки рівня якості продукції. Терміни та визначення. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1994.

14. The Toyota Way Model: An Alternative Framework for Lean Construction. Total Quality Management and Business Excellence, 2014. Vol. 25, Issue 5–6. P. 664–682.

15. Lev B., Radhakrishnan S., Tong J. Y. Earnings component volatilities: Capital versus R&D expenditures. Production and Operations Management, 2021. Vol. 30, № 5. P. 1475–1492. DOI: 10.1111/poms.13333.

16. Тонкачєєв Г. М. Функціонально-модульна система формування комплектів будівельної оснастки: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.08. Київ: Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт., 2012. 360 с.

17. Тонкачєєв Г. М. Нова система нормування витрат часу для прийняття технологічних рішень. Містобудування та територіальне планування. Київ: КНУБА, 2013. Вип. 50. С. 700–704.

18. Тонкачєєв Г. М., Молодід О. С., Тонкачєєв В. Г., Шандра О. Г. Інноваційні технології каркасного будівництва: навч. посіб. / за ред. Г. М. Тонкачєєва. Київ: Ліра-К, 2024. 316 с.

19. Tonkacheiev H., Rudnieva I., Tonkacheiev V., Priadko I. Features of standard time formation to implement construction processes: a case study. Strength of Materials and Theory of Structures. Kyiv: KNUBA, 2022. Issue 109. P. 141–151.

20. Григоровський П. Є. Методологічні основи формування організаційно-технологічних рішень інструментальних вимірювань при зведенні та

експлуатації будівель і споруд: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.08. Харків, 2018. 338 с.

21. Молодід О. С. Система формування конструктивно-технологічних рішень відновлення експлуатаційної придатності будівельних конструкцій: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.08. Київ: Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт., 2021. 492 с.

22. Ailland K. Ereignisbasierte Abbildung von Bau-Ist-Zuständen: Dissertation. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, 2013.

23. Тонкачєєв Г. М., Руднєва І. М. Дослідження критеріїв підвищення експлуатаційної надійності каркасів будівель. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин, 2021. № 47. С. 52–63.

24. Тонкачєєв Г. М., Руднєва І. М. Особливості впливу факторів типу робочих місць на вибір підмостей для здійснення процесів підсилення будівельних конструкцій при реконструкції. Містобудування та територіальне планування, 2021. № 78. С. 493–507.

25. Тонкачєєв Г. М., Руднєва І. М. Дослідження факторів, що впливають на вибір підмостей для здійснення процесів підсилення будівельних конструкцій при реконструкції. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин, 2021. № 48. С. 3–12.

26. Осипов О. Ф. Система обґрунтування та вибору організаційно-технологічних рішень реконструкції будівель: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.08. Одеса: Одес. держ. акад. буд-ва та архіт., 2015. 430 с.

27. Осипов О. Ф. Адаптивные динамически трансформирующиеся технологические системы. Методология проектирования организационно-технологических решений реконструкции зданий: монографія. 2-ге вид., доповн. і випр. Київ: ФОП Ямчинський О. В., 2022. 393 с. ISBN 978-617-81-84-12-4.

28. Савйовский В. В. Методологические принципы организационно-технологического проектирования реконструкции гражданских зданий: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.08. Харьков, 2010. 366 с.

29. Riley M., Cotgrave A. Construction Technology 3: The Technology of Refurbishment and Maintenance. New York: Palgrave Macmillan, 2011. ISBN 978-0-230-29014-3.

30. Ryu H. Sustainable building refurbishment: process based approaches with the Hotel Klaus K refurbishment case: Master's thesis. Espoo: Aalto University School of Arts, Design and Architecture, 2014. 101 p.

31. Bhuiyan S. I., Jones K., Wanigarathna N. An approach to sustainable refurbishment of existing building. In: Raidén A. B., Aboagye-Nimo E. (Eds.). Procs 31st Annual ARCOM Conference, 7–9 September 2015, Lincoln, UK. Association of Researchers in Construction Management, 2015. P. 1093–1102.

32. Руднєва І., Прядко Ю., Прядко М. Аналіз причин обвалення покрівель виробничих будівель. Будівельні конструкції. Теорія і практика, 2020. № 6. С. 85–93.

33. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. [Чинні від 01.01.2007]. Вид. офіц. Київ: Мінбуд України, 2006. 75 с.

34. ДСТУ Б В.2.7-224:2009. Бетони. Правила контролю міцності. [Чинний від 09.01.2010]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 23 с.

35. Топчий В. Д., Гребенник Р. А., Черненко В. К. та ін. Реконструкция промышленных предприятий: справочник строителя: в 2 т. Т. 1. Москва: Стройиздат, 1990. 591 с.

36. Топчий В. Д., Гребенник Р. А., Черненко В. К. та ін. Реконструкция промышленных предприятий: справочник строителя: в 2 т. Т. 2. Москва: Стройиздат, 1990. 623 с.

37. ДСТУ-Н Б В.2.6-203:2015. Настанова з виконання робіт при виготовленні та монтажі будівельних конструкцій. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2015.

38. Балицкий В. С., Файвусович А. С., Тонкачєєв Г. М. та ін. Методические рекомендации по технологии усиления металлических конструкций на реконструируемых объектах. Киев: НИИСП Госстроя СССР, 1984. 58 с.

39. Будинок профспілок у м. Києві: проєкт реконструкції. URL: <https://fenixgroup.ua/uk/projects/house-of-trade-unions/>

40. Т Типовые конструкции, изделия и узлы зданий и сооружений. Серия ИИ-04. Железобетонные каркасы многоэтажных общественных зданий. Москва: ЦНИИЭП, 1968. 156 с.

41. Типовые конструкции, изделия и узлы зданий и сооружений. Серия ИИ-20. Железобетонные каркасы промышленных и общественных зданий. Москва: Стройиздат, 1972. 184 с.

42. Типовые конструкции, изделия и узлы зданий и сооружений. Серия 1.020. Унифицированные железобетонные каркасы многоэтажных зданий. Москва: Госстрой СССР, 1984. 240 с.

43. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. [Чинні від 01.06.2011]. Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2011. 71 с.

44. Мурашко Л. А. Железобетонные конструкции многоэтажных зданий. Москва: Высшая школа, 1990. 384 с.

45. Типовая серия 1.420.2. Усиление стальных конструкций промышленных зданий. Москва: ЦНИИПСК им. Мельникова, 1987. 168 с.

46. Zhang W. H., Lu D. G., Qin J. et al. Value of information analysis in civil and infrastructure engineering: a review. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 2021. Vol. 2. Article 16. DOI: <https://doi.org/10.1186/s43065-021-00027-0>

47. Рекомендации по усилению железобетонных конструкций зданий и сооружений под нагрузкой в условиях реконструкции. Киев: НИИСП Госстроя УССР, 1990. 60 с.

48. Балицкий В. С., Черненко В. К., Тонкачев Г. Н. та ін. Технология усиления строительных конструкций на реконструируемых предприятиях: РСН 342-86. Київ: НИИСП Госстроя УССР, 1987. 182 с.

49. Методические рекомендации по усилению железобетонных конструкций зданий и сооружений (на основе анализа и обобщения

существующего опыта). Харьков: Госстрой СССР, Главпромстройпроект, СоюзметаллургстройНИИпроект, Харьковский ПромстройНИИпроект, НИИСП Госстроя УССР, НИИЖБ, 1984. 203 с.

50. Eurocode 0: Basis of structural design. ENV 1990:2002+A1. Brussels: CEN, 2002. 116 p.

51. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2012. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні правила. Проектування конструкцій з урахуванням впливу пожежі. [Чинний від 01.07.2013]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2013.

52. ДБН В.2.2-3:2014. Будинки та споруди. Реконструкція та капітальний ремонт. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014.

53. Куліков П. М., Плоский В. О., Гетун Г. В. Архітектура будівель та споруд: у 5 кн. Кн. 5. Промислові будівлі: підручник / за ред. Г. В. Гетуна. Кам'янець-Подільський: Рута, 2020. 816 с.

54. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Дії під час пожежі. [Чинний від 01.07.2011]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011.

55. Руднева І., Прядко Ю., Прядко М., Тонкачєєв Г. Особливості та перспективи використання технологій підсилення будівельних конструкцій композиційними матеріалами при реконструкції споруд. Будівельні конструкції. Теорія і практика, 2020. № 7. С. 12–22. DOI: 10.32347/2522-4182.7.2020.12-22.

56. Прядко М. В., Руднева І. М., Прядко Ю. М. Обстеження та підсилення будівельних конструкцій промислових будівель: навч. посіб. Київ: КНУБА, 2018. 332 с.

57. Akao Y. Quality function deployment: integrating customer requirements into product design. Cambridge, MA: Productivity Press, 1990. 369 p.

58. Kasaei A., Abedian A., Milani A. An application of quality function deployment method in engineering materials selection. Materials and Design, 2014. Vol. 55. P. 912–920. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.10.061.

59. Prasad K., Chakraborty S. A quality function deployment-based model for materials selection. *Materials and Design*, 2013. Vol. 49. P. 523–535. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.01.035.
60. Cavallini C., Giorgetti A., Citti P., Nicolaie F. Integral aided method for material selection based on quality function deployment and comprehensive VIKOR algorithm. *Materials and Design*, 2013. Vol. 47. P. 27–34. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.12.009.
61. Zhang F., Yang M., Liu W. Using integrated quality function deployment and theory of innovation problem solving approach for ergonomic product design. *Computers and Industrial Engineering*, 2014. Vol. 76. P. 60–74. DOI: 10.1016/j.cie.2014.07.019.
62. Chan L. K., Wu M. L. A systematic approach to quality function deployment with a full illustrative example. *Omega*, 2005. Vol. 33, № 2. P. 119–139.
63. Lai X., Xie M., Tan K. C., Yang B. Ranking of customer requirements in a competitive environment. *Computers and Industrial Engineering*, 2008. Vol. 54. P. 202–214.
64. Голышев А. Б., Кривошеев П. И., Козелецкий П. М. Усиление несущих железобетонных конструкций производственных зданий и просадочных оснований. Киев: Логос, 2004. 219 с.
65. Клименко Є. В. Технічна експлуатація і реконструкція будівель та споруд: навч. посіб. Київ: Центр навчальної літератури, 2004. 280 с.
66. Stewart M. G., Mullard J. A. Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage and the timing of first repair for RC structures. *Engineering Structures*, 2007. Vol. 29, № 7. P. 1457–1464.
67. Рекомендации по обследованию стальных конструкций производственных зданий. Москва: ЦНИИПроектстальконструкция им. Мельникова, 1988. 54 с.
68. ДСТУ-Н Б В.2.1-28:2013. Настанова щодо проведення земляних робіт та улаштування основ і спорудження фундаментів. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2013.

69. ДСТУ Б В.3.1-2:2016. Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд. [Чинний від 04.01.2017]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 68 с.

70. ISO 21931-1:2022. Sustainability in buildings and civil engineering works — Framework for methods of assessment of the environmental, social and economic performance of construction works as a basis for sustainability assessment. Part 1: Buildings.

71. Тонкачєєв Г. М., Хохрякова Д. О., Руднєва І. М., Шандра О. Г. Проєктування технології підсилення рам каркасних будівель: метод. вказівки. Київ: КНУБА, 2023. 36 с.

72. Білик А. С. Екологічний та економічний аналіз життєвого циклу каркасів будівель: монографія. Київ: УЦСБ, КНУБА, 7БЦ, 2022. 263 с.

73. Барзилович Д., Лагунова І., Бардасова І., Буравченко С., Нечепорук А., Медведчук О., Марушева О., Колесник В. Зелена книга. Системний перегляд ефективності державного регулювання. Параметричне нормування у будівництві [Електронний ресурс]. Київ, 2020. 91 с. URL: https://cdn.regulation.gov.ua/c6/ba/18/d2/regulation.gov.ua_Parametrychne-normuvannia-Construction.pdf (дата звернення: 18.04.2026).

74. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012. Єврокод 2. Проєктування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні правила. Проєктування конструкцій з урахуванням впливу пожежі. [Чинний від 01.07.2013]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2013.

75. Priadko I. N., Rudnieva I. N., Ribakov Y., Bartolo H. A new approach to the design of suspension roof systems. Strength of Materials and Theory of Structures. Kyiv: KNUBA, 2020. Issue 104. P. 191–220.

76. ДСТУ EN 1090-1:2014. Виконання сталевих і алюмінієвих конструкцій. Частина 1. Вимоги до оцінки відповідності компонентів конструкцій. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014.

77. Молодід О. С., Руднєва І. М., Богдан С. М. Експериментальне дослідження підсилення металевих конструкцій зовнішнім армуванням методом

наклеювання високоміцних композитних вуглецевих матеріалів (FRP). Дороги і мости. Київ: ДП «ДерждорНДІ», 2021. Вип. 24. С. 84–96. DOI: 10.36100/dorogimosti2021.24.084.

78. Савйовский В. В., Овчинников О. Э., Левченко Р. В. Технологические особенности замены конструкций в стесненных условиях реконструкции. Нові технології в будівництві, 2016. № 31. С. 3–8. URL: <https://docplayer.com/46474621-Novi-tehnologiyi-v-budivnictvi-31-2016-udk-69-057.html> (дата звернення: 18.04.2026).

79. Тугай О. А., Гарнець В. М., Баглай В. А. та ін. Технічний нагляд за будівництвом і безпечною експлуатацією будівель та інженерних споруд: навч. посіб. / за ред. О. А. Тугая, В. М. Гарнеця. Київ: Хай-Тек Прес, 2011. 448 с.

80. Балук І. М. Оптимальне проектування реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Львів: Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2016. URL: <https://old.lpnu.ua/research/disscoun/d-3505217/baluk-igor-myroslavovych> (дата звернення: 18.04.2026).

81. Лівінський О. М., Курок О. І., Єсипенко А. Д., Дудар І. Н., Тонкачєєв Г. М., Бондаренко В. І., Гридякін В. О., Хоменко О. Г., Ананєва Т. В., Потапова Т. Е., Прилипко Т. В. Технологія зведення будівель і споруд: підручник. Київ: МП «Леся», 2014. 360 с.

82. Яо Сінъ. Просторова робота, міцність і деформативність реконструйованих залізобетонних балкових прольотних будов, підсиленіх зміною статичної схеми: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Львів: Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2023. URL: <https://ena.lpnu.ua/items/4deebc34-2728-456b-a04c-37471eebc61c> (дата звернення: 18.04.2026).

83. Хохрякова Д. О. Вибір методів підсилення залізобетонних колон в умовах реконструкції діючих промислових підприємств: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Київ, 2008. URL: https://revolution.allbest.ru/construction/00586633_0.html (дата звернення: 18.04.2026).

84. Boscato G. Numerical analysis and experimental tests on dynamic behaviour of GFRP pultruded elements for conservation of the architectural and environmental heritage: PhD dissertation. Venice: University Iuav of Venice, 2009.

85. ДСТУ Б В.2.7-220:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю. [Чинний від 09.01.2010]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 20 с.

86. Vehvilainen I., Vanhanen J. Sustainability in a historic context – Case Bulevardi 6 in Central Helsinki. Helsinki: Gaia Consulting Oy, 2012.

87. Attaianese E. A broader consideration of human factor to enhance sustainable building design. *Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation*, 2012. Vol. 41. P. 2155–2159. DOI: 10.3233/WOR-2012-1020-2155.

88. ISO 13822:2010. Bases for design of structures – Assessment of existing structures. Geneva: International Organization for Standardization, 2010. 44 p.

89. CNR-DT 203/2006. Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars. Rome: CNR, 2007. 39 p.

90. ISO 16711:2021. Seismic assessment and retrofit of concrete structures – Requirements. Geneva: International Organization for Standardization, 2021. 45 p.

91. ISO 28841:2013. Simplified seismic assessment and rehabilitation of concrete buildings. Geneva: International Organization for Standardization, 2013. 38 p.

92. ISO 5091-1:2023. Structural intervention of existing concrete structures using cementitious materials. Part 1: General principles. Geneva: International Organization for Standardization, 2023. 52 p.

93. fib Bulletin 102. Guide for protection and repair of concrete structures. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2023. 120 p. ISBN 978-2-88394-164-0.

94. ACI 440.2R-17. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2017. 92 p.

95. RILEM TC 243-SGM. Guidelines for assessment and strengthening of existing concrete structures. Cham: Springer, 2019.

96. ISO 20887:2020. Sustainability in buildings and civil engineering works – Design for disassembly and adaptability. Geneva: International Organization for Standardization, 2020.

97. Rudnieva I., Priadko I., Tonkacheiev H., Priadko N. Investigation of the effectiveness of strengthening with FRP applied in metal elements of suspension roof: an analytical approach. *Strength of Materials and Theory of Structures*. Kyiv: KNUBA, 2021. Issue 107. P. 170–183.

98. Rudnieva I. Comparative analysis of strengthening of building structures (masonry, metal structures, reinforced concrete) using FRP materials and traditional methods during reconstruction. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2020. Issue 105. P. 267–291. DOI: 10.32347/2410-2547.2020.105.267-291.

99. Tonkacheiev H. M., Molodid O. S., Galinskyi O. M., Plokhuta R. O., Rudnieva I. M., Priadko I. M. The technology of crack repair by polymer composition. *Strength of Materials and Theory of Structures*. Kyiv: KNUBA, 2022. Issue 108. P. 203–216.

100. ДСТУ 9273:2024. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2024.

101. Building solutions for structural reinforcement [Electronic resource]. URL: <https://fibrenet.it/en/building/> (дата звернення: 18.04.2026).

102. Zerbo V., Di Tommaso A., Ceriolo L. FRP strengthening systems for metallic structures: a state of the art. *Structural Analysis of Historical Constructions*. London: Taylor & Francis Group, 2005. URL: <http://www.hms.civil.uminho.pt/sahc/2004/891.pdf> (дата звернення: 18.04.2026).

103. Peña-Mora F., Golparvar-Fard M., Fukuchi Y., Savarese S. D4AR – 4D augmented reality models for as-built visualization and automated progress monitoring of civil infrastructure projects. In: Makanae K., Yabuki N., Kashiya K. (Eds.). *Proceedings of the 10th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR 2010)*. 2010. P. 15–21.

