

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
імені Ю.М. ПОТЕБНІ

КАФЕДРА МІСЬКОГО БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проект)

магістр

(рівень вищої освіти)

на тему Дослідження роботи залізобетонних плит, підсилених композитними матеріалами

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1922-мбг
спеціальності 192 Будівництво та цивільна
інженерія

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Міське будівництво та
господарство

(назва освітньої програми)

Зінчук О.В.

(ініціали та прізвище)

Керівник доц., к. арх, Сазонова О. Ю.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент проф., д.т.н, Банах В.А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
імені Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра міського будівництва і архітектури _____

Рівень вищої освіти магістр _____

Спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія _____
(код та назва)

Освітня програма Міське будівництво та господарство _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« 07 » 06 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Зінчук Олександр Васильович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи (проєкту) Дослідження роботи залізобетонних плит, підсилених композитними матеріалами _____

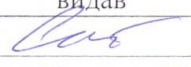

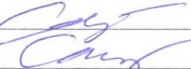



керівник роботи доц., к. арх, Сазонова О. Ю. _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвердені наказом ЗНУ від « 09 » 10 2023 року № 1578-с .

- 1 Строк подання студентом роботи 01.12.2023
- 2 Вихідні дані до роботи Актуальність обраного напрямку досліджень, значимість у сучасному житті, можливість розвинення проблематики, перспективи впровадження майбутніх досягнень, мета роботи, завдання до виконання обраних досліджень, об'єкт досліджень, предмет досліджень, передбачувані методи виконання досліджень
- 3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Літературний огляд. Розробка методики розрахунку посилення прогонової частини залізобетонної плити композитними матеріалами (Вуглепластиком) на основі кінцево-елементної моделі в ПК SCADOffice.

4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Презентація із результатами аналітичних обґрунтувань наукового напрямку досліджень, результатами експериментальних досліджень, результати розрахунків із застосуванням сучасних інформаційних методів досліджень


5 Консультанти розділів роботи

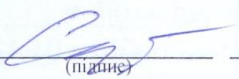
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Саконова О. Ю.		
2	Саконова О. Ю.		
3	Саконова О. Ю.		

6 Дата видачі завдання 01.09.2023


КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Літературний огляд	01.10	
2	Розділ 1	15.10	
3	Розділ 2	01.11	
4	Розділ 3	15.11	
5	Розробка графічної частини	20.11	
6	Оформлення роботи	25.11	
7	Попередній захист	01.12	

Студент  Зінчук О.В.
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту)  Саконова О. Ю.
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер  Гребенюк І.В.
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Зінчук Олександр Васильович. Дослідження роботи залізобетонних плит, підсилених композитними матеріалами.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 192 - Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник О.Ю. Сазонова. Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні ЗНУ, кафедра міського будівництва і архітектури, 2023.

У роботі розглядаються основні способи підвищення якості проектування посилення залізобетонних плит перекриттів з використанням композитних матеріалів.

Ключові слова: БУДІВЛЯ, РЕКОНСТРУКЦІЯ БУДІВЕЛЬ, ЗАЛІЗОБЕТОН, РЕКОНСТРУКЦІЯ, КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ, ВУГЛЕПЛАСТИК.

ABSTRACT

Zinchuk Oleksandr Vasyliovych. Research of the performance of concrete slabs reinforced with composite materials.

Qualifying graduation thesis for obtaining a master's degree of higher education in specialty 192 - Construction and civil engineering, supervisor O.U. Sazonova. Engineering Educational and Scientific Institute named after U.M. Potebny ZNU, Department of Urban Construction and Architecture, 2023.

The work considers the main methods of improving the design quality of reinforcement of reinforced concrete floor slabs using composite materials.

Keywords: BUILDING, BUILDING RECONSTRUCTION, REINFORCED CONCRETE, RECONSTRUCTION, COMPOSITE MATERIALS, CARBON PLASTIC.

ЗМІСТ

	Вступ	6
Розділ 1	Огляд літератури, постановка завдання дослідження	8
1.1	Елементи залізобетонних конструкцій	9
1.2	Посилення плити вуглепластиком	13
1.2.1	Композиційні матеріали	13
1.2.2	Нормативні і розрахункові характеристики композиційних матеріалів	16
1.2.3	Вуглецеві волокна	19
1.2.4	Властивості композиційних матеріалів	20
1.2.5	Конструктивні рішення	24
1.2.6	Проектування посилення згинальних залізобетонних конструкцій - загальні положення	30
1.2.7	Технологія виробництва робіт	36
1.3	Особливості методу кінцевих елементів	39
1.4	Висновки по розділу	41
Розділ 2	Аналітичні дослідження. Параметри об'єкту дослідження	42
2.1	Геометричні параметри	42
2.2	Фізико-механічні параметри	44
2.3	Побудова моделі дослідження	45
2.4	Характеристики використаних типів кінцевих елементів	46
2.5	Дослідження моделей	66
2.6	Висновки по розділу	78
Розділ 3	Конструктивна реалізація посилення плити вуглепластиком	79
3.1	Обстеження конструкцій, що вимагають посилення	79
3.1.1	Результати технічного обстеження	80
3.2	Основні розрахункові положення	82
3.3	Принципові схеми посилення	83
3.3.1	Фізико-механічні властивості тканини, вживаної для посилення	83
3.3.2	Технологія застосування	84
3.4	Опис розрахункової моделі	88
3.5	Прийняті в розрахунку навантаження і дії	89
3.6	Візуалізація результатів розрахунку	93
3.7	Випробування системи посилення	98
3.8	Висновки по розділу	99
	Основні висновки	100
	Список використаних джерел	102