104. Golparvar-Fard M., Peña-Mora F., Savarese S. Application of D4AR – a 4-dimensional augmented reality model for automating construction progress monitoring data collection, processing and communication. *ITcon*, 2009. Vol. 14. P. 129–153.
105. Motzko C., Maffini S. Aufbau eines Informationssystems zur Leistungsfeststellung im Brückenbau – „Neue Svinesundbrücke“ in Schweden. *Tiefbau*, 2004. № 11. P. 692–696.
106. Podbreznik P., Rebolj D. Automatic comparison of site images and the 4D model of the building. In: *Bringing ITC knowledge to work. Proceedings of the 24th W78 Conference*. CIB, 2007.
107. Podbreznik P., Rebolj D. Real-time activity tracking system – the development process. In: *Bringing ITC knowledge to work. Proceedings of the 24th W78 Conference*. CIB, 2007.
108. Cronhjort Y., Le Roux S. Building modernization and urban infill development in the Finnish context: a state of the art study of sustainability assessment frameworks. *Proceedings of IFME2012 World Congress on Municipal Engineering*. Helsinki, 2012.
109. Miller E., Buys L. Retrofitting commercial office buildings for sustainability: tenants' perspectives. *Journal of Property Investment and Finance*, 2008. Vol. 26, № 6. P. 552–561. DOI: 10.1177/1938965511409031.
110. ДСТУ Б В.2.7-226:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності. [Чинний від 09.01.2010]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 27 с.
111. Bagasi O., Nawari N. O., Alsaffar A. BIM and AI in early design stage: advancing architect–client communication. *Buildings*, 2025. Vol. 15, № 12. Article 1977. DOI: 10.3390/buildings15121977.
112. Zareian F., Krawinkler H. Structural design for performance: decision support at the conceptual design stage. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2012. Vol. 41, № 3. P. 439–451. DOI: 10.1002/eqe.1122.

113. Park J., Lee D. H., Choi E. Decision support system for seismic retrofit prioritization of buildings. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2009. Vol. 5, № 5. P. 389–400. DOI: 10.1080/15732470701852891.

114. Hughes A., Spencer B. F., Dyke S. J., Kim J. H. A Bayesian network approach to structural risk assessment and decision-making [Electronic resource]. arXiv preprint, 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2106.02835> (дата звернення: 18.04.2026).

115. Morato P., Andriotis C., Giannakis K., Mykoniatis K. Bayesian deep reinforcement learning for condition-based maintenance decision-making in degrading systems [Electronic resource]. arXiv preprint, 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2212.02105> (дата звернення: 18.04.2026).

116. Jato-Espino, Daniel & Castillo-Lopez, Elena & Rodriguez-Hernandez, Jorge & Canteras-Jordana, Juan. A review of application of multi-criteria decision making methods in construction. *Automation in Construction*, 2014). 45. 151–162. 10.1016/j.autcon.2014.05.013.

117. Yun Z. Decision support system for material selection of building frames considering economic, environmental and structural sustainability: Master's thesis. Singapore: National University of Singapore, 2013. 109 p. URL: <https://scholarbank.nus.edu.sg/> (дата звернення: 18.04.2026).

118. Su L., He H. Decision-tree-based seismic damage prediction and reinforcement suggestions for RC buildings. *Advances in Structural Engineering*, 2019. Vol. 22, № 3. P. 759–773. DOI: 10.1177/1369433218799940.

119. Haroglu H. Decision-making processes in frame structure selection: a design–build perspective: PhD dissertation. Loughborough: Loughborough University, 2010. 278 p. URL: <https://repository.lboro.ac.uk/> (дата звернення: 18.04.2026).

120. Vašak M. Disruptive technologies, circular economy and the building industry in the Danube area. *Interreg Danube*, 2025. URL: <https://interreg-danube.eu/projects/circular-digibuild/library> (дата звернення: 18.04.2026).

121. Digitaler Gebäuderessourcenpass [Electronic resource]. URL: <https://concular.de/gebauderessourcenpass/> (дата звернення: 18.04.2026).

122. Kewazo [Electronic resource]. URL: <https://www.kewazo.com/> (дата звернення: 18.04.2026).

123. Züblin [Electronic resource]. URL: <https://www.zueblin.de/> (дата звернення: 18.04.2026).

124. Schüco [Electronic resource]. URL: <https://www.schueco.com/com> (дата звернення: 18.04.2026).

125. PERI [Electronic resource]. URL: <https://www.peri.de/> (дата звернення: 18.04.2026).

126. ДСТУ ISO 15686-5:2020. Будівлі та об'єкти нерухомого майна. Планування строку експлуатації. Частина 5. Оцінювання вартості життєвого циклу (ISO 15686-5:2017, IDT). Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 101 с. URL: https://uscc.ua/uploads/page/images/normativnye%20dokumenty/bim/dstu-ISO-15686_5.pdf (дата звернення: 18.04.2026).

127. ДСТУ ISO 15686-8:2020. Будівлі та об'єкти нерухомого майна. Планування терміну служби. Частина 8. Нормативний термін служби та обчислення терміну служби. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020.

128. fib Bulletin 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2001.

129. НПАОП 45.2-1.12-01. Правила безпеки при реконструкції будівель і споруд промислових підприємств. Київ: Міністерство праці та соціальної політики України, 2001. 55 с.

130. ISO 15392:2019. Sustainability in buildings and civil engineering works – General principles. Geneva: International Organization for Standardization, 2019. 24 p. URL: <https://www.iso.org/standard/69947.html> (дата звернення: 18.04.2026)

131. EN 1991:2002. Eurocode 1. Actions on structures. Brussels: European Committee for Standardization, 2002.

132. EN 1993-1-3:2006. Eurocode 3. Design of steel structures. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.

133. EN 1998-3:2005. Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.

134. DGNB. German sustainable building certificate. Handbook. English edition. Stuttgart: German Sustainable Building Council, 2009.

135. BREEAM. BREEAM Europe Commercial 2009 assessor manual. SD 5066A: Issue 1.1 [Electronic resource], 2012. URL: https://tools.breeam.com/filelibrary/Technical%20Manuals/BREEAM_Europe_Commercial_2009.pdf (дата звернення: 18.04.2026).

136. ISO 21929-1:2011. Sustainability in building construction – Sustainability indicators. Part 1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings. Geneva: International Organization for Standardization, 2011.

137. ISO 15686-1:2021. Buildings and constructed assets – Service life planning. Part 1: General principles and framework. Geneva: International Organization for Standardization, 2021. 64 p. URL: https://uscc.ua/uploads/page/images/normativnye%20dokumenty/bim/dstu-ISO-15686_1.pdf (дата звернення: 18.04.2026).

138. ДБН В.1.2-12:2008. Система надійності та безпеки у будівництві. Будівництво в умовах ущільненої забудови. Вимоги безпеки. [Чинний від 01.01.2009]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. 34 с.

139. ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008 (EN 1990:2002, IDT). Система надійності та безпеки у будівництві. Настанова. Основи проектування конструкцій. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 81 с.

140. Про внесення змін до Закону України «Про будівельні норми» щодо удосконалення нормування у будівництві: Закон України. Відомості Верховної Ради України, 2019. № 46. Ст. 304. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/156-20#Text> (дата звернення: 18.04.2026).

141. ДСТУ 9171:2025. Настанова щодо забезпечення сталого використання природних ресурсів під час проектування споруд. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2025. 68 с.

142. BS 8544:2013. Guide for life cycle costing of maintenance during the in-use phases of buildings. London: British Standards Institution, 2013.

143. ДСТУ Б EN 13791:2013 (EN 13791:2007, IDT). Оцінка міцності бетону на стиск у конструкціях і збірних бетонних елементах. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2013.
144. Bloszies C. Old buildings, new design: architectural transformations. New York: Princeton Architectural Press, 2012. ISBN 978-1-61689-035-3.
145. Petlíková K., Jarský Č. Modeling of the time structure of construction processes using neural networks. *Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal*, 2017. Vol. 9. P. 1559–1564. DOI: 10.1515/otmcj-2016-0018.
146. ISO 15686-2:2012. Buildings and constructed assets – Service life planning. Part 2: Service life prediction procedures. Geneva: International Organization for Standardization, 2012.
147. Noroozinejad Farsangi E., Noori M., Gardoni P., Takewaki I., Varum H., Bogdanovic A. Reliability-based analysis and design of structures and infrastructure. Boca Raton: CRC Press, 2022. 521 p.
148. Тугай О. А. Система адаптації організації будівництва до євростандартів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.08. Харків: ХДТУБА, 2008. 33 с.
149. Білоконь А. І. Організаційно-технологічні аспекти обґрунтування якісного і кількісного складу будівельних машин для реконструкції: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.08. Харків: ХДТУБА, 1998. 35 с.
150. Черненко В. К., Осипов О. Ф., Тонкачєєв Г. М. Технологія монтажу будівельних конструкцій: навч. посіб. Київ: КНУБА, 2010. 372 с.
151. Гончаренко Д. Ф. Строительство и реконструкция стадионов: монография / Д. Ф. Гончаренко та ін. Харків: Колорит, 2013. 351 с.
152. Гончаренко Д. Ф. Методы формирования инженерной подготовки реконструкции промышленных предприятий: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.08. Москва: МИСИ, 1991. 495 с.
153. Гончаренко Д. Ф. Организационно-технологические системы надежности временных параметров реконструкции предприятий машиностроения. Київ: УМК ВО, 1990. 56 с.

154. Єсипенко А. Д. Наукові основи забезпечення надійності і безпечної експлуатації будівель та споруд: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.08. Дніпро: ДВНЗ «ПДАБА», 2007. 40 с.
155. Кравчуновська Т. С. Розвиток наукових основ організаційно-технологічного проектування комплексної реконструкції житлової забудови: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.08. Дніпро: ДВНЗ «ПДАБА», 2011. 33 с.
156. Менеїлюк А. І., Дорофєєв В. С., Лукашенко Л. Є. та ін. Сучасні технології в будівництві. 3-тє вид., доповн. і переробл. Київ: Освіта України, 2011. 534 с.
157. Коряшкіна Л. С. Моделі й методи прийняття рішень: навч. посіб. Дніпро: НГУ, 2014. 300 с.
158. Григоровський П. Є., Молодід О. С., Плохута Р. О. Підсилення балочних конструкцій зовнішнім армуванням методом наклеювання високоміцних тканин. Будівельне виробництво, 2016. № 61 (1). С. 13–18.
159. Kang T. H. K., Kim W., Ha S. S. et al. Hybrid effects of carbon-glass FRP sheets in combination with or without concrete beams. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2014. Vol. 8. P. 27–41.
160. Kibert C. J. Sustainable construction. Proceedings of the First International Conference of CIB TG 16 on Sustainable Construction, Tampa, Florida, USA, 6–9 November 1994.
161. American Institute of Steel Construction. Steel construction manual. 16th ed. Chicago: AISC, 2020.
162. Lanier B. K. Study in the improvement in strength and stiffness capacity of steel multi-sided monopole towers utilizing carbon fiber reinforced polymers as a retrofitting mechanism: M.S. thesis. Raleigh: North Carolina State University, 2005.
163. Cadei J. M. C., Stratford T. J., Hollaway L. C., Duckett W. G. Strengthening metallic structures using externally bonded fibre-reinforced polymers. Report CIRIA C595. London: CIRIA, 2004.
164. Di Tommaso A., Focacci F., Micelli F. Strengthening historical masonry with FRP or FRCM: trends in design approach. Key Engineering Materials, 2017. Vol. 747. P. 166–174. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.747.166

165. Täljsten B. FRP strengthening of existing concrete structures – design guidelines. 4th ed. Luleå: Luleå University of Technology, 2006. ISBN 91-89580-03-6.
166. Capani F., D’Ambrisi A., De Stefano M., Nudo R., Focacci F., Luciano R., Penna R. Experimental investigation on cyclic response of RC elements repaired by CFRP external reinforcing systems. *Composites Part B: Engineering*, 2017. Vol. 112. P. 290–299.
167. Григоровський П. Є., Надточій М. І. Класифікація та оцінка умов ущільненої забудови. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. Київ: КНУБА, 2012. № 28. С. 175–180.
168. Jones K., Sharp M. A new performance-based process model for built asset maintenance. *Facilities*, 2007. Vol. 25, № 13–14. P. 525–535.
169. Млодецкий В. Р. Управленческая реализуемость строительных проектов. Дніпро: Наука і освіта, 2005. 261 с.
170. Радкевич А. В. Системотехнічні аспекти організаційно-технологічних рішень відновлення об’єктів транспортного комплексу: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.08. Дніпро: ДВНЗ «ПГАСА», 2006. 35 с.
171. Черненко В. К., Єрмоленко М. Г., Батура Г. М. та ін. Технологія будівельного виробництва: підручник / за ред. В. К. Черненка, М. Г. Єрмоленка. Київ: Вища школа, 2002. 430 с.
172. Meijer F., Visscher H. Quality control of constructions: European trends and developments. *International Journal of Law in the Built Environment*, 2017. Vol. 9. P. 143–161.
173. Baiburin A. Civil engineering quality assessment in terms of construction safety index. *Procedia Engineering*, 2017. Vol. 206. P. 800–806.
174. Park Y. J., Yi C. Y. Resource-based quality performance estimation method for construction operations. *Applied Sciences*, 2021. Vol. 11. Article 4122.
175. Ferrari I., Opazo-Vega A., Pulido-Arcas J. A. Construction 4.0: a literature review. *Sustainability*, 2020. Vol. 12, № 22. Article 9755. DOI: 10.3390/su12229755.
176. Колесніченко С. В., Селютін Ю. В., Черних І. Ю., Мнацаканян К. Б. Методологія призначення індексу надійності β для визначення технічного стану

будівельних сталевих конструкцій. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин, 2020. № 43. С. 86–95.

177. Руднєва І. М. Механізми впровадження Lean-технологій як інноваційного підходу при моделюванні структури визначення норми часу на виконання будівельних процесів. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин, 2021. № 47. С. 26–36.

178. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. [Чинний від 04.01.2017]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 44 с.

179. ДСТУ Б В.2.6-210:2016. Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються. [Чинний від 01.01.2017]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2016. 80 с.

180. Руднєва І. М. Управління інвестиційними ризиками та енергоефективність з урахуванням капітальних і операційних витрат у промисловому девелопменті. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин, 2020. № 46. С. 56–64.

181. Modelling the renovation of buildings in Europe from a circular economy and climate perspective. European Environment Agency, 2022. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/building-renovation-where-circular-economy/modelling-the-renovation-of-buildings/view> (дата звернення: 18.04.2026).

182. Heinonen J., Säynäjoki A., Junnila S. A longitudinal study on the carbon emissions of a new residential development. Sustainability, 2011. Vol. 3, № 8. P. 1170–1189. DOI: 10.3390/su3081170.

183. Smith S. F., Becker M. A. Scheduling and visualization: final technical report. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2004. URL: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA424933&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf> (дата звернення: 18.04.2026).

184. Brand S. How buildings learn: what happens after they're built. London: Penguin, 1995. ISBN 978-1-101-56264-2.

185. BS EN 15978. Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method. London: British Standards Institution.

186. EN 1504-10:2017. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Part 10: Application of products and systems and quality control of the works. Brussels: European Committee for Standardization, 2017.

187. Дмитренко Є. А., Почтар Н. В. Основні типи дефектів і пошкоджень залізобетонних конструкцій транспортних споруд, причини їх виникнення. Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури, 2016. Вип. 3 (119). С. 134–138.

188. Riley M., Cotgrave A. Construction technology 3: the technology of refurbishment and maintenance. London: Palgrave Macmillan, 2011. 360 p.

189. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p.

190. Addis B., Schouten J. Design for reconstruction: principles of design to facilitate reuse and recycling. London: CIRIA, 2004.

191. Руфферт Г. Дефекты бетонных конструкций / пер. с нем. И. Г. Зеленцова ; под ред. В. Б. Семенова. Москва: Стройиздат, 1987. 111 с.

192. EN 1504-9:2008. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Part 9: General principles for the use of products and systems. Brussels: European Committee for Standardization, 2008.

193. Wang N. Civil structures and infrastructure systems: from reliability to resilience. Cambridge: Woodhead Publishing (Elsevier), 2025. 260 p.

194. Крушельницька Я. В. Фізіологія і психологія праці: навч. посіб. Київ: КНЕУ, 2000. 232 с.

195. Modarres M., Kaminskiy M., Krivtsov V. Reliability engineering and risk analysis: a practical guide. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. 464 p.

196. Барашиков А. Я., Малишев О. М. Оцінювання технічного стану будівель та інженерних споруд: навч. посіб. Київ: КНУБА, 2008. 320 с.

197. Клименко В. З., Белов І. Д. Випробування конструкцій, обстеження та моніторинг будівель і споруд: підручник. Київ: Кондор, 2015. 571 с.

198. ДСТУ EN ISO 5817:2022 (EN ISO 5817:2014, IDT). Зварювання. Зварні з'єднання сталей, нікелю, титану та їх сплавів (крім променевого зварювання). Рівні якості за дефектами. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022.

199. Xia J. et al. Prediction of corrosion-induced crack width of corroded reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, 2014. Vol. 69. P. 1–9.

200. ISO 15686-7:2017. Buildings and constructed assets – Service life planning. Part 7: Performance evaluation for feedback of service life data from practice. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.

201. Руднєва І. М. Технологічні особливості підсилення металевих конструкцій методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем при реконструкції. Будівельні конструкції. Теорія і практика, 2021. № 8. С. 32–43. DOI: 10.32347/2522-4182.8.2021.32-43.

202. Shaat A., Fam A. Slender steel columns strengthened using high-modulus CFRP plates for buckling control. *Journal of Composites for Construction*, 2009. Vol. 13, № 1. P. 2–12. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2009)13:1(2).

203. Hollaway L. C., Teng J. G. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites. Cambridge: Woodhead Publishing, 2008. 448 p. ISBN 978-1-84569-448-7.

204. CNR-DT 202/2005. Guidelines for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. Metallic structures. Rome: CNR, 2007. 57 p.

205. Hu W. Integration of radio-frequency identification and 4D CAD in construction management. *Tsinghua Science and Technology*, 2008. Vol. 13, Issue S1. P. 151–157.

206. ISO 21928-2:2023. Sustainability in buildings and civil engineering works – Sustainability indicators. Part 2: Framework for the development of indicators for civil engineering works. Geneva: International Organization for Standardization, 2023.

207. ISO 2394:2015. General principles on reliability for structures. Geneva: International Organization for Standardization, 2015.

208. ISO 16311:2014. Maintenance and repair of concrete structures. Geneva: International Organization for Standardization, 2014.

209. Monaldo E., Nerilli F., Vairo G. Effectiveness of some technical standards for debonding analysis in FRP-concrete systems. *Composites Part B: Engineering*, 2019. Vol. 160. P. 254–267. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.10.022.

210. Chen J. F., Teng J. G. Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding. *Construction and Building Materials*, 2003. Vol. 17, No. 1. P. 27–41. DOI: 10.1016/S0950-0618(02)00087-0.

211. Cattaneo S., Vafa N. Tensile capacity of adhesive anchors in damaged masonry. *Applied Sciences*, 2021. Vol. 11, No. 21. Article 10135. DOI: 10.3390/app112110135.

212. Satoh T. et al. Fracture mechanisms and effect of load-bearing capacity reduction of post-installed adhesive anchors in concrete. *Structural Concrete*, 2023. DOI: 10.1002/2475-8876.12401.

213. Tarawneh A. Sensitivity of adhesive anchors embedded in thin concrete members. *ACI Structural Journal*, 2020. Vol. 117, No. 3. P. 311–322.

214. Buyukozturk O. et al. A review of strengthening of concrete structures with FRP composites. *Composites Part B: Engineering*, 2014. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.08.014.

215. Jumaat M. Z., Alam M. A. A review of plate-bonded strengthening of reinforced concrete beams: failure modes and premature debonding. *International Journal of the Physical Sciences*, 2011.

216. Руднева И.Н., Прядко Ю.Н. Сравнительный анализ Еврокодов и национальных стандартов Украины, в том числе частных коэффициентов надежности и учета фактора времени при проектировании конструкций. *Науково-виробничий журнал «Промислове будівництво та інженерні споруди»*, 2020. № 1. С. 39–45.

217. ДБН А.1.1-94:2010. Проектування будівельних конструкцій за Єврокодами. Основні положення. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010.

218. ISO/TR 16475:2011. Guidelines for the repair of concrete structures. Geneva: International Organization for Standardization, 2011.

219. ISO 19208:2016. Framework for specifying performance in buildings. Geneva: International Organization for Standardization, 2016. 25 p.

220. ASTM E917-02:2002. Standard practice for measuring life-cycle costs of buildings and building systems. West Conshohocken: ASTM International, 2002.

221. Ostermeyer Y., Wallbaum H., Reuter F. Multidimensional Pareto optimization as an approach. International Journal of Life Cycle Assessment, 2013. Vol. 18. P. 1762–1779. DOI: 10.1007/s11367-013-0548-6.

222. U.S. Green Building Council. LEED v4.1 reference guide for building design and construction. Washington, DC: USGBC, 2023. URL: <https://www.usgbc.org/leed> (дата звернення: 18.04.2026).

223. ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment. Principles and framework. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.

224. ISO 15686-3:2002. Buildings and constructed assets – Service life planning. Part 3: Performance audits and reviews. Geneva: International Organization for Standardization, 2002.

225. International charter for the conservation and restoration of monuments and sites (The Venice Charter). Venice, 1964.

226. ICOMOS. Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage. Paris: ICOMOS, 2003.

227. ДСТУ-Н Б EN 1990:2008 (EN 1990:2002, IDT). Єврокод. Основи проектування конструкцій. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2008. 81 с.

228. ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

229. ISO 13824:2009. Bases for design of structures – General principles on risk assessment of systems involving structures. Geneva: International Organization for Standardization, 2009.

230. ISO 10006:2017. Quality management – Guidelines for quality management in projects. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.

231. Про регулювання містобудівної діяльності: Закон України від 17.02.2011 № 3038-VI. Відомості Верховної Ради України, 2011. № 34. Ст. 343. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17> (дата звернення: 18.04.2026).

232. ДСТУ ISO 14001:2015 (ISO 14001:2015, IDT). Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015.

233. Кошторисні норми України. Настанова з визначення вартості проектних, науково-проектних, вишукувальних робіт та експертизи проектної документації на будівництво: наказ від 01.11.2021 № 281. Київ: Мінрегіон України, 2021.

234. Черненко В. К., Баранников В. Ф. Технология и организация монтажа строительных конструкций. Київ: Будівельник, 1988. 276 с.

235. Черненко В. К., Осипов О. Ф., Тонкачєєв М. Г., Осипов С. О. та ін. Технологія монтажу будівельних конструкцій: підручник / за ред. В. К. Черненка. 2-ге вид. Київ: Горобець, 2011. 371 с.

236. Родіонцев А. Б. Технологія реставрації керамічних великорозмірних елементів облицювання фасадів багатопверхових будинків: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.08. Київ: Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт., 2002. 360 с.

237. Douglas J. Building adaptation. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. 380 p.

238. ДБН А.3.2-2:2009. Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. Вид. офіц. Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2009. 122 с.

239. ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

240. Koskela L. An exploration towards a production theory and its application to construction. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 2000. 296 p.

241. Ballard G., Howell G. The last planner system of production control. Lean Construction Journal, 2003.

242. ДСТУ EN ISO 17640:2022 (EN ISO 17640:2018, IDT; ISO 17640:2018, IDT). Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Методи, рівні контролювання та оцінювання. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022.

243. Косенков Е. Д., Тонкачєв Г. М., Шевцова Н. М. Факторы, влияющие на выбор средств подмащивания для процессов усиления строительных конструкций. Новые технологические решения для строительной промышленности Донбасса. Київ: УМК ВО, 1989. С. 69–75.

244. Тонкачєв Г. М., Шевцова Н. М. Подвесные подмости для реконструкции коксовых батарей. Вісник ДНАБА. Макіївка, 1997.

245. ДСТУ Б В.2.1-30:2014. Ґрунти. Методи вимірювання деформацій основ будинків і споруд. [Чинний від 07.01.2015]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2015. 33 с.

246. ДБН В.1.3-2:2010. Геодезичні роботи у будівництві. [Чинний від 09.01.2010]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 70 с.

247. ДБН А.2.2-3:2014. Склад та зміст проектної документації на будівництво. [Чинний від 01.10.2014]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014. 36 с.

248. A guide to scaffold use in the construction industry. Small business safety management series. Washington, DC: U.S. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration, 2002. 73 p. URL: <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/osha3150.pdf> (дата звернення: 18.04.2026).

249. Priadko I. N., Mushchanov V. P., Bartolo H., Rudnieva I. N., Vatin N. I. Improved numerical methods in reliability analysis of suspension roof joints. Magazine of Civil Engineering, 2016. No. 5. P. 27–41. DOI: 10.5862/MCE.65.3.

250. Ellis G. 100 construction industry statistics to improve productivity [Electronic resource], 2018. URL: <https://blog.plangrid.com/2018/08/construction-industry-statistics-to-improve-productivity/> (дата звернення: 18.04.2026).

251. What is BIM? [Electronic resource]. URL: <https://www.autodesk.com/solutions/bim> (дата звернення: 18.04.2026).

252. Руднева І. М. Застосування лазерного сканування для моніторингу стану будівель та споруд при реконструкції. Трансфер інноваційних технологій: матеріали VII міжнар. наук.-практ. конф., 19–20 трав. 2021 р., Київ – Дортмунд – Нур-Султан – Дзянсу. Київ: КНУБА, 2021. С. 19–22. URL: <https://tit-conference.jimdofree.com/conferences/2021/> (дата звернення: 18.04.2026).

253. 3D laser scanning for chemical plant applications [Electronic resource]. URL: <https://hivevp.com/3d-laser-scanning-for-chemical-plant-applications/> (дата звернення: 18.04.2026).

254. Liker J. K. The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer. New York: McGraw-Hill, 2004.

255. Единые нормы и расценки на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы. Общая часть. Москва: Стройиздат, 1987. 25 с.

256. ДСТУ Б А.3.1-22:2013. Визначення тривалості будівництва об'єктів. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014. 30 с.

257. Introduction to MTM & MOST – advanced methodologies [Electronic resource]. URL: <https://cronometras.com/en/blog/introduction-to-mtm-most-advanced-methodologies/> (дата звернення: 18.04.2026).

258. Golabchi A., Han S. U., AbouRizk S. M. Integration of predetermined motion time systems into simulation modeling of manual construction operations. Proceedings of the 5th International / 11th Construction Specialty Conference, 8–10 June 2015, Vancouver, Canada. Edmonton: University of Alberta, 2015. 7 p.

259. ДБН А.3.1-5:2016. Організація будівельного виробництва. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2016. 61 с.

260. ДСТУ Б Д.1.1-1:2013. Правила визначення вартості будівництва. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2013.

261. Патент України № 149077 У. Спосіб підсилення висячих металевих конструкцій наскрізного перерізу методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем. Опубл. 13.10.2021, Бюл. № 41.

262. Triantafillou T. C., Deskovic N. Innovative prestressing with FRP sheets: mechanics of short-term behavior. Journal of Engineering Mechanics, 1991. Vol. 117, No. 7. P. 1652–1672.

263. Triantafillou T. C., Deskovic N., Deuring M. Strengthening of concrete structures with prestressed fiber reinforced plastic sheets. *ACI Structural Journal*, 1992. Vol. 89, No. 3. P. 235–244.

264. Freund J., Rücker B. *Praxishandbuch BPMN. Mit Einführung in DMN. 6., aktualisierte Auflage.* München: Hanser, 2019.

265. Кушніров П. В., Євтухов А. В., Дегтярьов І. М. Системно-структурне моделювання технологічних процесів і систем: навч. посіб. Суми: Сумський державний університет, 2023. 134 с.

266. Kostogryzov A. *Probabilistic modeling in system engineering.* London: IntechOpen, 2018. 290 p.

267. Abdelal G, Abulfoutouh N, Gad A. Stochastic finite element and satellite structure design. In: *Finite Element Analysis for Satellite Structures.* London: Springer; 2013. pp. 203-249

268. ГОСТ 12.2.018-79. Система стандартів безпеки праці. Будівництво. Методи дослідження трудових процесів. Москва: Стандартінформ, 1979.

269. Kohler N., König H., Kreissig J., Lutzkendorf T. A life cycle approach to buildings: principles, calculations, design tools. Berlin: Walter de Gruyter, 2010. ISBN 978-3-9200034-45-4.

270. Womack J. P., Jones D. T. *Lean thinking: banish waste and create wealth in your corporation.* London: Free Press Business, 1996.

271. Про Державний бюджет України на 2026 рік: Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення: 18.04.2026).

272. Nikakhtar A., Hosseini A. A., Wong K. Y., Zavichi A. Application of lean construction principles to reduce construction process waste using computer simulation: a case study. *International Journal of Services and Operations Management*, 2015. Vol. 20, No. 4. P. 461–480.

273. Ціноутворення у будівництві: збірник офіційних документів та роз'яснень / редкол.: І. М. Сіренко та ін. Київ: Інпроект, 1994— . Періодичне видання.

274. Leach L. P. *Lean project management: eight principles for success.* USA: Advanced Projects Inc., 2005.

275. Weber B., Rudnieva I. Common assessment study for the preparedness and needs for innovations in construction industry in Danube area [Electronic resource]. Interreg Danube, 2024. URL: <https://interreg-danube.eu/projects/circular-digibuild/library> (дата звернення: 18.04.2026).

276. BIM Industry Working Group. Building information modelling (BIM) working party strategy paper: a report for the Government Construction Client Group. London: Cabinet Office, 2011.

277. BIM level 4 of maturity in AECO is metaverse [Electronic resource]. URL: <https://bim6d.eu/2022/10/16/level-4-metaverse/> (дата звернення: 18.04.2026).

278. Merker D. J. Lean construction implementation: case study [Electronic resource]. San Luis Obispo: California Polytechnic State University, 2015. URL: <https://digitalcommons.calpoly.edu/cmssp/210> (дата звернення: 18.04.2026).

279. Akers P. 2 second lean: how to grow people and build a lean culture. Washington: FastCap Press, 2016. 158 p. URL: https://paulakers.net/wp-content/uploads/dlm_uploads/2015/12/2SL-3rd-20170403.pdf (дата звернення: 18.04.2026).

280. Методичні положення щодо визначення вартості будівництва [Electronic resource]. URL: <https://uscc.ua/uploads/page/6036557bc3bf0.pdf> (дата звернення: 18.04.2026).

281. Senaratne S., Wijesiri D. Lean construction as a strategic option: testing its suitability and acceptability in Sri Lanka. Lean Construction Journal, 2008. P. 34–48.

282. Maas G., van Gassel F. The influence of automation and robotics on the performance of construction. Automation in Construction, 2005. Vol. 14. P. 435–441.

283. van Gassel F., Maas G. Mechanising, robotising and automating construction processes, 2008. DOI: 10.5772/5859.

284. Yilmaz Ş. E., Metin B. On-site robotic technologies in building construction, 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/332866835_On-Site_Robotic_Technologies_in_Building_Construction (дата звернення: 18.04.2026).

285. Rudnieva I. M. A conceptual model for quality assessment of frame strengthening during building reconstruction. Strength of Materials and Theory of

Structures: Scientific-and-technical collected articles. Kyiv: KNUBA, 2026. Issue 116. P. 425-432. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2026.116.425-432>

286. Rudnieva I. M. Analysis of improper use of materials and strengthening systems in structural rehabilitation. Будівельні конструкції. Теорія і практика, 2026. № 18. P. 64-77. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.18.2026.64-77>.

287. Love P. E. D. Influence of project type and procurement method on rework costs in building construction projects. Journal of Construction Engineering and Management, 2002. Vol. 128, No. 1. P. 18–29.

288. Josephson P. E., Hammarlund Y. The causes and costs of defects in construction: a study of seven building projects. Automation in Construction, 1999. Vol. 8, No. 6. P. 681–687.

289. Al-Sudairi A. A. Evaluating the effect of construction process characteristics on the applicability of lean principles. Construction Innovation: Information, Process, Management, 2007. Vol. 7, No. 1. P. 99–121.

290. Ang A. H.-S. Life-cycle considerations in risk-informed decisions for design of civil infrastructures. Structure and Infrastructure Engineering, 2011. Vol. 7, No. 1–2. P. 3–9. DOI: 10.1080/15732471003588239.

291. Ellingwood B. R., Lee J. Y. Life cycle performance goals for civil infrastructure: intergenerational risk-informed decisions. Structure and Infrastructure Engineering, 2016. Vol. 12, No. 7. P. 822–829. DOI: 10.1080/15732479.2015.1064966.

292. Ang A. H.-S., De Leon D. Modeling and analysis of uncertainties for risk-informed decisions in infrastructure engineering. Structure and Infrastructure Engineering, 2005. Vol. 1, No. 1. P. 19–31. DOI: 10.1080/15732470412331289350.

293. Dowling N. E. Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. 4th ed. Harlow: Pearson Education, 2013. 936 p.

294. Beer F. P., Johnston E. R. Mechanics of materials. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2011. 912 p.

295. World Green Building Council. Green buildings and the Sustainable Development Goals. – URL: <https://www.worldgbc.org> (дата звернення: 18.04.2026).

ДОДАТОК А

Матриці норм витрат праці для різних моделей конструктивно-технологічних рішень

$M_{KT2.1}$ – встановлення додаткових опорних елементів для розвантаження конструкції (рис.А.1). Без обмеження корисного простору під балкою.

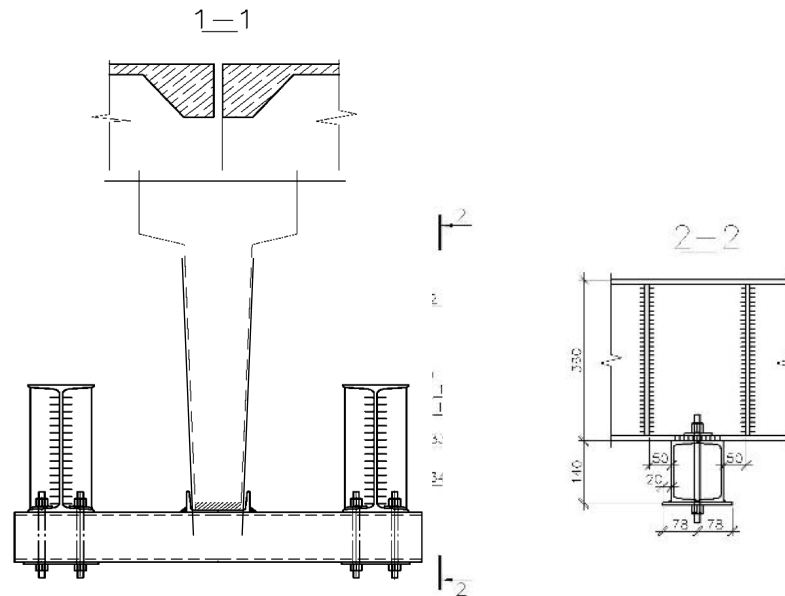


Рис.А.1. Підведення розвантажуючих двотаврових балок під залізобетонну балку покриття [55]

Операція «Виготовлення елементів підсилення» розкладається на наступий комплекс дій (Табл. А.1):

$W_{3.1}$ – доставка матеріалів для підсилення до місця;

$W_{3.2}$ – перевірка відповідності матеріалів проєкту;

$W_{3.3}$ – збирання та здача монтажних механізмів;

$W_{3.4}$ – виготовлення елементів підсилення балки з двотаврів, підтримуваних швелерами;

$W_{3.5}$ – маркування елементів підсилення балки;

$W_{3.6}$ – виготовлення елементів обійми колон (куточки);

$W_{3.7}$ – виготовлення елементів обійми колон (накладки);

$W_{3.8}$ – виготовлення елементів опорних плит-консолей (900x210x10) з підтримуючими косинками;

$W_{3.9}$ – маркування елементів обойми колони;

$W_{3.10}$ – маркування елементів опорних плит-консоль.