ВСТУП

Актуальність теми. При ремонті чи реконструкції споруд, часто виникає потреба у посиленні елементів конструкцій, несуча здатність яких виявляється недостатньою. Традиційні методи, що застосовувалися для виконання ремонтних робіт, здебільшого складні та трудомісткі. Тим часом, за кордоном, а останнім часом і в Україні широкого поширення набула система посилення конструкцій за допомогою зовнішнього армування високоміцними полімерними матеріалами – вугле- та склопластиками. Суть нової технології полягає в тому, що недолік несучої здатності конструкцій компенсується приклеюванням до їх поверхні спеціальними модифікованими та епоксидними смолами тканин із вуглецевих та скляних ниток, або готових елементів із них. Посилення полімерними композитними матеріалами застосовується для підвищення несучої здатності тріщиностійкості, жорсткості конструкції, їх сейсмостійкості та значного підвищення опору динамічним та ударним навантаженням.

На сьогоднішній день в Україні відсутні офіційно опубліковані дані щодо розроблених чи розроблюваних методик розрахунку посилення залізобетонних конструкцій композиційними матеріалами (зокрема вуглепластиками), що реалізуються за допомогою автоматизованих систем проектування, в основі яких лежить метод кінцевих елементів.

У роботі розглянута і запропонована методика розрахунку посилення вуглепластиком пролітної частини плоскої монолітної залізобетонної плити, працюючої в двох напрямках, на основі методу кінцевих елементів.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є аналіз теоретичних та методичних основ підвищення якості проектування посилення залізобетонних плит перекриттів з використанням композитних матеріалів.

Об'єкт дослідження. Аналіз методичних основ розрахунку посилення пролітної частини залізобетонної плити композитними матеріалами (вуглепластиком) на основі кінцево-елементної моделі в ПК SCADOffice.

Предмет дослідження. Монолітна залізобетонна плоска плита перекриття, працююча в двох напрямках.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань використовувалися узагальнення та аналіз теоретичних та практичних досліджень на тему роботи. Моделювання роботи залізобетонної плити посиленої композитними матеріалами із застосуванням комп'ютерних технологій.

Наукова новизна одержаних результатів. Аналіз нових методик розрахунку способів посилення будівельних конструкцій, що дозволяють розглядати і оцінювати усі параметри роботи конструкції.

Практичне значення одержаних результатів. Визначення несучої здатності посиленої конструкції на основі розробленої моделі та її аналіз. Скорочення витрат на проведення дослідно-конструкторських робіт і натурних випробувань в області дослідження.

Особистий внесок дослідника. Постановки мети та завдання дослідження. Збір та аналіз даних для проведення дослідження.

Апробація результатів роботи. Результати роботи докладалися на III Всеукраїнської науково-практичної конференції за участю молодих науковців «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України» з доповіддю «Композиційні матеріали»[51].

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, трьох розділів, основних висновків, списку використаних джерел містить 107 сторінок, 59 рисунків, 14 таблиць, 51 список використаних джерел.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ, ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

В Україні проблемами ремонту, відновлення несучої здатності та посилення будівельних конструкцій широко зацікавлювалися під час та після Громадянської війни. Перший великий проект, що вирішував питання підвищення несучої здатності залізобетонних елементів, а саме ригелів Ізюмського паровозного депо, включав в себе використання обойм з додатковою поздовжньою стрижневою арматурою і обмоткою у поперечному напрямку. Керівником проекту був інженер В.А. Струве (1919). Причиною, що викликала необхідність посилення конструкцій, була недостатня щільність бетону та інтенсивна корозія арматури.

З початку 1950-х років почали використовувати різноманітні інноваційні методи для підвищення ефективності застосування епоксидних клеїв. Ці клеї дозволяли закріплювати додаткову арматуру на полімерному розчині, склеювати листовий метал, прикріплювати склотканину та об'єднувати окремі елементи. Проте через недостатню розробленість технології цих методів посилення, говорити про їх широке використання в той період було передчасно.

Вибір матеріалів для відновлювальних робіт на спорудах із залізобетону базується на усуненні недоліків у проектуванні та будівельних дефектах, збільшенні навантаження на споруду, боротьбі з корозією бетону і арматури, а також зменшенні ширини розкриття тріщин та надмірних прогинів.

Для успішного розроблення і вибору методу та матеріалів для посилення необхідно застосовувати системний підхід, який включає оцінку стану всієї системи, тобто "конструкція, що посилюється - елемент посилення". Незалежно від вибраного методу посилення, однією з ключових вимог до цієї системи є її здатність функціонувати як єдина цілісна одиниця. Це досягається завдяки належному зчепленню між бетоном і зовнішньою

арматурою, які перебувають у використанні; міцність зчеплення повинна бути достатньою, щоб компоненти конструкції працювали як єдиний моноліт.

1.1 Елементи залізобетонних конструкцій

Плоска плита перекриття.

Найбільш поширеними елементами залізобетонних конструкцій, що згинаються, є плити і балки.

У проектуванні залізобетонних конструкцій в основному зустрічаються плити повністю або частково оперті по контуру, з вільним опиранням або з защемленням на опорах (в окремому випадку плити можуть бути защемлені тільки по одній кромці; такі плити називають консольними. Рідше зустрічаються плити оперті в точках (кутах) .

За розрахунковою схемою плити поділяють на балкові (розрізні, нерозрізні, консольні) та працюють у двох напрямках. Останні можуть бути однопрогоновими (з шарнірним опиранням) або нерозрізними багатопрогоновими.

Плити вважають балочними у тому випадку, якщо зусилля, що діють в одному з напрямків, дуже малі в порівнянні з зусиллями, що діють в іншому напрямку. До балочних відносять: прямокутні рівномірнонавантажені плоскі плити, що оперті по двох протилежних сторонах; такі ж плити, оперті за контуром або защемлені по трьох сторонах при співвідношенні сторін (прольотів), більшому за певну граничну величину.

При аналізі плит розглядають у двох аспектах: для прямокутних плит - при нерівномірному навантаженні, та для прямокутних плит, які рівномірно навантажені та оперті по контуру (закріплені з трьох сторін) при співвідношенні сторонам) при співвідношенні сторін, меншому або рівному граничному; непрямокутні у плані (круглі, кільцеві та ін.); оперті у точках (наприклад, плити безбалочних перекриттів).

Граничні значення співвідношення прогинів у нормативних документах обмежують числами 2 або 3. Ці значення значно залежать від типу опори кромки, тому для їх визначення рекомендується використовувати дані, які вказані в таблицях для коефіцієнтів визначення зусиль та прогинів плит, які навантажені рівномірно розподіленим навантаженням. Це залежить від відношення до ручного розрахунку [12].

Виробництво плит розрізняється за методом на два види: збірні та монолітні. Ці плити можуть використовуватися як елементи для покриттів, перекриттів, плитних фундаментів або інших конструкцій, і вони виготовляються як плоскі (гладкі), так і разом з балками (ребрами) відповідних конструкцій.

Безбалочна плита перекриття.

Переваги безбалочних перекриттів у порівнянні з балочними - у кращому використанні обсягу приміщень через відсутність ребер, що виступають, полегшення пристрою виробничих проводок і комунікацій. Завдяки порівняно невеликій конструктивній висоті безбалочного перекриття зменшується загальна висота багатоповерхової будівлі і скорочується витрата стінових матеріалів, тому безбалочні перекриття економічніші за балочні.

Деформації і ушкодження плит перекриттів.

Поява дефектів та ушкоджень може бути обумовлена різноманітними причинами. Ці причини можуть бути початковими, тобто виникнути в процесі проектування та будівництва, або придбанними, що виникли під час експлуатації будівель і споруд. Залежно від характеру причин, які викликають дефекти та ушкодження, їх можна розподілити на чотири основні категорії [11]:

- виникли внаслідок помилок проектування (30%);
- виникли внаслідок неправильного виконання будівельних робіт (30%);
- виникли в результаті неправильної експлуатації (30%);

- виникли внаслідок випадкових причин (10%).

Ще розглядається наступна класифікація дефектів і ушкоджень [11-12]:

- відсутність зчеплення арматури з бетоном;
- руйнування поверхневого шару бетону;
- вколи та сколи бетону;
- каверни, раковини, чужорідні включення;
- тріщини у бетоні;
- відсутність зчеплення арматури з бетоном;
- невідповідність характеристик бетону, потрібних по міцності, фізичним властивостям і структурі;
- ушкодження арматури і заставних деталей;
- недотримання геометричних розмірів елементів;
- зміщення арматури і заставних деталей з проектного положення;
- відхилення від проектного положення конструкції по горизонталі або вертикалі;
- деформація окремих елементів або конструкцій в цілому;
- недостатня товщина захисного шару бетону;
- відсутність зчеплення між «старим» і «новим» бетоном;
- корозія арматури;
- усадкові тріщини у бетоні;
- руйнування з'єднань або контакту окремих елементів;
- і інші.

Все перелічені вище дефекти і ушкодження негативно впливають на несучю здатність і деформативність конструкцій.

На рисунку 1.1 представлений характер пошкодження плит під час випробувань у нижній та верхній зонах відповідно: на нижній поверхні плити тріщини орієнтовані вздовж бісектрис кутів, а на верхній поверхні вони паралельні сторонам та мають закруглення у кутах, що перпендикулярні діагоналям.