$W_{3.11}$ – розбивка місць і пробивка 8 отворів ($\varnothing 50$ мм) у покритті в місцях встановлення лебідок;

$W_{3.12}$ – установка 4 лебідок для монтажу балок;

$W_{3.13}$ – контроль якості.

Таблиця А.1

Матриця складових норми витрат праці на виготовлення елементів підсилення

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	0,5	1	2	3	4	5	6	7			
$W_{3.1}$								6	42	2	84
$W_{3.2}$								4	28	1	28
$W_{3.3}$								5	35	2	70
$W_{3.4}$							12		64	2	128
$W_{3.5}$		8							8	1	8
$W_{3.6}$		16							16	2	32
$W_{3.7}$		32							32	2	64
$W_{3.8}$			11						22	2	44
$W_{3.9}$	40								20	1	20
$W_{3.10}$	11								6	1	6
$W_{3.11}$			8				8		64	1	64
$W_{3.12}$						8			40	2	80
$W_{3.13}$			24						48	1	48
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 676 * 1,2 / 1 = 14,0$ люд-год/ балку											676

* суміщення можливе для дій: $W_{2.2}$, $W_{2.3}$.

Операція «Встановлення елементів підсилення» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.2):

$W_{4.1}$ – доставка елементів до місця встановлення;

$W_{4.2}$ – приготування цементно-піщаного розчину на розширювальному цементі механічним способом

$W_{4.3}$ – нанесення шпателем розчину;

$W_{4.4}$ – монтаж кутиків обойми колон і закріплення хомутами;

$W_{4.5}$ – монтаж кутиків обойми колон;

$W_{4.6}$ – встановлення і приварювання накладок;

W_{4.7} – заповнення решти простору між обоймою й колоною (виконати зачеканку між обоймою та колоною розчином, щоб забезпечити їх спільну роботу);

W_{4.8} – стропування опорних плит-консолей

W_{4.9} – підйом опорних плит-консолей

W_{4.10} – встановлення елементів опорних плит-консолей (900x210x10) з підтримуючими косинками;

W_{4.11} – розстропування опорних плит-консолей;

W_{4.12} – стропування балок з двотаврів;

W_{4.13} – підйом двотаврів у проектне положення;

W_{4.14} – вирівнювання та закріплення балок болтами. Відрегулювати положення балки за допомогою підкладок, після чого закріпити її болтовими з'єднаннями;

W_{4.15} – розстропування балок;

W_{4.16} – підйом опорних швелерів;

W_{4.17} – монтаж опорних швелерів;

W_{4.18} – коригування прогину балок для включення їх в роботу. За допомогою болтів або металевих клинів створити необхідний прогин балок підсилення для їх включення у загальну роботу конструкції.

Операція «Завершальні роботи» розкладається на наступий комплекс дій (Табл. А.3):

W_{5.1} – очистка зварних швів;

W_{5.2} – контроль якості зварних швів;

W_{5.3} – контроль правильності виконання прогину балок;

W_{5.4} – зачищення та фарбування;

W_{5.5} – закладка 8 отворів і відновлення покрівлі;

W_{5.6} – демонтаж тимчасових конструкцій (риштувань, стійок, лебідок, підмостей тощо);

W_{5.7} – остаточне прибирання.

Таблиця А.2

Матриця складових норми витрат на встановлення елементів підсилення

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{4.1}$								6	42	2	84
$W_{4.2}$							4		28	1	28
$W_{4.3}$								5	35	2	70
$W_{4.4}$				12					64	2	128
$W_{4.5}$						16			64	2	128
$W_{4.6}$	192	32							224	2	448
$W_{4.7}$								8	64	1	64
$W_{4.8}$				10					40	2	80
$W_{4.9}$					1				5	2	10
$W_{4.10}$						5			30	2	60
$W_{4.11}$			10						30	2	60
$W_{4.12}$						4			24	2	48
$W_{4.13}$					1				24	2	48
$W_{4.14}$						6			36	2	72
$W_{4.15}$								6	36	2	72
$W_{4.16}$						4			32	2	64
$W_{4.17}$			12						36	2	72
$W_{4.18}$								4	32	2	64
$H_{hw} = 0,01667 * \Sigma Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 1600 * 1,2 / 1 = 32,0$ люд-год/ балку											1600

* суміщення можливе для дій: $W_{2.2}$, $W_{2.3}$.

Таблиця А.3

Матриця складових норми витрат на завершальні роботи

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{5.1}$							6		42	2	84
$W_{5.2}$							5		35	2	70
$W_{5.3}$				7					28	1	28
$W_{5.4}$		21							42	2	84
$W_{5.5}$							5		35	2	70
$W_{5.6}$							7		49	2	98
$W_{5.7}$		16							32	2	64
$H_{hw} = 0,01667 * \Sigma q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 434 * 1,2 / 1 = 8,68$ люд-год/ балку											434

* суміщення можливе для дій: $W_{5.1}$, $W_{5.2}$; $W_{5.4}$, $W_{5.5}$.

$M_{KT2.2}$ – Додавання проміжної опори для зміни конструктивної схеми. З обмеженням корисного простору під балкою.

Операція «Виготовлення елементів підсилення» розкладається на наступий комплекс дій (Табл. А.4):

$W_{3.1}$ – доставка матеріалів для улаштування фундаменту та для підсилення до місця;

$W_{3.2}$ – перевірка відповідності матеріалів проєкту;

$W_{3.3}$ – збирання та здача монтажних механізмів;

$W_{3.4}$ – виготовлення елементів проміжної стійки (база, верхня опорна частина);

$W_{3.5}$ – маркування елементів проміжної опори;

$W_{3.6}$ – зварювання проміжної опори з базою і верхньою опорною частиною;

$W_{3.7}$ – виготовлення елементів закладних деталей фундаменту (опорна плита з коротишами арматури);

$W_{3.8}$ – зварювання елементів закладних деталей фундаменту (опорна плита з коротишами арматури);

$W_{3.9}$ – встановлення лебідки для монтажу елементів підсилення;

$W_{3.10}$ – розмітка місця розташування фундаменту під проміжну опору;

$W_{3.11}$ – розбирання підлоги;

$W_{3.12}$ – риття котловану для фундаменту під проміжну опору;

$W_{3.13}$ – приготування цементно-піщаного розчину для бетонування фундаменту;

$W_{3.14}$ – бетонування фундаменту під проміжну опору;

$W_{3.15}$ – розмітка та встановлення опорної плити з коротишами арматури на фундамент;

$W_{3.16}$ – контроль якості.

Операція «Встановлення елементів підсилення» розкладається на наступий комплекс дій (Табл. А.5):

$W_{4.1}$ – доставка елементів до місця встановлення;

$W_{4.2}$ – встановлення підмостей із огородженнями;

$W_{4.3}$ – розмітка місць встановлення елементів підсилення;

$W_{4.4}$ – стропування проміжної опори під балку;

$W_{4.5}$ – підйом проміжної опори;

$W_{4.6}$ – тимчасове закріплення проміжної опори до існуючої балки.

$W_{4.7}$ – рихтування проміжної опори під балку;

$W_{4.8}$ – тимчасове закріплення проміжної опори до фундаменту;

$W_{4.9}$ – за допомогою металевих клинів добитись включення проміжної опори в роботу;

$W_{4.10}$ – остаточне закріплення проміжної опори у верхній частині та на фундаменті болтами або шляхом зварюванням;

$W_{4.11}$ – розстропування опорних елементів;

$W_{4.12}$ – контроль монтажного положення.

Таблиця А.4

Матриця складових норми витрат праці на виготовлення елементів підсилення

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{3.1}$						6			30	2	60
$W_{3.2}$						4			20	1	20
$W_{3.3}$						5			25	2	50
$W_{3.4}$							15		90	2	180
$W_{3.5}$	20								10	1	10
$W_{3.6}$						12			60	2	120
$W_{3.7}$							10		60	2	120
$W_{3.8}$						4			20	1	20
$W_{3.9}$						6			30	2	60
$W_{3.10}$						5			25	1	25
$W_{3.11}$						4			20	2	40
$W_{3.12}$							5		30	1	30
$W_{3.13}$						3			15	1	15
$W_{3.14}$							5		30	2	60
$W_{3.15}$						8			40	2	80
$W_{3.16}$						4			20	1	20
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 910 * 1,2 / 1 = 18,2$ люд-год/ балку											910

* Суміщення можливе для дій: $W_{3.1}$, $W_{3.3}$, $W_{3.9}$; $W_{3.5}$, $W_{3.7}$, $W_{3.8}$.

Операція «Завершальні роботи» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.6):

$W_{5.1}$ – очистка зварних швів;

$W_{5.2}$ – контроль якості зварних швів;

$W_{5.3}$ – контроль прогину балки;

$W_{5.4}$ – зачищення та фарбування;

$W_{5.5}$ – демонтаж тимчасових конструкцій (риштувань, стійок, лебідок, підмостей тощо);

$W_{5.6}$ – остаточне прибирання.

Таблиця А.5

Матриця складових норми витрат на встановлення елементів підсилення

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{4.1}$						10			50	2	100
$W_{4.2}$							15		90	2	180
$W_{4.3}$						8			40	2	80
$W_{4.4}$							20		120	2	240
$W_{4.5}$								15	105	3	315
$W_{4.6}$							20		120	3	360
$W_{4.7}$							14		84	3	252
$W_{4.8}$							14		84	3	252
$W_{4.9}$							17		102	3	306
$W_{4.10}$							30		180	4	720
$W_{4.11}$						8			40	2	80
$W_{4.12}$	1	3					4				35
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 2920 * 1,2 / 1 = 58,4$ люд-год/ балку											2920

* Суміщення можливе для дій: $W_{4.1}$, $W_{4.2}$; $W_{4.4}$, $W_{4.5}$; $W_{4.6}$, $W_{4.8}$.

Таблиця А.6

Матриця складових норми витрат на завершальні роботи

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{5.1}$					4				20	2	40
$W_{5.2}$					9				45	1	45
$W_{5.3}$					3				15	2	30
$W_{5.4}$					10				50	2	100
$W_{5.5}$					9				45	2	90
$W_{5.6}$					6				30	2	60
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 365 * 1,2 / 1 = 7,3$ люд-год/ балку											365

* Суміщення можливе для дій: $W_{5.1}$, $W_{5.2}$; $W_{5.5}$, $W_{5.6}$.

$M_{КТ4}$ – Підведення нових конструкцій та введення додаткових елементів.

Встановлення додаткових підтримуючих балок та консольних елементів, які

працюють на підсилення основної конструкції та перерозподіл навантажень (рис. А.2).

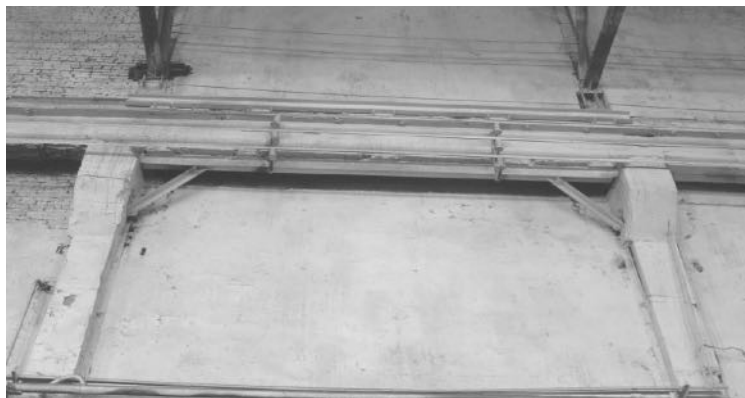
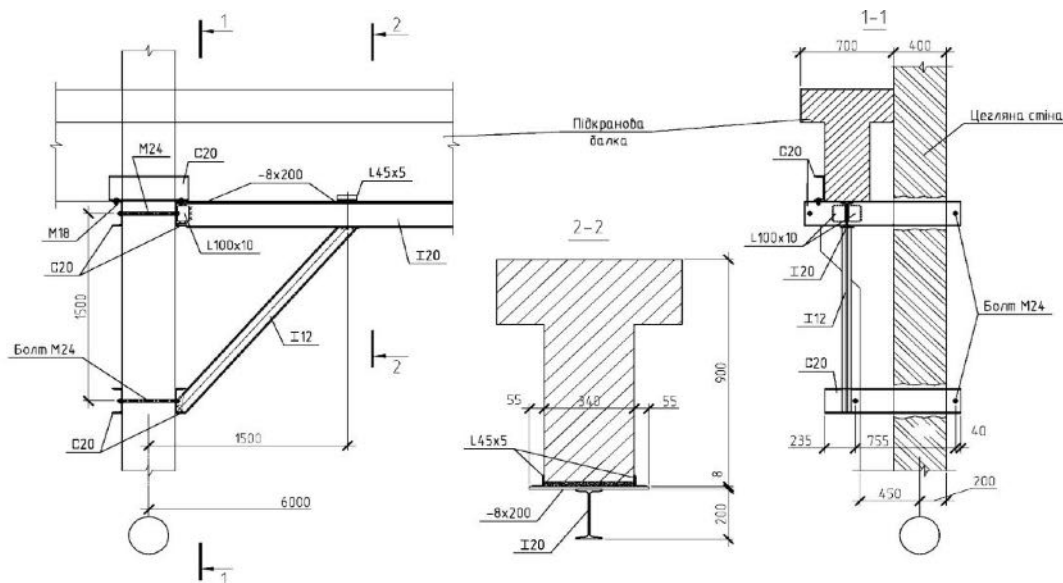


Рис. А.2. Підсилення залізобетонної підкранової балки підведенням прокатного профілю і консольних елементів. ВАТ «Донецькгірмаш» [56]

Операція «Виготовлення елементів підсилення» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.7):

$W_{3.1}$ – доставка матеріалів для підсилення до місця;

$W_{3.2}$ – перевірка відповідності матеріалів проєкту;

$W_{3.3}$ – збирання та здача монтажних механізмів;

$W_{3.4}$ – Виготовлення елементів підсилення балки з двотавру;

$W_{3.5}$ – маркування конструкцій підсилення балки;

$W_{3.6}$ – виготовлення підтримувальних швелерів для кріплення підсилюючих елементів до колони (5 шт на одну колону, на дві - 10 шт);

$W_{3.7}$ – маркування підтримувальних швелерів колон;

$W_{3.8}$ – виготовлення елементів консолей з двотаврів;

$W_{3.9}$ – маркування конструкцій консолей;

$W_{3.10}$ – розбивка місць і пробивка 4 отворів ($\varnothing 50$ мм) у покритті в місцях встановлення лебідок;

$W_{3.11}$ – встановлення двох лебідок для монтажу балок підсилення;

$W_{3.12}$ – контроль якості.

Таблиця А.7

Матриця складових норми витрат праці на виготовлення елементів підсилення

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	0,5	1	2	3	4	5	6	7			
$W_{3.1}$								6	42	2	84
$W_{3.2}$								4	28	1	28
$W_{3.3}$							4		24	2	48
$W_{3.4}$							5		30	2	60
$W_{3.5}$		2									
$W_{3.6}$					10				40	2	40
$W_{3.7}$		10							10	1	10
$W_{3.8}$					2				8	2	16
$W_{3.9}$		2							2	1	2
$W_{3.10}$			4				4		32	1	32
$W_{3.11}$						4			20	2	40
$W_{3.12}$			12						24	1	24
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 424 * 1,2 / 1 = 8,48$ люд-год/ балку											424

Операція «Встановлення елементів підсилення» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.8):

$W_{4.1}$ – доставка елементів до місця встановлення;

$W_{4.2}$ – розбивка місць встановлення елементів для кріплення підсилюючих елементів до колони та стіни;

$W_{4.3}$ – влаштування отвору у стіні для монтажу підтримувальних швелерів його вирівнювання отвору, очищення;

W_{4.4} – буріння 8 отворів в з.б. колоні під затягувальні болти;

W_{4.5} – стропування швелерів колон та з'єднувальних швелерів;

W_{4.6} – приготування цементно-піщаного розчину на розширювальному цементі механічним способом;

W_{4.7} – нанесення шпателем розчину на стінки отвору;

W_{4.8} – підйом швелерів;

W_{4.9} – заведення швелерів в отвори з розчином у стіні;

W_{4.10} – сверління отворів під болти в швелерах та виконання монтажу швелерів до колон з закріпленням болтами М24 з затягуванням;

W_{4.11} – розстропування швелерів колон;

W_{4.12} – заповнення решти простору між швелерами й стіною (виконати зачеканку між швелерами та стіною розчином, щоб забезпечити їх спільну роботу);

W_{4.13} – сверління отворів під болти в з'єднувальних верхніх швелерах та підтримувальних швелерах;

W_{4.14} – монтаж верхніх з'єднувальних швелерів болтами до підтримувальних швелерів

W_{4.15} – розстропування з'єднувальних швелерів;

W_{4.16} – стропування основної балки підсилення з двотавру;

W_{4.17} – підйом балки підсилення та її встановлення в проєктне положення на опорах;

W_{4.18} – закріплення балки на опорах шляхом приварювання;

W_{4.19} – розстропування балки;

W_{4.20} – стропування консолей з двотаврів;

W_{4.21} – підйом консолей;

W_{4.22} – встановлення консолей в проєктне положення та їх приварювання до швелерів на колонах та балок підсилення;

W_{4.23} – розстропування консолей;

W_{4.24} – за допомогою металевих клинів (між підсилюваними балками та балками підсилення) досягти необхідного прогину балок підсилення для їх включення в роботу.