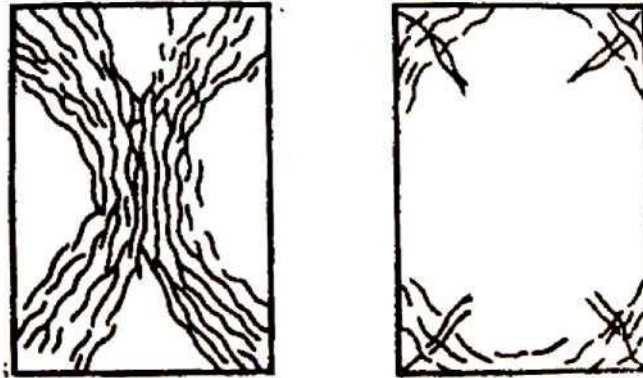


Рисунок. 1.1 - Характер руйнування плит

Особливості розрахунку безбалочних монолітних залізобетонних плит.

Плоскі плити поділяються на балочні - що працюють в одному або двох напрямках. Плити балкового типу працюють на вигин у напрямку меншої сторони, гинальним моментом у напрямку великої сторони нехтують, до яких відношення сторін опорного контуру $I_1/I_2 > 2$, при розрахунку розглядаються смуги, вирізані паралельно її короткій стороні.

При навантаженні балкових плит рівномірно розподіленим навантаженням відношення між опорними та прогоновими моментами обирається так, щоб напівсума опорних моментів та моменту в середині прольоту відповідала балковому моменту при шарнірному опорі. Таким чином, для розрахунку балкових плит, навантажених рівномірно розподіленим навантаженням, використовують готові відношення, які враховують можливий перерозподіл зусиль в межах, що допускаються.

Переважає більшість монолітних залізобетонних перекриттів є статично невизначними конструкціями. Серед таких конструкцій більше місця займають плити, працюючі в двох напрямках.

- В наш час існує кілька методів розрахунку міцності залізобетонних плит, які працюють на вигин у двох напрямках. Використання сучасних обчислювальних методів, таких як метод кінцевих елементів або метод сіток,

які базуються на розв'язанні диференціальних рівнянь теорії пружності і пластичності, викликає значні труднощі у зв'язку з потребою у точному обліку властивостей залізобетону як анізотропного матеріалу. Тому для визначення міцності плит, особливо для статично невизначених систем, А.А. Гвоздев розробив "метод граничної рівноваги" як найбільш простий і зручний підхід. Визначення несучої здатності конструкцій може проводитися двома способами за методом граничної рівноваги (МГР).

- Статичний спосіб МГР

Статичний спосіб МГР заснований на умові рівності граничних внутрішніх сил зовнішньому навантаженню. Розрахунок статично визначених систем, цей спосіб досить простий і робиться за допомогою звичайних рівнянь рівноваги. Проте для розрахунку статично невизначених систем спосіб використовується, в основному, в розрахунках із застосуванням ЕОМ[33].

- Кінематичний спосіб МГР

- В цьому методі розглядаються можливі кінематичні стани, визначається мінімальне навантаження, яке визначається рівністю роботи зовнішніх і внутрішніх сил при будь-яких можливих переміщеннях. При розрахунку плит з використанням цього методу спочатку встановлюються різні схеми руйнування, а потім для кожної з них визначається несуча здатність. З усіх можливих схем руйнування вибирається та, при якій несуча здатність плити має найменше значення.

1.2 Посилення плити вуглепластиком

1.2.1 Композиційні матеріали.

На рівні мікроструктури композитні матеріали складаються з двох (зазвичай) або більше різних компонентів. Одна з компонентів, яка є неперервною, називається матрицею, а другий компонент, відомий як наповнювач або армуюча фаза, має роль у зміні властивостей матриці в

потрібному для практичних застосувань напрямку.

На початку 60-х років минулого століття в Великій Британії були розроблені вуглецеві волокна, тоді як у США з'явилися борні волокна. Це стало важливим кроком у розвитку нового покоління композитних матеріалів. Властивості цих волокон, такі як високий модуль пружності, висока міцність і жорсткість, суттєво розширили сферу їхнього використання.

Композитні матеріали можуть включати в себе керамічну, металеву або полімерну матрицю. Залежно від застосованої матриці механічні властивості цих трьох класів композитів суттєво різняться. Полімерні матриці мають відносно низьку міцність та модуль пружності; керамічні матриці характеризуються високою міцністю і жорсткістю, але вони вкрай крихкі; металеві матриці виявляють проміжні значення міцності та модуля пружності та є дуже пластичними.

В одному з вимірювань наповнювач, як правило, має невеликі розміри - менше 500 мікрометрів, а іноді навіть менше одного мікрона. Форма та розміри наповнювача є одними з основних параметрів, що визначають поведінку композитного матеріалу під навантаженням. Частинки наповнювача зазвичай мають приблизно однакові розміри у трьох вимірах, приблизно 10 мікрон. Розподіл частинок у матриці, як правило, випадковий. Волокна зазвичай мають довжину, значно перевищуючи їх діаметр, і відношення їх довжини до діаметра може значно варіюватись. Для отримання композитних матеріалів використовують безперервні або короткі волокна з маленьким відношенням довжини до діаметра. Волокна в матриці можуть бути розташовані випадковим чином або мати виражений напрямок орієнтації. Якщо вони розташовані в матриці в одному напрямку, такий композитний матеріал називається однооснаправленим. Якщо використовуються тканини з двооснаправленим розташуванням волокон, то такий композитний матеріал називають двооснаправленим.

Багатошарові композитні матеріали, які включають ламінати та

гібриди, виділяються в окремий клас. Ламінати - це композитні матеріали, що складаються з декількох однооснаправлених шарів, розташованих у різних напрямках в певній послідовності. Ламінати зазвичай мають від 4 до 40 шарів, де орієнтація волокон змінюється по товщині пластини. Гібриди - це композитні матеріали, які армуються волокнами різних типів. Наприклад, змішання скляних і вуглецевих волокон дозволяє отримати відносно економічний композитний матеріал з підвищеною міцністю і жорсткістю, завдяки низькій вартості скловолокна і високій жорсткості вуглецевих волокон [6].

На мікрорівні матеріали мають механічні властивості, які відрізняються від тих, що спостерігаються на макрорівні. Руйнування однорідно навантаженого тіла розпочинається з найбільшого дефекту. Чим більший дефект, тим менша міцність зразка. Звідси випливає, що чим менший розмір зразка, тим менше можливий розмір дефектів і тим вища міцність. Таким чином, міцність дрібної частинки або тонкого волокна значно більша, ніж міцність великого зразка з того ж матеріалу. Наприклад, міцність на розтяг вуглецевих волокон становить 31000 МПа, тоді як у блоках - 20 МПа (різниця у 155 разів), а модуль Юнга в волокнах - 290 ГПа, в порівнянні з 10 ГПа у блоках (відмінність у 29 разів).

Композитні матеріали, які використовуються для ремонту та посилення будівельних конструкцій і мають основу з волокон (фібр), виготовляються з довгих мікрочолокон, що омоноличені в затверджувальному полімері, утворюючи єдине ціле. Найпоширенішими типами волокон є вуглецеві, арамідні та скловолокна. Як полімерний матеріал для затвердження найчастіше використовуються епоксидні та поліакринітрилові смоли.

Роль полімеру зводиться до передачі діючих напруг між волокнами та їх захисту від зовнішніх впливів. Полімери, які використовуються для омоноличення волокон, можуть належати до різних типів, але найчастіше застосовуються термозатверджені полімери. Термореактивні полімери - це смоли, які легко утворюють хімічні зв'язки при затвердінні. Затверділа

матриця визначає деякі механічні властивості композитних матеріалів, такі як міцність та модуль пружності в поперечному напрямку, опір зсуву та характер поведінки матеріалу при стисканні. Для затвердіння волокон найчастіше використовуються епоксидні, поліефірні, поліамідні та фенольні смоли. Вони всі мають хорошу стійкість до різних хімічних впливів, проте епоксидні смоли володіють кращими механічними властивостями, в той час як поліамідні смоли є менш витратними.

Найпоширенішими формами використання посилення композитних матеріалів є полотна різного плетіння, смуги чи пластини. Платна представляють собою гнучку тканину з одно- або двонаправленим розташуванням волокон. Під час встановлення на конструкцію вони вбудовуються у полімерний клей - матрицю, що забезпечує їх тісне прилягання до конструкції та підвищує їх міцність. Цей метод використання композитного матеріалу називається "на місці". Смуги або пластини є виробами, виготовленими на заводі з композитного матеріалу, які прямо приклеюються на заздалегідь підготовлену поверхню конструкції для її посилення.

1.2.2 Нормативні і розрахункові характеристики композиційних матеріалів

При розрахунку параметрів ремонту та посилення залізобетонних конструкцій важливу роль відіграють нормативні та розрахункові опори складових конструкцій елементів – бетону, сталеві арматури та композиційного матеріалу підсилення. І якщо по бетону та арматурі існують чіткі вказівки в нормативній літературі [11,12,13], то дані щодо композиційних матеріалів хоча й небагато, але різняться.

Так як композиційні матеріали (смуги і полотна) є пружними матеріалами з високою міцністю на розтяг і без вираженої пластичної зони, багато фірм-виробники у своїй документації вказують гранично допустимі g_{cf} і рекомендовані до застосування при проектуванні s_{cp} деформації матеріалу. Крім того, в обов'язковому порядку фірмами надаються такі характеристики

композиційних матеріалів, необхідні для проектування та розрахунку конструкцій, що посилюються: R_{cf} - опір композиційного матеріалу розтягуванню, МПа; E_{cf} – модуль пружності композиційного матеріалу, МПа або ДПа; t_c – товщина композиційного матеріалу (для полотен – розрахункова), мм; b_c - ширина смуги чи стрічки композиційного матеріалу, мм; γ_c - щільність композиційного матеріалу, г/см³; γ_{cp} - вага одиниці площі полотна композиційного матеріалу або вага тільки волокон г/м².

Крім цього фірми-виробники зазвичай дають рекомендації щодо умов застосування поставлених ними композиційних матеріалів і свої пропозиції призначення коефіцієнтів надійності за матеріалом.

У відміну від бетону та сталеві арматури, нормативні та розрахункові характеристики використовуваних для зовнішнього посилення конструкцій композитних матеріалів не можна однозначно визначити. Ці характеристики залежать від ряду факторів, серед яких основними є умови експлуатації і жорсткість конкретного застосованого композитного матеріалу, що визначає зчеплення між ним та бетоном.