Таблиця А.8

Матриця складових норми витрат на встановлення елементів підсилення

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{4.1}$						4			24	2	48
$W_{4.2}$		8							16	2	32
$W_{4.3}$						40		56	688	2	1376
$W_{4.4}$								10	80	2	160
$W_{4.5}$						10			60	2	120
$W_{4.6}$			15						45	2	90
$W_{4.7}$					8				40	2	80
$W_{4.8}$					1				5	2	10
$W_{4.9}$				8					32	2	64
$W_{4.10}$		16		8					64	2	128
$W_{4.11}$		8							16	2	32
$W_{4.12}$							8		56	1	56
$W_{4.13}$		20	20						100	2	200
$W_{4.14}$				4					16	2	32
$W_{4.15}$		4							8	2	16
$W_{4.16}$						4			24	2	48
$W_{4.17}$					1				5	2	10
$W_{4.18}$		24							48	2	96
$W_{4.19}$		4							8	2	16
$W_{4.20}$					4				20	2	40
$W_{4.21}$					1				5	2	10
$W_{4.22}$	28								28	2	56
$W_{4.23}$									10	2	20
$W_{4.24}$								6	48	2	96
$H_{hw} = 0,01667 * \Sigma Q_{wi} * K_r / V_e = 0,01667 * 2836 * 1,2 / 1 = 56,7$ люд-год/ балку											2836

Операція «Завершальні роботи» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.9):

$W_{5.1}$ – очистка зварних швів від шлаку, окалини та забруднень після виконання зварювальних робіт;

$W_{5.2}$ – контроль якості зварних швів (візуальний огляд, перевірка на наявність дефектів, за потреби – неруйнівний контроль);

$W_{5.3}$ – контроль геометричних параметрів та правильності роботи підсиленої конструкції (перевірка положення елементів, відповідності проєкту, контроль прогину балки);

$W_{5.4}$ – зачищення поверхонь металоконструкцій та нанесення антикорозійного покриття (грунтування та фарбування);

$W_{5.5}$ – відновлення пошкоджених конструктивних елементів будівлі (закладення отворів, відновлення стін, підлоги або покриття в місцях виконання робіт);

$W_{5.6}$ – демонтаж тимчасових конструкцій і монтажних пристроїв (риштувань, підмостей, стійок, лебідок, страхувальних елементів тощо);

$W_{5.7}$ – остаточне прибирання робочої зони, вивезення відходів та підготовка об'єкта до подальшої експлуатації.

Таблиця А.9

Матриця складових норми витрат на завершальні роботи

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{5.1}$						6			42	2	84
$W_{5.2}$					5				35	1	35
$W_{5.3}$				4					20	1	20
$W_{5.4}$						7			49	2	98
$W_{5.5}$						5			35	2	70
$W_{5.6}$						8			56	2	112
$W_{5.7}$									26	1	26
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 445 * 1,2 / 1 = 8,9$ люд-год/ балку											445

* Суміщення можливе для дій: $W_{5.1}$, $W_{5.2}$; $W_{5.5}$, $W_{5.6}$.

M_{KT5} – Зміна конструктивної схеми конструкції. Підведення розвантажувальних порталних рам. Підведення розвантажувальних порталних рам із передачею навантаження безпосередньо на фундамент (рис. А.3) забезпечує перерозподіл зусиль та зменшення навантаження на існуючі конструкції. У цьому випадку балка спирається на підкоси, передаючи навантаження на наявні фундаменти.

Операція «Виготовлення елементів підсилення» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.10):

$W_{3.1}$ – доставка матеріалів для підсилення до місця;

$W_{3.2}$ – перевірка відповідності матеріалів проєкту;

$W_{3.3}$ – збирання та здача монтажних механізмів;

$W_{3.4}$ – виготовлення елементів підсилення балки (підкоси, елементи з'єднання, опорні башмаки);

$W_{3.5}$ – маркування елементів підсилення (підкоси, елементи з'єднання, опорні башмаки);

$W_{3.6}$ – виготовлення елементів підсилення балки (балка-опора, опорні елементи під балку);

$W_{3.7}$ – маркування елементів підсилення балки (балка-опора, опорні елементи під балку);

$W_{3.8}$ – встановлення двох лебідок для монтажу елементів підсилення;

$W_{3.9}$ – контроль якості.

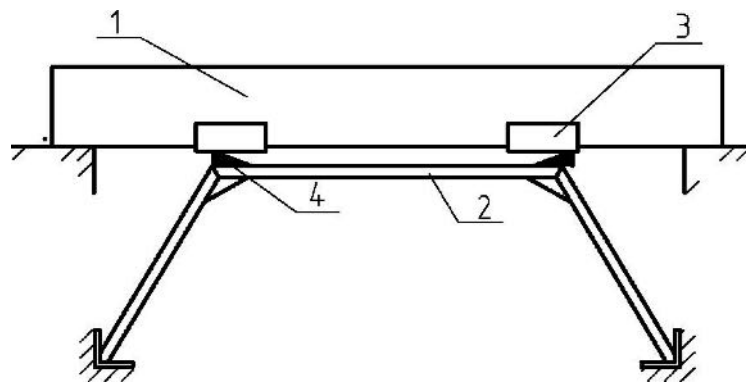


Рис. А.3. Підведення розвантажувальних порталних рам: 1 – балка, яку підсилюють; 2 – додаткові опори у вигляді порталної рами; 3 – опорні елементи зі швелера; 4 – металеві клини для включення рами в роботу [56]

Операція «Встановлення елементів підсилення» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.11):

$W_{4.1}$ – доставка елементів до місця встановлення;

$W_{4.2}$ – розмітка місць встановлення елементів підсилення;

$W_{4.3}$ – стропування опорних елементів під балку;

$W_{4.4}$ – підйом опорних елементів;

$W_{4.5}$ – закріплення опорних елементів зі швелеру знизу існуючої балки (хомутами з металу до залізобетонної балки або приварюванням до металевої);

$W_{4.6}$ – розстропування опорних елементів;

$W_{4.7}$ – стропування балки-опори;

$W_{4.8}$ – підйом балки-опори;

$W_{4.9}$ – закріплення опорних елементів до балки опори;

$W_{4.10}$ – розстропування балки-опори;

$W_{4.11}$ – встановлення і закріплення опорних башмаків під підкоси;

$W_{4.12}$ – стропування підкосів;

$W_{4.13}$ – встановлення і закріплення підкосів;

$W_{4.14}$ – розстропування підкосів;

$W_{4.15}$ – за допомогою металевих клинів досягти включення порталної рами в роботу разом з існуючим каркасом.

Операція «Завершальні роботи» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.12):

$W_{5.1}$ – очистка зварних швів;

$W_{5.2}$ – контроль якості зварних швів;

$W_{5.3}$ – контроль прогину балки;

$W_{5.4}$ – зачищення та фарбування;

$W_{5.5}$ – демонтаж тимчасових конструкцій (риштувань, лебідок, підмостей тощо);

$W_{5.6}$ – остаточне прибирання.

Таблиця А.10

Матриця складових норми витрат праці на виготовлення елементів підсилення

N_2 дій (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{3.1}$						6			42	2	84
$W_{3.2}$						4			28	1	28
$W_{3.3}$				4					24	2	48
$W_{3.4}$					28				280	2	560
$W_{3.5}$		10							20	2	40
$W_{3.6}$					24				240	2	480
$W_{3.7}$		15							30	1	30
$W_{3.8}$						10			80	2	160
$W_{3.9}$			10						30	1	30
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 1460 * 1,2 / 1 = 29,2$ люд-год/ балку											1460

* суміщення можливе для дій: $W_{3.1}$, $W_{3.3}$; $W_{3.5}$, $W_{3.7}$.

Таблиця А.11

Матриця складових норми витрат на встановлення елементів підсилення

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{4.1}$				4					24	2	48
$W_{4.2}$		10							20	1	20
$W_{4.3}$					4				20	2	40
$W_{4.4}$				4					20	2	40
$W_{4.5}$					18				90	2	180
$W_{4.6}$		8							8	2	16
$W_{4.7}$					4				20	2	40
$W_{4.8}$				4					20	2	40
$W_{4.9}$					12				60	2	120
$W_{4.10}$		8							8	2	16
$W_{4.11}$					12				60	2	120
$W_{4.12}$					4				20	2	40
$W_{4.13}$					24				120	2	240
$W_{4.14}$		10							10	2	20
$W_{4.15}$					22				110	2	220
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 1200 * 1,2 / 1 = 24,0$ люд-год/ балку											1200

* суміщення можливе для дій: $W_{4.3}$, $W_{4.4}$; $W_{4.7}$, $W_{4.8}$; $W_{4.12}$, $W_{4.13}$.

Таблиця А.12

Матриця складових норми витрат на завершальні роботи

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{5.1}$						6			42	2	84
$W_{5.2}$					7				35	1	35
$W_{5.3}$			10						30	1	30
$W_{5.4}$					14				70	2	140
$W_{5.5}$						14			98	2	196
$W_{5.6}$					10				50	2	100
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 585 * 1,2 / 1 = 11,7$ люд-год/ балку											585

* суміщення можливе для дій: $W_{5.1}$, $W_{5.2}$; $W_{5.5}$, $W_{5.6}$.

M_{KT7} – Використання композитних FRP-матеріалів шляхом наклеювання в зоні розтягу.

Підсилення балки здійснюється шляхом наклеювання вуглеволоконної стрічки на нижню (розтягнуту) зону елемента з використанням епоксидного клею (рис. А.4), що забезпечує підвищення несучої здатності та зменшення деформацій.

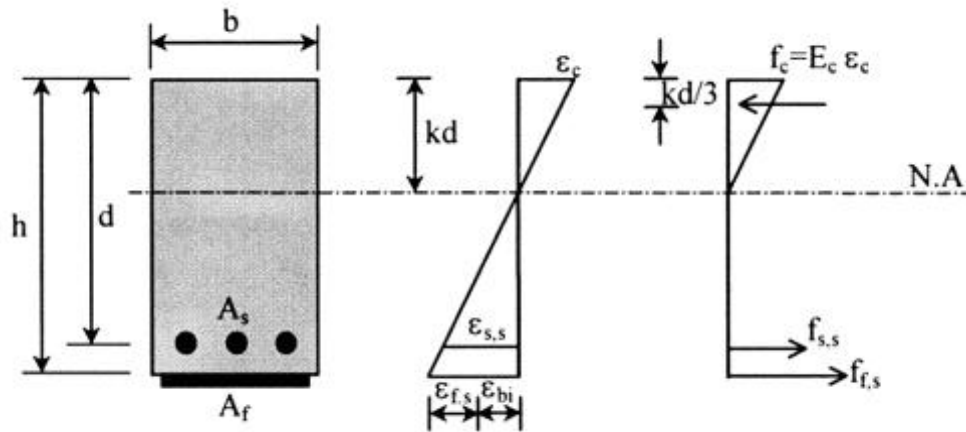


Рис. А.4. Підсилення балки шляхом наклеювання композитного матеріалу в зоні розтягу [89]

Операція «Виготовлення елементів підсилення» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.13):

$W_{3.1}$ – доставка матеріалів для підсилення до місця;

$W_{3.2}$ – перевірка відповідності матеріалів проекту;

$W_{3.3}$ – очищення поверхні балки;

$W_{3.4}$ – шліфування поверхні або фрезерування для створення шорсткості;

$W_{3.5}$ – видалення слабких шарів бетону (гідроструменеве очищення або піскоструменева обробка);

$W_{3.6}$ – знепилювання та знежирення;

$W_{3.7}$ – розкрій композитного матеріалу відповідно до розмірів ділянки підсилення;

$W_{3.8}$ – підготовка клею або епоксидної смоли з урахуванням адгезії до бетону;

$W_{3.9}$ – нанесення праймера;

$W_{3.10}$ – контроль якості.

Операція «Встановлення елементів підсилення» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.14):

$W_{4.1}$ – доставка елементів до місця встановлення;

$W_{4.2}$ – встановлення підмостей із огороженнями;

$W_{4.3}$ – розмітка місць встановлення елементів підсилення;

$W_{4.4}$ – стропування композитного елемента підсилення;

$W_{4.5}$ – підйом елемента підсилення;

$W_{4.6}$ – нанесення клею/смоли на поверхню бетону;

$W_{4.7}$ – укладання композиту та його прикочування для видалення повітряних включень;

$W_{4.8}$ – розстропування елемента підсилення.

$W_{4.9}$ – додаткове розрівнювання клейового шару;

$W_{4.10}$ – локальне виправлення положення стрічки;

$W_{4.11}$ – первинний візуальний контроль суцільності приклеювання.

Таблиця А.13

Матриця складових норми витрат праці на виготовлення елементів підсилення

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{3.1}$						6			42	2	84
$W_{3.2}$						4			28	1	28
$W_{3.3}$					8				40	2	80
$W_{3.4}$					10				50	2	100
$W_{3.5}$				6					24	2	48
$W_{3.6}$					6				30	2	60
$W_{3.7}$		6							12	1	12
$W_{3.8}$			8						24	2	48
$W_{3.9}$					5				25	2	50
$W_{3.10}$			5						15	1	15
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * K_r / V_e = 0,01667 * 625 * 1,2 / 1 = 12,5$ люд-год/ балку											625

* суміщення можливе для дій: $W_{3.1}$, $W_{3.2}$; $W_{3.7}$, $W_{3.8}$.

Операція «Завершальні роботи» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.15):

$W_{5.1}$ – контроль адгезії та міцності підсилення;

$W_{5.2}$ – нанесення захисного покриття (фарба, герметик, антикорозійний склад);

$W_{5.3}$ – демонтаж тимчасових конструкцій (риштувань, підмостей);

$W_{5.4}$ – остаточне прибирання.

Таблиця А.14

Матриця складових норми витрат на встановлення елементів підсилення

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{4.1}$				4					24	2	48
$W_{4.2}$					16				80	2	160
$W_{4.3}$					8				40	2	80
$W_{4.4}$		6							12	2	24
$W_{4.5}$		6							12	2	24
$W_{4.6}$					18				90	2	180
$W_{4.7}$						18			108	12	1296
$W_{4.8}$		4							8	2	16
$W_{4.9}$						4			24	2	48
$W_{4.10}$					5				25	1	25
$W_{4.11}$									9	1	9
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * K_r / V_e = 0,01667 * 1910 * 1,2 / 1 = 38,2$ люд-год/ балку											1910

* суміщення можливе для дій: $W_{4.4}$, $W_{4.5}$; $W_{4.6}$, $W_{4.7}$.

Таблиця А.15

Матриця складових норми витрат на завершальні роботи

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{5.1}$					9				45	1	45
$W_{5.2}$					10				50	2	100
$W_{5.3}$						8			56	2	112
$W_{5.4}$					8				40	2	80
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * K_r / V_e = 0,01667 * 305 * 1,2 / 1 = 6,1$ люд-год/ балку											305

* суміщення можливе для дій: $W_{5.1}$, $W_{5.2}$.

$M_{KT9.1}$ – Використання попередньо напружених тяжів, затягувань і відтягнень для підсилення балки. Підсилення здійснюється шляхом встановлення шарнірно-стержневих ланцюгів, які працюють аналогічно попередньо напруженим тяжам та затяжкам і забезпечують зменшення деформацій та підвищення несучої здатності балки (рис. А.5).

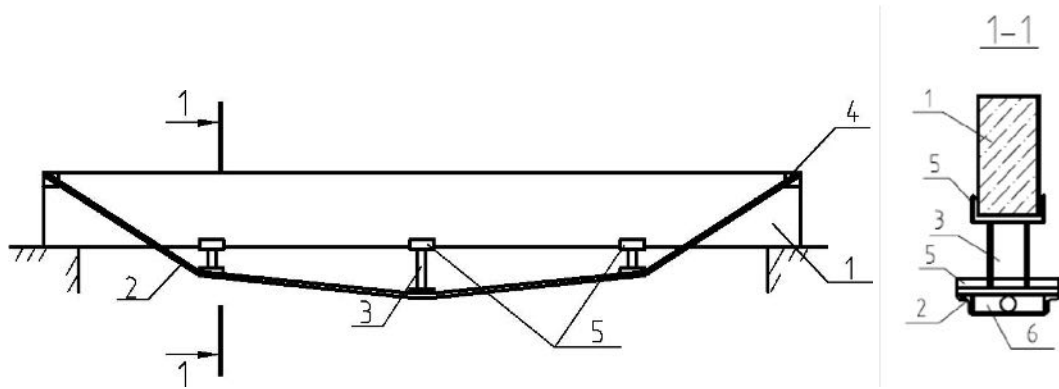


Рис. А.5. Установка шарнірно-стержневих ланцюгів: 1 – балка, яку підсилюють; 2 – шарнірно-стержневий ланцюг, що складається з двох кутиків або стержнів; 3 – стійки зі швелера або двотавра; 4 – опорний пристрій; 5 – опорні деталі зі швелера; 6 – пластина з отвором для підвішування натяжного вантажу [56]

Операція «Виготовлення елементів підсилення» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.16):

$W_{3.1}$ – доставка матеріалів для підсилення до місця;

$W_{3.2}$ – перевірка відповідності матеріалів проєкту;

$W_{3.3}$ – збирання та здача монтажних механізмів;

$W_{3.4}$ – Виготовлення шарнірно-стержневих ланцюгів (різання прутків різакон, 6 шт, Ø24-28мм);

$W_{3.5}$ – маркування ланцюгів;

$W_{3.6}$ – виготовлення стійок (двотаври, кутики, 6 шт);

$W_{3.7}$ – маркування стійок;

$W_{3.8}$ – виготовлення хомутів для кріплення на балки (3 шт);

$W_{3.9}$ – маркування хомутів;

$W_{3.10}$ – виготовлення шпильок для кріплення хомутів (Ø16мм, 6 шт);

$W_{3.11}$ – виготовлення траверс для стійок (3 шт);

$W_{3.12}$ – маркування траверс та шпильок;

$W_{3.13}$ – виготовлення опорних елементів ланцюгів до траверс (6 шт);

$W_{3.14}$ – маркування опорних елементів;

$W_{3.15}$ – приварка 6-ти опорних елементів до 3-х траверс;

$W_{3.16}$ – виготовлення фаркопів (2 шт);

$W_{3.17}$ – виготовлення опорних елементів кріплення ланцюгів;

$W_{3.18}$ – маркування фаркопів та опорних елементів кріплення ланцюгів;

$W_{3.19}$ – розбивка місць та пробивка 6 отворів ($\varnothing 50$ мм) у покритті в місцях встановлення хомутів;

$W_{3.20}$ – контроль якості.