Для визначення нормативних і розрахункових значень силових і деформаційних характеристик композитних матеріалів використовуються початкові дані, які представлені сертифікованими значеннями цих характеристик, наданими фірмами-виробниками.

Нормативні значення опору розтягуванню композиційних матеріалів R_{cn} і деформації ϵ_{cp} можна визначити по наступних залежностях:

$$R_{cn} = R_{cf} \gamma_{cl} \gamma_{c2} \gamma_{c3}; \quad 1.1$$

$$\epsilon_{cn} = \epsilon_{cf} \gamma_{cl} \gamma_{c2} \gamma_{c3} \quad 1.2$$

де γ_{cl} — коефіцієнт, що враховує зчеплення між композитним матеріалом і бетоном, накладає обмеження на рівень нормальних деформацій, що розвиваються в композитному матеріалі. При досягненні певного рівня деформацій в композитному матеріалі виникають сили, які не можуть бути адекватно передані бетонній поверхні конструкції або адгезиву.

Величина цих сил визначається жорсткістю композитного матеріалу і умовами експлуатації посилених конструкцій. Американський інститут бетону рекомендує визначати цей коефіцієнт за наступними залежностями [43]:

$$\gamma_{c1} = \frac{1}{60\varepsilon_{cd}} \left(1 - \frac{nE_c t_c}{36000} \right) \leq 0,9 \text{ при } nE_c t_c \leq 180000 \quad 1.2.3$$

$$\gamma_{c1} = \frac{1500}{\varepsilon_{cd} n E_c t_c} \leq 0,9 \text{ при } n E_c t_c > 180000 \quad 1.2.4$$

де n — кількість шарів композиційного матеріалу; $\varepsilon_{cd} = \varepsilon_{cf}$ γ_{c2} γ_{c3} — деформація композиційного матеріалу, що використовується при визначенні коефіцієнта γ_{c1} і залежить від умов експлуатації; γ_{c2} - коефіцієнт, що враховує тип волокна в композиційному матеріалі та умови його експлуатації. Його величини наведені у таблиці 1.1; γ_{c3} - коефіцієнт, що враховує безпосередній вплив агресивного зовнішнього середовища. Його величини наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.1- Тип волокна в композиційному матеріалі та умови його експлуатації

Умови експлуатації	Тип волокна (фібри) в КМ	Коефіцієнт γ_{c2}
Усередині будівель і споруд	Вуглець	0,95
	Скло	0,75
	Арамід	0,85
На відкритому повітрі	Вуглець	0,85
	Скло	0,65
	Арамід	0,75
В умовах агресивної зовнішньої середовища	Вуглець	0,85
	Скло	0,50
	Арамід	0,70

Таблиця 1.2 -Безпосередній вплив агресивного зовнішнього середовища

Тип дії	Коефіцієнт γ_{c3}	
	для смуг ламінатів	для полотневих матеріалів
Лужна агресія	1,00	0,90
Соляна агресія	0,95	0,90
100% вологість	0,70	0,90
Заморожування - відтавання	0,90	0,85

Необхідно враховувати, що значення коефіцієнта γ_{c3} отримані в результаті досліджень Nabil F. Grace [48] при випробуваннях композиційних матеріалів за умов прямого впливу докiлля. Наприклад, для вивчення впливу лужної агресії на властивості композиційного матеріалу, його піддавали взаємодії з лужним розчином з рівнем рН 9,5 протягом 10 000 годин. Під час випробувань на стійкість до заморожування та розморожування матеріал був підданий 700 циклам зміни температури від -17,8°C до +4°C.

Розрахункові значення опору розтягу R_c і деформацій композиційних матеріалів ϵ_{cp} визначаються розподілом нормативних значень цих характеристик коефіцієнт надійності по композиційному матеріалу γ_{cm} : $\gamma_{cm}=1,1$ для смуг заводського виготовлення; $\gamma_{cm} = 1,1 - 1,2$ для односпрямованих полотен з вуглецю; $\gamma_{cm}=1,2 - 1,4$ для односпрямованих полотен з арамиду; $\gamma_{cm}=1,5 - 1,8$ для двонаправлених полотен зі скловолокна.

1.2.3 Вуглецеві волокна

Вуглецеві волокна стають все більш популярними в створенні композитних матеріалів для використання в ремонті та посиленні будівельних конструкцій. За останні 10 років обсяг їхнього виробництва збільшився на порядок. Процес виготовлення вуглецевих волокон включає використання різних вихідних матеріалів, які називаються прекурсорами.

Механічні характеристики волокон значно залежать від прекурсора та умов карбонізації, тобто ступеня насичення вихідного матеріалу вуглекислим газом. Ці фактори визначають ступінь дефектності утвореного кристала і, відповідно, фізико-механічні властивості виготовлених вуглецевих волокон.

Існує три основні типи прекурсора.

Перший тип вуглецевих волокон виробляється з очищеної нафти або вугілля (пеків). Процес включає екструзію цих матеріалів під великим тиском через дуже тонке сопло (фільтр), а після цього відбувається карбонізація при температурі до 2000 °С. Ступінь графітизації може бути налаштована за допомогою наступних термічних обробок. У результаті отримують високомодульні пекові волокна з високою щільністю.

Другий тип вуглецевих волокон - це поліакрилонітрилові волокна (ПАН-волокна), які виробляються з поліакрилонітрильного прекурсора шляхом його карбонізації під впливом високої температури. Діаметр отриманих волокон менший і становить від 5 до 8 мкм. Деталі технології є комерційною таємницею, але відомо, що процес включає три стадії, і кінцева структура залежить від швидкості нагрівання. Структура волокон визначається ступенем карбонізації та орієнтацією кристалів. Розробка високоміцних волокон призвела до створення високодеформативних ПАН-волокон, які можуть витримувати деформацію при розриві до 2%.

Третій тип прекурсора - целюлозні волокна. Однак, через складний процес розкладання (піролізу) целюлози, обсяги виробництва вуглецевих волокон за цією технологією залишаються невеликими.

Необхідно відзначити, що існує велика кількість вуглецевих волокон, що виробляються за різними технологіями, і постійно з'являються нові види. Наприклад, недавно були розроблені спіралевидні волокна, які можуть подовжуватися у декілька разів без втрати жорсткості [50].

1.2.4 Властивості композиційних матеріалів

Фізико-механічні характеристики композиційних матеріалів залежать від типу та кількості використовуваних волокон, їх орієнтації та розподілу в поперечному перерізі стрічки, а також об'ємного співвідношення між волокнами та отверждаючим полімером у композиті. Загальні механічні властивості волокон, які застосовуються в будівництві, наведені в таблиці 1.3, а властивості отверждаючих полімерів - в таблиці 1.4.

Таблиця 1.3 - Механічні властивості волокон композиційних матеріалів

Тип фібри	Міцність на розтягування, МПа	Модуль Пружності, ГПа	Деформація подовження, %	Щільність, т/м ³
Вуглець з високою міцністю*	4300-4900	230-240	1,9-2,1	1,8
Вуглець з високим модулем пружності*	2740-5490	294-329	0,7-1,9	1,78-1,81
Вуглець з високим модулем пружності**	2600-4020	540-640	0,4-0,8	1,91-2,12
Арамід***	3200-3600	124-130	2,4	1,44
Стекло	2400-3500	70-85	3,5-4,7	2,6
* на поліакринітриловій матриці				
* * на матриці з епоксидної смоли				
* ** арамід може мати ту ж міцність з меншим модулем пружності				

Таблиця 1.4 - Фізико-механічні властивості полімерів

Фізико-механічні властивості полімерів	Фірма-виготовник				
	MBT	SBD	DML composites	Sika	Sumitomo

Міцність на розтягування, МПа	50	17	81	30	29
Міцність при вигині, МПа	120	28	-	-	-
Модуль пружності при вигині, ГПа	3	5	-	3,8	2,5
Температура склування, °С	55	60,	59	53	55
		80			

Останнім часом, крім полотен і смуг з композиційних матеріалів, стали виготовляти гладку арматуру, дріт, канати, пасма, каркаси і оболонки. Зазвичай ці види композиційних матеріалів використовуються при новому будівництві, замінюючи звичайну сталеву арматуру в умовах передбачуваної агресивної дії зовнішнього середовища.

Ключовою характеристикою композиційних матеріалів, яка має визначальне значення при виборі системи посилення залізобетонної конструкції, є їх пружна деформація до моменту руйнування. Оскільки композиційні матеріали не виявляють пластичності, як сталь, їх руйнування має крихкий характер. У зв'язку з цим, при проектуванні посилення залізобетонних елементів композиційними матеріалами необхідно встановлювати обмеження на розмір пружних деформацій бетону і сталі, які взаємодіють з композиційними матеріалами.

Також важливо враховувати, що пружний характер деформації композиційного матеріалу не сприяє перерозподілу напруг в посиленій конструкції.

Поведінка композиційних матеріалів під навантаженням визначається мікромеханічними процесами деформації і руйнування. Ці процеси залежать від діаметру волокна, його розподілу в матриці, паралельності волокон, наявності місцевих дефектів матеріалу та об'ємного співвідношення волокна і полімеру. Фізико-механічні властивості композиційного матеріалу визначаються властивостями його складових (волокон і полімеру) і їх об'ємним співвідношенням в композиті. Модуль пружності композиційного матеріалу (E_c) і його міцність на розтягування (R_c) визначаються за

відповідними формулами:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m; \quad 1.2.5$$

$$R_c = R_f V_f + R_m V_m, \quad 1.2.6$$

де E_f , R_f , V_f - відповідно модуль пружності, міцність на розтягування і об'ємне співвідношення в композиті волокон; E_m , R_m , V_m - те ж саме для отверждающего полімеру. При цьому $V_f + V_m = 1$.

У випадку попередньо виготовлених смуг композиційного матеріалу їх властивості визначаються площею поперечного перерізу, яка враховується при розрахунках. Коли композиційні матеріали виготовляються на місці (наприклад, полотна, які утоплюються в клей-матрицю), товщина і вміст волокон в матеріалі можуть коливатися і змінюватися в значних межах.