Таблиця А.16

Матриця складових норми витрат праці на виготовлення елементів підсилення

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	0,5	1	2	3	4	5	6	7			
$W_{3.1}$		8							8	1	8
$W_{3.2}$		6							6	1	6
$W_{3.3}$			6						12	1	12
$W_{3.4}$								6	42	2	84
$W_{3.5}$	6								3	1	3
$W_{3.6}$			12						24	2	48
$W_{3.7}$	6								3	1	3
$W_{3.8}$						3			15	1	15
$W_{3.9}$	3								1,5	1	1,5
$W_{3.10}$		6							6	1	6
$W_{3.11}$						3			15	1	15
$W_{3.12}$	3								3	1	3
$W_{3.13}$		6							12	2	24
$W_{3.14}$	6								6	1	6
$W_{3.15}$			12						24	1	24
$W_{3.16}$					4				16	2	32
$W_{3.17}$				12					36	1	36
$W_{3.18}$	14								7	1	7
$W_{3.19}$		12							112	2	224
$W_{3.20}$			12						44	2	88
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 645,5 * 1,2 / 1 = 12,91$ люд-год/ балку											645,5

* суміщення (повне або часткове) можливе для дій: $W_{3.2}$, $W_{3.3}$; $W_{3.4}$, $W_{3.6}$, $W_{3.8}$, $W_{3.10}$; $W_{3.11}$, $W_{3.13}$, $W_{3.19}$; $W_{3.15}$, $W_{3.16}$, $W_{3.17}$; $W_{3.5}$, $W_{3.7}$, $W_{3.9}$, $W_{3.12}$; $W_{3.14}$, $W_{3.18}$.

Операція «Встановлення елементів підсилення» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.17):

$W_{4.1}$ – доставка елементів до місця встановлення;

$W_{4.2}$ – стропування опорних елементів кріплення ланцюгів у торцях балки;

- W_{4.3} – підйом опорних елементів кріплення ланцюгів;
- W_{4.4} – розстропування елементів кріплення ланцюгів;
- W_{4.5} – встановлення в проєктне положення опорних елементів кріплення ланцюгів;
- W_{4.6} – стропування елементів хомутів на балки;
- W_{4.7} – підйом елементів хомутів;
- W_{4.8} – розстропування елементів хомутів;
- W_{4.9} – установка елементів хомутів на балки та закріплення їх шпильками;
- W_{4.10} – стропування стійок;
- W_{4.11} – підйом стійок;
- W_{4.12} – розстропування стійок;
- W_{4.13} – приварювання стійок до хомутів;
- W_{4.14} – стропування траверс з опорними елементами і фаркопами;
- W_{4.15} – підйом траверс з опорними елементами і фаркопами;
- W_{4.16} – розстропування траверс, опорних елементів і фаркопів;
- W_{4.17} – встановлення і приварювання траверс з опорними елементами до стійок;
- W_{4.18} – стропування шарнірно-стержневих ланцюгів;
- W_{4.19} – підйом шарнірно-стержневих ланцюгів;
- W_{4.20} – розстропування шарнірно-стержневих ланцюгів;
- W_{4.21} – виконання робіт з приварювання шарнірно-стержневих ланцюгів до опорних елементів на траверсах;
- W_{4.22} – встановлення фаркопів на шарнірно-стержневі ланцюги;
- W_{4.23} – попереднє натягування шарнірно-стержневих ланцюгів;
- W_{4.24} – контроль якості зварних з'єднань;
- W_{4.25} – остаточне натягнення шарнірно-стержневих ланцюгів;
- W_{4.26} – контроль прогину підсилюваної балки;
- W_{4.27} – коригування натягування.

Операція «Завершальні роботи» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.18):

- W_{5.1} – очистка зварних швів;

W_{5.2} – контроль якості зварних швів;

W_{5.3} – контроль правильності виконання прогину балки;

W_{5.4} – зачищення та фарбування;

W_{5.5} – закладка 8 отворів і відновлення покрівлі;

W_{5.6} – демонтаж тимчасових конструкцій (риштувань, стійок, лебідок, підмостей тощо);

W_{5.7} – остаточне прибирання.

Таблиця А.17

Матриця складових норми витрат на встановлення елементів підсилення

№ дії (W _{ij})	Кількість дій N _i за нормою часу, N _h хв.								T _{wi} , хв	N _{wi} , люд	Q _{wi} , люд- хв
	0,5	1	2	3	4	5	6	7			
W _{4.1}		4							4	2	8
W _{4.2}			6						12	2	24
W _{4.3}				1					3	2	6
W _{4.4}		2							2	2	4
W _{4.5}				4					12	2	24
W _{4.6}				3					9	2	18
W _{4.7}				1					3	2	6
W _{4.8}		3							3	1	3
W _{4.9}					3				15	2	30
W _{4.10}			3						6	2	12
W _{4.11}				1					3	2	6
W _{4.12}		3							3	2	6
W _{4.13}				3					9	2	18
W _{4.14}			11						22	2	44
W _{4.15}				1					5	2	10
W _{4.16}		11							11	1	11
W _{4.17}		18							18	2	36
W _{4.18}				3					9	2	18
W _{4.19}					2				4	2	8
W _{4.20}		1							3	2	6
W _{4.21}				3					9	2	18
W _{4.22}			2						4	2	8
W _{4.23}				2					6	2	12
W _{4.24}		12							12	1	12
W _{4.25}			3						6	2	12
W _{4.26}					1				6	1	6
W _{4.27}					1				5	2	10
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 382 * 1,2 / 1 = 7,64$ люд-год/ балку											382

* суміщення можливе для дій: W_{4.5}, W_{4.6}; W_{4.9}, W_{4.10}; W_{4.13}, W_{4.14}; W_{4.17}, W_{4.18}.

Таблиця А.18

Матриця складових норми витрат на завершальні роботи

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{5.1}$		9							18	2	36
$W_{5.2}$	12								12	2	24
$W_{5.3}$			3						9	2	18
$W_{5.4}$			10						30	2	60
$W_{5.5}$			6						18	2	36
$W_{5.6}$				9					36	4	144
$W_{5.7}$			11						22	1	22
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 340 * 1,2 / 1 = 6,8$ люд-год/ балку											340

* суміщення можливе для дій: $W_{5.1}$, $W_{5.2}$; $W_{5.4}$, $W_{5.5}$.

$M_{KT9.6}$ – Попереднє напруження конструкцій для підвищення міцності (попередній вигин). Підсилення здійснюється шляхом встановлення додаткових елементів із затяжкою в нижній частині балки (рис. А.6), що забезпечує рівномірний розподіл навантаження та підвищення несучої здатності конструкції..

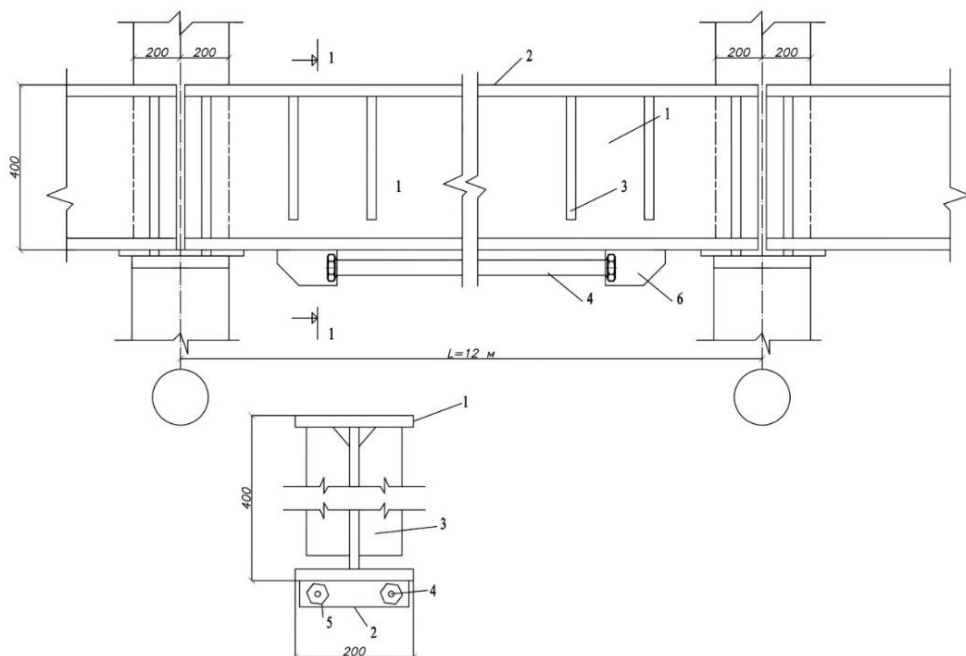


Рис. А.6. Встановлення додаткових підсилюючих елементів із затяжкою в нижній частині балки: 1 – підсилювальна балка; 2 – опорні кутики; 3 – додаткові ребра жорсткості; 4 – затягувальний стержень; 5 – натягувальна гайка

Операція «Виготовлення елементів підсилення» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.19):

- $W_{3.1}$ – доставка матеріалів для підсилення до місця;
 $W_{3.2}$ – перевірка відповідності матеріалів проекту;
 $W_{3.3}$ – збирання та здача монтажних механізмів;
 $W_{3.4}$ – Виготовлення ребер жорсткості для підсилення балки;
 $W_{3.5}$ – маркування ребер жорсткості;
 $W_{3.6}$ – Виготовлення елементів опорних кутиків для кріплення затяжок;
 $W_{3.7}$ – маркування опорних кутиків;
 $W_{3.8}$ – Виготовлення затягувальних стержнів (затяжок) з нарізанням різьблення;
 $W_{3.9}$ – встановлення двох лебідок для монтажу елементів підсилення;
 $W_{3.10}$ – контроль якості.

Таблиця А.19

Матриця складових норми витрат праці на виготовлення елементів підсилення

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{3.1}$						6			42	2	84
$W_{3.2}$						4			28	1	28
$W_{3.3}$				4					24	2	48
$W_{3.4}$					18				90	2	180
$W_{3.5}$		8							16	1	16
$W_{3.6}$					16				80	2	160
$W_{3.7}$		6							12	1	12
$W_{3.8}$					20				100	2	200
$W_{3.9}$						10			80	2	160
$W_{3.10}$			8						24	3	72
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 960 * 1,2 / 1 = 19,2$ люд-год/ балку											960

* суміщення можливе для дій: $W_{3.1}$, $W_{3.3}$; $W_{3.5}$, $W_{3.7}$; $W_{3.4}$, $W_{3.6}$.

Операція «Встановлення елементів підсилення» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.20):

- $W_{4.1}$ – доставка елементів до місця встановлення;
 $W_{4.2}$ – встановлення підмостей із огороженнями;
 $W_{4.3}$ – розмітка місць встановлення елементів підсилення;

- $W_{4.4}$ – стропування ребер жорсткості;
 $W_{4.5}$ – підйом ребер жорсткості;
 $W_{4.6}$ – приварювання ребер жорсткості;
 $W_{4.7}$ – розстропування ребер жорсткості;
 $W_{4.8}$ – стропування опорних кутиків;
 $W_{4.9}$ – підйом опорних кутиків;
 $W_{4.10}$ – приварювання опорних кутиків;
 $W_{4.11}$ – розстропування опорних кутиків;
 $W_{4.12}$ – стропування затягувальних стержнів;
 $W_{4.13}$ – підйом затягувальних стержнів;
 $W_{4.14}$ – встановлення затягувальних стержнів;
 $W_{4.15}$ – розстропування затягувальних стержнів;
 $W_{4.16}$ – за допомогою натягувальних гаєк досягти включення затяжок в роботу.

Таблиця А.20

Матриця складових норми витрат на встановлення елементів підсилення

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{4.1}$				4					24	2	48
$W_{4.2}$					16				80	2	160
$W_{4.3}$					8				40	2	80
$W_{4.4}$					6				30	2	60
$W_{4.5}$				4					20	2	40
$W_{4.6}$					30				150	3	450
$W_{4.7}$		6							12	2	24
$W_{4.8}$					4				20	2	40
$W_{4.9}$				4					20	2	40
$W_{4.10}$					18				90	3	270
$W_{4.11}$		4							8	2	16
$W_{4.12}$					6				30	2	60
$W_{4.13}$				4					20	2	40
$W_{4.14}$					24				120	3	360
$W_{4.15}$		6							12	2	24
$W_{4.16}$						18			108	12	1296
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 2920 * 1,2 / 1 = 58,4$ люд-год/ балку											2920

* суміщення можливе для дій: $W_{4.4}$, $W_{4.5}$; $W_{4.8}$, $W_{4.9}$; $W_{4.12}$, $W_{4.13}$.

Операція «Завершальні роботи» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.21):

$W_{5.1}$ – очистка зварних швів;

$W_{5.2}$ – контроль якості зварних швів;

$W_{5.3}$ – контроль прогину балки;

$W_{5.4}$ – зачищення та фарбування;

$W_{5.5}$ – демонтаж тимчасових конструкцій (риштувань, стійок, лебідок, підмостей тощо);

$W_{5.6}$ – остаточне прибирання.

Таблиця А.21

Матриця складових норми витрат на завершальні роботи

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{5.1}$						6			42	2	84
$W_{5.2}$					8				40	1	40
$W_{5.3}$			6						18	2	36
$W_{5.4}$					11				55	2	110
$W_{5.5}$						10			70	2	140
$W_{5.6}$					9				45	1	45
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 455 * 1,2 / 1 = 9,1$ люд-год/ балку											455

* суміщення можливе для дій: $W_{5.1}$, $W_{5.2}$; $W_{5.5}$, $W_{5.6}$.

M_{KTH} – Зменшення робочого прольоту конструкції шляхом установлення розвантажувальних виносних опор.

Встановлення виносних опор для розвантаження балки дозволяє скоротити її робочий прольот. Схема застосування такої моделі КТР для підсилення балок представлено на рис.А.7.

Операція «Виготовлення елементів підсилення» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.22):

$W_{3.1}$ – доставка матеріалів для підсилення до місця;

$W_{3.2}$ – перевірка відповідності матеріалів проєкту;

$W_{3.3}$ – збирання та здача монтажних механізмів;

$W_{3.4}$ – виготовлення елементів підсилення балки (двотавр 20-27);

$W_{3.5}$ – маркування конструкцій підсилення;

$W_{3.6}$ – виготовлення елементів підкладки-опори під балку (швелер 14);

$W_{3.7}$ – маркування елементів підкладки-опори;

$W_{3.8}$ – встановлення двох лебідок для монтажу балок підсилення;

$W_{3.9}$ – контроль якості.

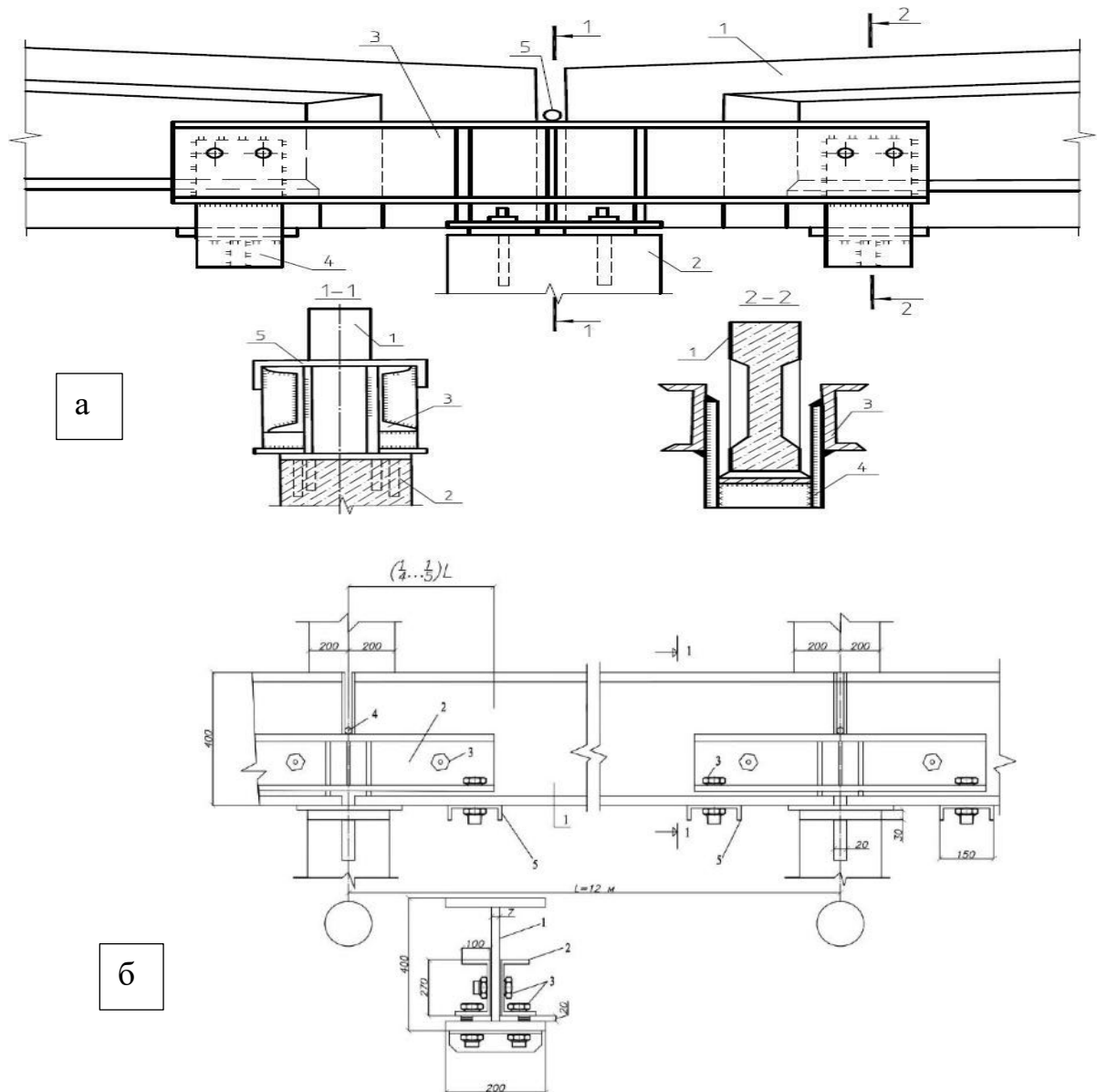


Рис. А.7. Підсилення залізобетонних (а) та металевих (б) балок виносними опорами: 1 – балка; 2 – опора; 3 – двоконсольні балки; 4 – столик виносних опор (місце підклинювання); 5 – з'єднувальний стержень

Матриця складових норми витрат праці на виготовлення елементів підсилення

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{3.1}$						6			42	2	84
$W_{3.2}$						4			28	1	28
$W_{3.3}$				4					24	2	48
$W_{3.4}$					18				90	2	180
$W_{3.5}$		8							16	1	16
$W_{3.6}$					20				100	2	200
$W_{3.7}$		6							12	1	12
$W_{3.8}$						12			96	2	192
$W_{3.9}$			10						30	2	60
$H_{hw} = 0,01667 * \sum Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 920 * 1,2 / 1 = 18,4$ люд-год/ балку											920

* суміщення можливе для дій: $W_{3.1}$, $W_{3.3}$; $W_{3.5}$, $W_{3.7}$.

Операція «Встановлення елементів підсилення» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.23):

$W_{4.1}$ – доставка елементів до місця встановлення;

$W_{4.2}$ – встановлення підмостей із огороженнями;

$W_{4.3}$ – розмітка місць свердління отворів для встановлення балок (6 на одну балку);

$W_{4.4}$ – виконання робіт зі свердління отворів у підсилюваних балках;

$W_{4.5}$ – стропування балок підсилення;

$W_{4.6}$ – підйом балок підсилення

$W_{4.7}$ – встановлення та закріплення балок підсилення на підсилюваній балці болтами;

$W_{4.8}$ – розстропування балок;

$W_{4.9}$ – стропування підкладки-опори під балку підсилення;

$W_{4.10}$ – підйом підкладок-опор під балку;

$W_{4.11}$ – встановлення підкладок-опор під балку та закріплення їх болтами;

$W_{4.12}$ – розстропування підкладок-опор;

$W_{4.13}$ – за допомогою натяжних болтів досягти включення балок підсилення в роботу.

Таблица А.23

Матриця складових норми витрат на встановлення елементів підсилення

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{4.1}$				4					24	2	48
$W_{4.2}$					16				80	2	160
$W_{4.3}$			12						24	2	48
$W_{4.4}$					24				120	3	360
$W_{4.5}$					6				30	2	60
$W_{4.6}$				4					20	2	40
$W_{4.7}$					30				150	3	450
$W_{4.8}$		6							12	2	24
$W_{4.9}$					4				20	2	40
$W_{4.10}$				4					20	2	40
$W_{4.11}$					20				100	3	300
$W_{4.12}$		4							8	2	16
$W_{4.13}$						19			114	12	1368
$H_{hw} = 0,01667 * \Sigma Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 2915 * 1,2 / 1 = 58,3$ люд-год/ балку											2915

* суміщення можливе для дій: W4.5, W4.6; W4.9, W4.10.

Операція «Завершальні роботи» розкладається на наступний комплекс дій (Табл. А.24):

$W_{5.1}$ – очистка зварних швів;

$W_{5.2}$ – контроль якості;

$W_{5.3}$ – зачищення та фарбування;

$W_{5.4}$ – демонтаж тимчасових конструкцій (риштувань, стійок, лебідок, підмостей тощо);

$W_{5.5}$ – остаточне прибирання.

Таблиця А.24

Матриця складових норми витрат на завершальні роботи

№ дії (W_{ij})	Кількість дій N_i за нормою часу, H_h хв.								T_{wi} , хв	N_{wi} , люд	Q_{wi} , люд- хв
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$W_{5.1}$						6			42	2	84
$W_{5.2}$					10				50	1	50
$W_{5.3}$					12				60	2	120
$W_{5.4}$						12			84	2	168
$W_{5.5}$									38	1	38
$H_{hw} = 0,01667 * \Sigma Q_{wi} * Kr / Ve = 0,01667 * 460 * 1,2 / 1 = 9,2$ люд-год/ балку											460

* суміщення можливе для дій: W5.1, W5.2; W5.4, W5.5.

ДОДАТОК Б



ТОВ «УкрГіпротранс»
Україна, м. Вишгород, вул. Набережна 7/1, оф 103
e-mail: info@ukrgiprotrans.com
тел. +38 (067) 793-90-07
www.ukrgiprotrans.com

ДОВІДКА

про впровадження наукового дослідження
здобувача Руднєвої Ірини Миколаївни

Практична апробація результатів дослідження здійснювалася у 2021–2022 роках під час обстеження, оцінки технічного стану, виготовлення проектно-кошторисної документації, зокрема розроблення рішень з підсилення конструкцій, у процесі реконструкції Комунального закладу «Обласна спеціалізована дитячо-юнацька спортивна школа олімпійського резерву» Черкаської обласної ради по вул. Пастерівська, 102 в м. Черкаси.

За результатами обстеження виявлено тріщини різної ширини розкриття, локальні пошкодження, оголення та корозію арматури у несучих елементах. Крім того, під час реконструкції виникла необхідність забезпечення безпечної експлуатації будівель в умовах обмеженого робочого простору та суміщення будівельно-монтажних робіт з функціонуванням об'єктів.

У ході апробації використано результати наукових досліджень здобувача Руднєвої І.М., зокрема систему формування моделей конструктивно-технологічних рішень підсилення каркасних конструкцій, методичні підходи до врахування просторово-планувальних параметрів зон підсилення, багатофакторну модель нормування трудових витрат і часу на процеси підсилення, принципи багатокритеріального оцінювання альтернативних рішень за критеріями надійності, ефективності та сталості, а також елементи BIM-орієнтованого підходу та Lean-організації процесів реконструкції.

За сукупністю ознак застосованих конструктивно-технологічних та організаційно-технологічних рішень, прийнятих із використанням конструктивно-технологічної системи, розробленої у дослідженні здобувача Руднєвої І.М., забезпечено належний рівень якості підсилення конструкцій, що підтвердило доцільність використання цієї системи у практиці реконструкції. Станом на сьогодні підсилені несучі конструкції експлуатуються понад три роки, що засвідчує ефективність запропонованих науково-методичних положень та можливість їх практичного застосування при відновленні, підсиленні та подовженні строку експлуатації каркасних будівель цивільного і промислового призначення.

Директор ТОВ «УкрГіпротранс»



Віталій ШУТЕНКО

ФОП
Шутенко Віталій Валерійович
E-mail: shutenko.vitaly@gmail.com



ДОВІДКА
ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ
ЗДОБУВАЧА РУДНЕСВОЇ ІРИНИ МИКОЛАЇВНИ

У 2023 році наша компанія виконувала обстеження та розроблено проєктну документацію на реконструкцію (технічне переоснащення) котельні №1 по вул. Вокзальна, 34, смт. Глеваха Фастівського району Київської області.

За результатами обстеження виявлено характерні ушкодження конструкцій: руйнування захисного шару бетону, тріщини, корозію арматури та зволоження несучих елементів, що свідчить про зниження їх експлуатаційної надійності.

У процесі виконання робіт з обстеження та аналізу технічного стану каркасних будівель було використано результати наукових досліджень Руднесвої Ірини Миколаївни щодо систематизації дефектів і пошкоджень конструкцій, оцінки технічного стану елементів каркасу та визначення можливих варіантів їх підсилення. Це дозволило сформувати інформаційну основу для вибору технічних рішень та врахування можливих ризиків під час виконання робіт.

Під час впровадження застосовано методичні положення, розроблені у дисертаційній роботі, щодо формування конструктивно-технологічних рішень підсилення каркасних конструкцій. Запропонований підхід передбачає врахування планувальних параметрів будівлі, технічного стану конструкцій, умов виконання робіт, а також показників трудомісткості, тривалості та вартості робіт. Для вибору найбільш доцільних варіантів підсилення також використано систему багатокритеріального оцінювання рішень за показниками надійності, ефективності та сталості.

Під час проєктування застосовувались окремі елементи розробленої методики нормування трудових витрат і часу на процеси підсилення конструкцій. Використання мікроелементного підходу та декомпозиції будівельних процесів, що дало змогу уточнити структуру трудових витрат, оптимізувати послідовність виконання технологічних операцій та підвищити ефективність організації будівельно-монтажних робіт.

Застосування запропонованих здобувачем підходів дозволило визначити найбільш доцільні технологічні моделі підсилення та підтвердило можливість їх практичного використання під час реконструкції об'єктів. У результаті вдалося знизити витрати на виконання робіт, підвищити надійність і довговічність каркасних конструкцій, скоротити трудомісткість і тривалість виконання робіт, а також підвищити ефективність організації процесів реконструкції. Крім того, це сприяло зменшенню ризику виникнення дефектів, простоїв і переробок. Це значно посприяло підвищенню загальної якості виконання робіт.

Керівник



Віталій ШУТЕНКО

ДОДАТОК В**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА****Наукові роботи, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації*****Статті в міжнародних виданнях та ті, які рецензуються в SCOPUS та Web of Science Core Collection***

1. Rudnieva I. A conceptual model for quality assessment of frame strengthening during building reconstruction. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2026, Issue 116, pp. 425-432. Kyiv: KNUBA. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2026.116.425-432> (Web of Science). Особистий внесок: розроблення концептуальної моделі оцінювання якості підсилення каркасних будівель, формалізація критеріїв для їх інтеграції у систему підтримки прийняття рішень.

2. Tonkacheiev H., Rashkivskiy V., Rudnieva I., Dubovyk I. Investigation of labour intensity and duration of the assembly processes of structural covering blocks. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2023, Issue 110, pp. 393–403. Kyiv: KNUBA. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.393-403> (Web of Science). Особистий внесок: аналіз і систематизація показників трудомісткості та тривалості монтажних процесів, узагальнення результатів дослідження.

3. Tonkacheiev H., Rudnieva I., Tonkacheiev V., Priadko I. Features of standard time formation to implement construction processes: a case study. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2022, Issue 109, pp. 141–151. Kyiv: KNUBA. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.141-151> (Web of Science Core Collection). Особистий внесок: розроблення методичних підходів до мікроелементного нормування часу будівельних процесів, формалізація їх структури, узагальнення результатів.

4. Tonkacheiev H.M., Molodid O.S., Galinskyi O.M., Plokhuta R.O., Rudnieva I.M., Priadko I.M. The technology of crack repair by polymer composition. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2022, Issue 108, pp. 203–216. Kyiv: KNUBA. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.203-216> (Web of Science Core Collection). Особистий внесок: аналіз технологічних рішень ремонту тріщин та узагальнення результатів досліджень.

5. Rudnieva I. Comparative analysis of strengthening of building structures (masonry, metal structures, reinforced concrete) using FRP-materials and traditional methods during reconstruction. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2020, Issue 105, pp. 267–291. Kyiv: KNUBA. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2020.105.267-291> (Web of Science Core Collection). Особистий внесок: порівняльний аналіз традиційних та альтернативних методів підсилення конструкцій, проведення розрахункових досліджень, оцінювання та обґрунтування ефективності цих методів.

6. Rudnieva I., Priadko I., Tonkacheiev H., Priadko N. Investigation of the effectiveness of strengthening with FRP applied in metal elements of suspension roof: an analytical approach. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2021, Issue 107, pp. 170–183. Kyiv: KNUBA. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2021.107.170-183> (Web of Science Core Collection). Особистий внесок: розроблення та чисельне моделювання розрахункових моделей, аналітичне дослідження ефективності підсилення металевих елементів із застосуванням FRP-систем, оцінювання їх впливу на показники надійності та узагальнення результатів.

7. Priadko I.N., Rudnieva I.N., Ribakov Y., Bartolo H. A new approach to the design of suspension roof systems. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2020, Issue 104, pp. 191–220. Kyiv: KNUBA. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2020.104.191-220> (Web of Science Core Collection). Особистий внесок: розроблення алгоритму оцінювання надійності висячих покриттів, формалізація підходів до визначення геометричних параметрів конструкцій та участь у створенні методики розрахунково-аналітичного оцінювання напружено-деформованого стану і показників надійності складних просторових систем.

Статті у вітчизняних фахових виданнях (всі видання індексуються в міжнародних базах даних)

8. Rudnieva I.M. Analysis of Improper Use of Materials and Strengthening Systems in Structural Rehabilitation. *Building Structures. Theory and Practice*, 2026, № 18, pp.64-77. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.18.2026.64-77>. Особистий внесок: систематизація факторів недосконалого застосування матеріалів і систем

підсилення, їх формалізація як окремої групи впливу на якість підсилення, розроблення моделі ризиків.

9. Молодід О.С., Руднєва І.М., Богдан С.М. Експериментальне дослідження підсилення металевих конструкцій зовнішнім армуванням методом наклеювання високоміцних композитних вуглецевих матеріалів (FRP). *Дороги і мости*, 2021, вип. 24, с. 84–96. Київ: ДП «ДерждорНДІ». <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.084>. Особистий внесок: участь в експериментальних дослідженнях підсилення, аналіз результатів та кількісне оцінювання ефективності за деформативністю і несучою здатністю конструкцій.

10. Руднєва І.М. Механізми впровадження Lean-технологій, як інноваційного підходу при моделюванні структури визначення норми часу на виконання будівельних процесів. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*, 2021, № 47, с. 26–36. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2021.47\(1\).26-36](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2021.47(1).26-36). Особистий внесок: розроблення методичних підходів до впровадження Lean-технологій у нормування часу будівельних процесів, спрямованих на підвищення продуктивності.

11. Руднєва І. Технологічні особливості підсилення металевих конструкцій методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем при реконструкції. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, 2021, № 8, pp. 32–43. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.8.2021.32-43>. Особистий внесок: аналіз технологічних особливостей підсилення металевих конструкцій композитними матеріалами та обґрунтування рекомендацій щодо їх ефективного і надійного застосування.

12. Тонкачєєв Г.М., Руднєва І.М. Дослідження критеріїв підвищення експлуатаційної надійності каркасів будівель. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2021. № 47. С. 52–63. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2021.47\(1\).52-63](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2021.47(1).52-63). Особистий внесок: формування критеріїв оцінювання експлуатаційної надійності каркасів будівель з урахуванням життєвого циклу та умов реконструкції.

13. Тонкачєєв Г.М., Руднєва І.М. Особливості впливу факторів типу робочих місць на вибір підмостей для здійснення процесів підсилення будівельних конструкцій при реконструкції. *Містобудування та територіальне планування*, 2021, № 78, с. 493–507. Київ: КНУБА. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.78.493-507>. Особистий внесок: систематизація факторів робочих місць та формалізація їх впливу на вибір підмостей і формування ОТР при підсиленні конструкцій.

14. Тонкачєєв Г.М., Руднєва І.М. Дослідження факторів, що впливають на вибір підмостей для здійснення процесів підсилення будівельних конструкцій при реконструкції. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*, 2021, № 48, с. 3–12. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2021.48\(1\).3-12](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2021.48(1).3-12). Особистий внесок: дослідження та систематизація факторів, що впливають на вибір підмостей, і обґрунтування їх урахування при формуванні ОТР підсилення.

15. Руднєва І.М., Глонь І.В., Грабовська Т.О., Пузіна К.І. Збереження архітектурної спадщини України шляхом реконструкції історичних будівель, як чинник розвитку ідентичності нації. *Містобудування та територіальне планування*, 2021, № 77, с. 398-409. Київ: КНУБА. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.77.56-64>. Особистий внесок: обґрунтування ролі збереження архітектурної спадщини та її впливу на формування ефективних підходів до відновлення будівель.

16. Руднєва І.М., Прядко Ю.М., Прядко М.В., Тонкачєєв Г.М. Особливості та перспективи використання технологій підсилення будівельних конструкцій композиційними матеріалами при реконструкції споруд. *Building Structures. Theory and Practice*, 2020, No. 7, pp. 12–22. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.7.2020.12-22>. Особистий внесок: узагальнення та аналіз методів підсилення будівельних конструкцій фіброармованими системами, оцінювання їх ефективності та обґрунтування перспектив застосування при реконструкції.

17. Руднева И.Н., Прядко Ю.Н. Сравнительный анализ Еврокодов и национальных стандартов Украины, в том числе частных коэффициентов надежности и учета фактора времени, при проектировании конструкций. *Промислове будівництво та інженерні споруди*, 2020, № 1, с. 39–45. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pbis_2020_1_10. Особистий внесок: порівняльний аналіз положень Єврокодів і ДБН щодо коефіцієнтів надійності та врахування фактора часу, з обґрунтуванням їх впливу на проектування конструкцій.

18. Руднева І., Прядко Ю., Прядко М. Аналіз причин обвалення покрівель виробничих будівель *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, 2020, № 6, pp. 85–93. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.85-93>. Особистий внесок: аналіз причин обвалення покрівель виробничих будівель та обґрунтування факторів, що впливають на їх надійність при реконструкції.

19. Руднева І.М. Управління інвестиційними ризиками та енергоефективність, з урахуванням капітальних і операційних витрат, в промисловому девелопменті *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*, 2020, № 46, с. 56–64. <https://doi.org/10.32347/2707-501x.2020.46.56-64>. Особистий внесок: розроблення підходів до управління інвестиційними ризиками з урахуванням життєвого циклу об'єкта, обґрунтування впливу капітальних і експлуатаційних витрат на ефективність проєктних рішень.

20. Прядко Н., Шамрина Г., Прядко Ю., Руднева И. Усиление конструкций фундаментов жилого дома. *Проблеми розвитку міського середовища*, 2014, вип. 12, с. 14–22. Особистий внесок: участь в обстеженні технічного стану конструкцій, аналіз дефектів і пошкоджень фундаментів та обґрунтування рішень їх підсилення.

21. Прядко Н., Прядко Ю., Руднева И. Рациональный угол наклона мансардного окна при реконструкции жилых домов. *Проблеми розвитку міського середовища*, 2014, вип. 12, с. 39–45. Особистий внесок: аналіз конструктивних параметрів мансардних вікон та обґрунтування їх впливу на ефективність рішень при реконструкції будівель.

22. Руднєва І.М. Методика расчета и проектирования большепролетной висячей оболочки, учитывающая эксплуатационную надежность ограждающих конструкций, выполненных из углепластиков. *Металлические конструкции*, 2006, т. 9, № 1, с. 5–17. Особистий внесок: розроблення методики розрахунку великопрольотних висячих оболонок з урахуванням експлуатаційної надійності огорожувальних конструкцій та аналіз впливу деформацій на їх надійність.

23. Прядко М.В., Прядко І.Н. (Руднєва). Опыт реконструкции крупнопанельного жилого дома в г. Макеевке. *Вісник ДонДАБА*, 2001, № 3(28), с. 21–22. Особистий внесок: обстеження та оцінка технічного стану конструкцій, аналіз дефектів і обґрунтування рішень з підсилення під час реконструкції.

24. Прядко М.В., Коровіна А.А., Прядко І.Н. (Руднєва). О результатах обследования конструкций жилого дома в г. Макеевке. *Вісник ДонДАБА*, 2001, № 3(28), с. 34. Особистий внесок: аналіз результатів обстеження та оцінка технічного стану конструкцій будівлі.

Матеріали конференцій, де здійснено апробацію роботи

25. Rudnieva I. A multicriteria framework for quality assessment of strengthening systems in structural rehabilitation. *Шістнадцята міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем – 2026»*, Чернігів, 2026, с.194-195. Особистий внесок: розроблення багатокритеріальної системи оцінювання якості підсилення будівельних конструкцій, формалізація критеріїв оцінки та обґрунтування їх впливу на надійність, сталість і ефективність рішень під час реконструкції.

26. Rudnieva I. Quality assurance of sustainable reconstruction: focusing on renovation of buildings in Ukraine from a Circular Economy and climate perspective. *International scientific and technical forum “Architecture, Construction, Design: Technology, Energy, Management – 2024”*, 2024, pp. 102–103. Особистий внесок: формування підходів до забезпечення якості реконструкції з урахуванням принципів Circular Economy, обґрунтування їх впливу на ресурсну ефективність, енергоефективність і зниження викидів.

27. Руднєва І.М. Синергія BIM та LEAN-технологій як інструментів технологічного забезпечення ощадливої реконструкції. *Міжнародний науково-технічний форум “Архітектура та Будівництво: нові тенденції і технології”*.

Теорія та практика”, 17–18 листопада 2022 р., с. 120–121. Особистий внесок: обґрунтування ефективності інтеграції BIM та Lean-технологій у процесах реконструкції.

28. Руднєва І.М. Основи впровадження Lean-технологій як інноваційного підходу при проектуванні, будівництві та реконструкції будівель і споруд. *I Міжнародна науково-практична онлайн-конференція «Актуальні проблеми, пріоритетні напрямки та стратегії розвитку України»*, 15 березня 2021 р., с. 675–677. Особистий внесок: розробка підходів до впровадження Lean-технологій у будівництві та реконструкції, обґрунтування їх впливу на ефективність організаційно-технологічних процесів і зниження втрат.

29. Руднєва І.М. Дослідження ефективності підсилення висячих металевих конструкцій наскрізного перерізу зовнішнім армуванням методом наклеювання фіброармованих систем. *III Науково-практична конференція «Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції»*, Київ, КНУБА, 22–23 квітня 2021 р., с. 35–36. Особистий внесок: аналітичне дослідження ефективності та надійності підсилення висячих металевих конструкцій FRP-системами та оцінювання його впливу на несучу здатність.

30. Руднєва І.М. Застосування лазерного сканування для моніторингу стану будівель та споруд при реконструкції. *VII International scientific and practical conference “Transfer of Innovative Technologies”*, Kyiv–Dortmund–Nur-Sultan–Jiangsu, 19–20 May 2021, pp. 19–22. Особистий внесок: дослідження застосування лазерного сканування для моніторингу технічного стану конструкцій та обґрунтування його інтеграції в BIM-середовище реконструкції.

31. Руднєва І.М. Підсилення металевих конструкцій зовнішнім армуванням методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем: аналітичний підхід. *VII International scientific and practical conference “Transfer of Innovative Technologies”*, Kyiv–Dortmund–Nur-Sultan–Jiangsu, 19–20 May 2021, pp. 5–7. Особистий внесок: дослідження ефективності технології підсилення конструкцій FRP-системами та оцінювання впливу підсилення на їх надійність.

32. Руднєва І.М. Дослідження підсилення металевих конструкцій зовнішнім армуванням методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем. *IV міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні технології в*

архітектури і дизайні», Харків, 20–21 травня 2021 р., с. 291–293. Особистий внесок: дослідження ефективності технологій підсилення металевих конструкцій FRP-системами.

33. Руднєва І.М. Досвід Італії в збереженні архітектурної, культурної та екологічної спадщини як факторів, що впливають на рівень економіки держави. *Conference “EU Principled Pragmatism – Consequences for the Eastern and South-Eastern Europe: political, economic, legal and communication aspects”, 21–22 May 2021, Kyiv, pp. 60–62. Особистий внесок: аналіз міжнародного досвіду збереження спадщини та його впливу на ефективність підходів до реконструкції.*

34. Молодід О.С., Руднєва І.М., Мусіяка І.В., Богдан С.М. Експериментальне дослідження підсилення металевих конструкцій зовнішнім армуванням методом наклеювання високоміцних композитних матеріалів (FRP). *I Міжнародна науково-практична конференція ім. П.М. Коваля «Актуальні питання мостового господарства та шляхи його покращення», Запоріжжя, 15–17.09.2021 р., с. 85–88. Особистий внесок: аналіз результатів та кількісне оцінювання ефективності за деформативністю і несучою здатністю конструкцій.*

35. Руднєва І.М. BIM як основний інструмент впровадження Lean-технологій під час будівництва або реконструкції. *Міжнародний науково-технічний форум “Архітектура та Будівництво: нові тенденції і технології. Теорія та практика”, 26 жовтня 2021 р., с. 315–316. Особистий внесок: обґрунтування застосування BIM як ключового інструменту впровадження Lean-підходів та підвищення ефективності технологічних процесів у реконструкції.*

36. Rudnieva I. Technology of building structures strengthening by composite materials during the reconstruction. *International Scientific-Practical Conference of Young Scientists “Build-Master-Class-2020”, Kyiv, November 2020, pp. 134–135. Особистий внесок: дослідження традиційних і FRP-технологій підсилення конструкцій, їх порівняльний аналіз та оцінювання ефективності.*

37. Руднєва І.М., Носач А. Професійні комунікації та впровадження BIM-моделювання як основні інструменти підвищення компетенцій студентів-архітекторів. *Всеукраїнська наукова конференція «Сучасна архітектурна освіта», КНУБА, 25 листопада 2021 р. 137-139. Особистий внесок: аналіз ролі*

ВІМ та професійних комунікацій у формуванні ефективних компетенцій фахівців.

38. Rudnieva I.N. Influence of temperature effects on the stress-strain state of suspension system formed by the systems of the bending-rigid threads. *International Scientific and Practical Conference of Young Scientists "Build-Master-Class-2016"*, Kyiv, 16–18 November 2016, p. 146. Особистий внесок: дослідження впливу температурних факторів на НДС та обґрунтування їх урахування.

39. Rudnieva I. Analyze of the methods of strengthening of buildings and structures, such as traditional methods and alternative methods using FRP materials. *International seminar «Economics of the cultural heritage, tourism and modern fortifications in EU»*, Venice (Italy), 2016, p. 248. Особистий внесок: порівняльний аналіз методів підсилення будівельних конструкцій.

40. Руднева И.Н., Прядко Н.В., Шамрина Г.В., Прядко Ю.Н. Обследование и усиление конструкций фундаментов жилого дома в г. Макеевка. *Материалы Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы механики в современном строительстве»*, Пенза, 2013, с. 133–141. Особистий внесок: обстеження та оцінювання технічного стану фундаментів, аналіз дефектів і пошкоджень та обґрунтування рішень з їх підсилення.

41. Horokhov Y., Muschanov V., Rudnieva I., Sivokon Y. Analysis and design of suspended roof shells with large openings. 9th International Conference "Modern Building Materials, Structure and Techniques". Vilnius, Lithuania, 2007. P. 584–594. Особистий внесок: дослідження напружено-деформованого стану та експериментальна перевірка роботи великопрольотних висячих оболонок, розробка рекомендацій щодо їх проектування та монтажу.

42. Горохов С.В., Мушанов В.П., Касимов В.Р., Руднева И.М., Сивоконь Ю.В. Теоретическое и экспериментальное исследование стационарных висячих покрытий над трибунами реконструируемых стадионов. *Материалы международной конференции «РЕКОНСТРУКЦИЯ-2005»*, Санкт-Петербург, 2005, с. 15–19. Особистий внесок: дослідження НДС покриттів та оцінювання їх роботи за результатами теоретичних і експериментальних досліджень.

43. Прядко И.Н. (Руднєва), Мущанов В.Ф. Влияние последовательности монтажа на изменение напряженно-деформированного состояния пространственных покрытий, образованных жесткими нитями. *Конференція молодих учених КНУБА*, Київ, 2002, стендова доповідь. Особистий внесок: дослідження впливу технології монтажу на просторову роботу конструкцій.

Міжнародні науково-дослідні проєкти (за фінансування Європейського Союзу)

44. Weber B., Rudnieva I. Common Assessment Study for the Preparedness and Needs for Innovations in Construction Industry in Danube Area. *Міжнародний проєкт Circular DigiBuild, програма Interreg Danube Region Programme (фінансування Європейського Союзу)*, 2024, 77 р. Особистий внесок: проведення аналітичного дослідження рівня готовності будівельної галузі до інновацій у Дунайському регіоні, узагальнення результатів та формування висновків.

45. Vašak M.; Contributors: Rudnieva I., et al. Disruptive Technologies, Circular Economy and the Building Industry in the Danube Area. *Міжнародний проєкт Circular DigiBuild, програма Interreg Danube Region Programme (фінансування Європейського Союзу)*, 2025, 184 р. Особистий внесок: аналіз сучасних підходів цифрових та циркулярних технологій в Німеччині та оцінювання їх впливу на розвиток будівельної галузі.

Додаткові публікації

46. Priadko I.N., Mushchanov V.P., Bartolo H., Rudnieva I.N., Vatin N.I. Improved numerical methods in reliability analysis of suspension roof joints. *Magazine of Civil Engineering*, 2016, No. 5, pp. 27–41. (Web of Science, Scopus Q3) <https://doi.org/10.5862/MCE.65.3>. Особистий внесок: дослідження та оцінювання впливу конструктивних параметрів вузлів висячих покриттів на їх надійність.

47. Руднєва І. М. Вплив податливості опор на напружено-деформований стан висячої системи, утвореної системою згинально-жорстких ниток. Матеріали конф. молодих учених, аспірантів і студентів КНУБА, 17 листоп. 2014 р., Київ. Київ : КНУБА, 2014.

48. Мущанов В. П., Руднева И. М. Определение траектории разрушения элементов покрытия, образованного жесткими нитями сквозного сечения. Вісник ДонНАБА. 2012. № 3 (95). С. 3–6.

49. Мущанов В. П., Руднева И. М. Напряженно-деформированное состояние висячей системы, образованной системой изгибно-жестких нитей, при учете податливости опор. Металлические конструкции. 2012. Т. 18, № 1. С. 5–16.

50. Мущанов В. П., Руднева И. М. Влияние температурных воздействий на напряженно-деформированное состояние висячей системы, образованной системой изгибно-жестких нитей. Сучасне промислове та цивільне будівництво. 2012. Т. 8, № 1. С. 5–13.

51. Мущанов В.П., Руднева И.М. Чувствительность конструктивной схемы висячего покрытия к осадкам основания. Вісник ДонНАБА. 2011. № 6(92). С. 106–116.

52. Горохов Є.В., Мущанов В.П., Касимов В.Р., Сивоконь Ю.В., Руднева І.М. Теоретическое и экспериментальное исследование конструктивных форм большепролетных покрытий над трибунами стадионов. Збірник наукових праць УкрНДІпроектстальконструкція ім. В.М. Шимановського. 2010. Вип. 6. С. 5–20.

53. Горохов Є.В., Мущанов В.П., Руднева І.Н. Behavior features of translucent carbon fiber-reinforced plastic panels in structure of suspended rod shell. Proceedings of X International Colloquium of IASS Polish Chapter «Lightweight Structures in Civil Engineering». Warsaw, 2005. P. 247–254.

54. Мущанов В.П., Руднева І.М., Прядко Ю.М. Экспериментальное исследование блока висячих ферм при действии неравновесных нагрузок. Металлические конструкции. 2005. Т. 8, № 1. С. 35–42.

55. Мущанов В.П., Руднева І.М., Прядко Ю.М. Экспериментальное исследование блока висячих ферм пространственной стержневой оболочки. Современные строительные конструкции из металла и древесины. Одесса: ОГАСА, 2005. Ч. 1. С. 138–144.

56. Мущанов В.П., Руднева І.М. Экспериментальные исследования величин и характера снеговых нагрузок на покрытия с ограждающей конструкцией из ячеистого поликарбонатного пластика. Вісник ДонНАБА. 2005. № 3(51). С.66–71.

57. Горохов Є.В., Мущанов В.П., Касимов В.Р., Сивоконь Ю.В., Руднєва І.Н. К расчету и проектированию пространственных конструкций стационарных покрытий над трибунами стадионов. Материалы VIII Украинской научно-технической конференции «Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее». Киев, 2004. С. 323–332.

58. Мущанов В.Ф., Руднєва І.М., Прядко Ю.М. Экспериментальное исследование блока висячих ферм пространственной стержневой оболочки. Металлические конструкции. 2004. Т. 7, № 1. С. 55–59.

59. Мущанов В.П., Прядко І.Н. (Руднєва). Теоретическое исследование закономерностей работы висячей стержневой оболочки с вырезом на эллиптическом плане. Вісник ДонДАБА. 2003. № 3(40). С. 49–51.

60. Мущанов В.П., Прядко І.Н. (Руднєва). Уточнение прочностных и деформативных качеств современного светопрозрачного поликарбонатного пластика «Dapralon». Вісник ДонДАБА. 2003. № 2(39). С. 96–100.

61. Прядко І.Н. (Руднєва), Пономарева С.В., Мущанов В.П. Сравнительный анализ методик расчета покрытия из жестких нитей с ограждающими конструкциями Dapralon. Вісник ДонДАБА. 2001. № 3(28). С. 28.

62. Прядко М.В., Прядко І.Н. (Руднєва). Усиление перекрытия при переоборудовании квартир. Вісник ДонДАБА. 2000. № 4(24). С. 22.

63. Депутатова Л.В., Прядко І.Н. (Руднєва). Виды пола (междуэтажных перекрытий), используемые в промышленном и гражданском строительстве. Вісник ДонДАБА. 1999. № 4(18). С. 14.

Навчально-методичні праці

64. Тонкачєєв Г. М., Хохрякова Д. О., Руднєва І. М., Шандра О. Г. Проектування технології підсилення рам каркасних будівель : метод. вказівки. Київ : КНУБА, 2023. 36 с.

65. Іваненко П. О., Григор'єва Л. О., Жупаненко І. В., Корбаков О. Ф., Кошевий О. П., Левківський Д. В., Руднєва І. М., Тробюк О. М., Сович Ю. В., Янсонс М. О. Збірник задач з опору матеріалів : навч. посіб. / за ред. П. О. Іваненка. Київ : Ліра-К, 2021. 400 с.

66. Прядко М. В., Руднєва І. М., Прядко Ю. М. Обстеження та підсилення будівельних конструкцій промислових будівель : навч. посіб. Київ : КНУБА, 2018. 334 с.

67. Денісов Є. В., Руднєва І. М. Основи теорії споруд. Ч. 2 : конспект лекцій. Макіївка : ДонНАБА, 2013. 57 с.

68. Денісов Є. В., Руднєва І. М. Основи теорії споруд. Ч. 1 : конспект лекцій. Макіївка : ДонНАБА, 2013. 52 с.

69. Мущанов В. П., Касимов В. Р., Руднєва І. М. Основні положення розрахунку будівельних конструкцій методом граничних станів : конспект лекцій. Макіївка : ДонНАБА, 2012. 35 с.

70. Прядко М. В., Руднєва І. М., Прядко Ю. М. Обследование и усиление конструкций промышленных зданий : учеб. пособие. Донецк : Норд-Пресс, 2010. 268 с. ISBN 978-966-380-319-7.

71. Мущанов В. П., Жук М. Р., Руднєва І. М. Розрахунок статично невизначеної ферми : метод. вказівки. Макіївка : ДонНАБА, 2010. 7 с.

72. Мущанов В. П., Касимов В. Р., Руднєва І. М. Основні положення розрахунку будівельних конструкцій методом граничних станів : навч. посіб. Макіївка : ДонНАБА, 2009. 44 с.

73. Мущанов В. П., Жук М. Р., Руднєва І. М. Розрахунок плоскої статично невизначеної рами методом переміщень : метод. вказівки. Макіївка : ДонНАБА, 2007. 10 с.

Авторські свідоцтва, дипломи, патенти.

74. Патент України № 149077 U. Спосіб підсилення всячих металевих конструкцій наскрізного перерізу методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем. Опубл. 13.10.2021, Бюл. № 41.

75. Патент України № 149335 U. Спосіб підсилення металевих конструкцій методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем. Опубл. 10.11.2021, Бюл. № 45.

76. Патент України № 151802 U. Спосіб ремонту та захисту залізобетонних конструкцій з тріщинами герметизуючим розчином шляхом вакуумізації тріщин. Опубл. 14.09.2022, Бюл. № 37.