З огляду на те, що модуль пружності і міцність волокон (фібри) набагато перевищують модуль пружності і міцність отверждающего матеріалу, механічні властивості композиційного матеріалу визначаються властивостями волокон і площею поперечного перерізу всього матеріалу, лише площею перерізу одних волокон. Якщо враховувати, що властивості композиційного матеріалу визначаються його площею поперечного перерізу, включаючи як волокна, так і полімер, то очікується, що модуль пружності та міцність всього матеріалу будуть меншими у порівнянні з властивостями самих волокон. Очевидно, що механічні характеристики композитного матеріалу не зазнають змін через збільшення площі його поперечного перерізу в порівнянні з площею перерізу лише волокон, що входять до його структури. Існує суворя відповідність між кількістю волокон у композиційному матеріалі та його механічними властивостями. Це становище відбито у таблиці 1.5 .

Таблиця 1.5- Фізико-механічні властивості компонентів, що входять до композиційного матеріалу

Фізико-механічні властивості компонентів, що входять до композиційного матеріалу: $E_f=220\text{м}^{\wedge}$ $R_f=4000\text{МПа}$, $E_m=3\text{м}^{\wedge}$ $R_m=80\text{МПа}$								
Площа поперечного перерізу, мм^2			Властивості композиційного матеріалу				Руйнівне навантаження	
Af	Am	Ac*	$V_f, \%$	$E_c, \text{МПа}$	$R_c, \text{МПа}$	Гранична деформація, %	кН	%
70	0	70	100	220000	4000	1,818	280,0	100
70	30	100	70	154900	2844	1,823	282,4	100,9
70	70	140	50	111500	2040	1,830	285,6	102,0
* при використанні стрічки шириною 100мм її товщина складе 0,7мм, 1,0мм і 1,4мм								

Так, з таблиці 1.3 видно, що при постійній кількості волокна в композитному матеріалі (тобто за незмінної площі поперечного перерізу) руйнівне навантаження та гранична деформація змінюються незначно при зростанні площі поперечного перерізу отверждающего полімеру. Це свідчить про те, що механічні характеристики композитного матеріалу в даному випадку в основному залежать від властивостей волокон, і зміна площі полімерного матеріалу має обмежений вплив на ці параметри. Цю обставину особливо важливо враховувати під час проектування посилення композиційними матеріалами безпосередньо дома виконання робіт. При розрахунку параметрів посилення беруться до уваги лише площа поперечного перерізу та механічні властивості волокон, а не всієї системи загалом.

1.2.5 Конструктивні рішення

Так, метод граничних станів є одним із основних методів для розрахунку будівельних конструкцій. Його основна мета - забезпечення надійності та безпеки конструкцій, враховуючи всі можливі впливи та

навантаження. Під граничними станами розуміють межі, які не повинні бути перевищені в процесі експлуатації для забезпечення безпечної та стійкої роботи конструкцій.

Метод граничних станів враховує різні аспекти, такі як міцність матеріалів, стійкість конструкцій, обмеження деформацій, а також безпеку від різних видів навантажень та впливів. Застосування цього методу дозволяє інженерам забезпечити ефективний та безпечний дизайн будівель та інженерних конструкцій.

Нормативні документи визначають вимоги до граничних значень напружень, деформацій, а також умови безпечної експлуатації конструкцій на протязі їхнього терміну служби. Врахування всіх цих аспектів допомагає створити надійні та безпечні інженерні рішення.

Під посиленням будівельної конструкції розуміється комплекс заходів, спрямованих на удосконалення її несучої спроможності, жорсткості, тріщиностійкості та інших фізичних характеристик, необхідних для забезпечення оптимальних умов подальшої експлуатації.

Посилення залізобетонних конструкцій.

Системи забезпечення надійності становлять ключову складову системи забезпечення якості і охоплюють усі етапи життєвого циклу інженерних споруд - починаючи від отримання вихідних даних для проектування і розробки відповідних методик, завершуючи будівництвом та експлуатацією. Однак статистичний аналіз відмов різних інженерних споруд свідчить про те, що вони можуть траплятися як протягом призначеного терміну служби, так і поза його межами.

Для успішної розробки технології та вибору матеріалу для ремонту та посилення будівельної конструкції необхідно використовувати системний підхід. Незалежно від обраної технології та матеріалу посилення, однією з основних вимог є здатність багатокomпонентної системи працювати як цілісна одиниця протягом визначеного періоду часу. Це можливо лише за умови забезпечення належного та тривалого зчеплення між бетоном,

ремонтним матеріалом та зовнішньою арматурою, виготовленою з композиційного матеріалу, яка знаходиться в умовах експлуатації. Результатом повинна бути структура конструкції, яка функціонує як єдине ціле.

Системний підхід до діагностики, проектування ремонту та посилення будівельних конструкцій, виконання робіт з ремонту та посилення, а також моніторингу стану будівельної конструкції під час експлуатації може бути відображений у вигляді блок-схеми, яка представлена на рисунку 1.2.

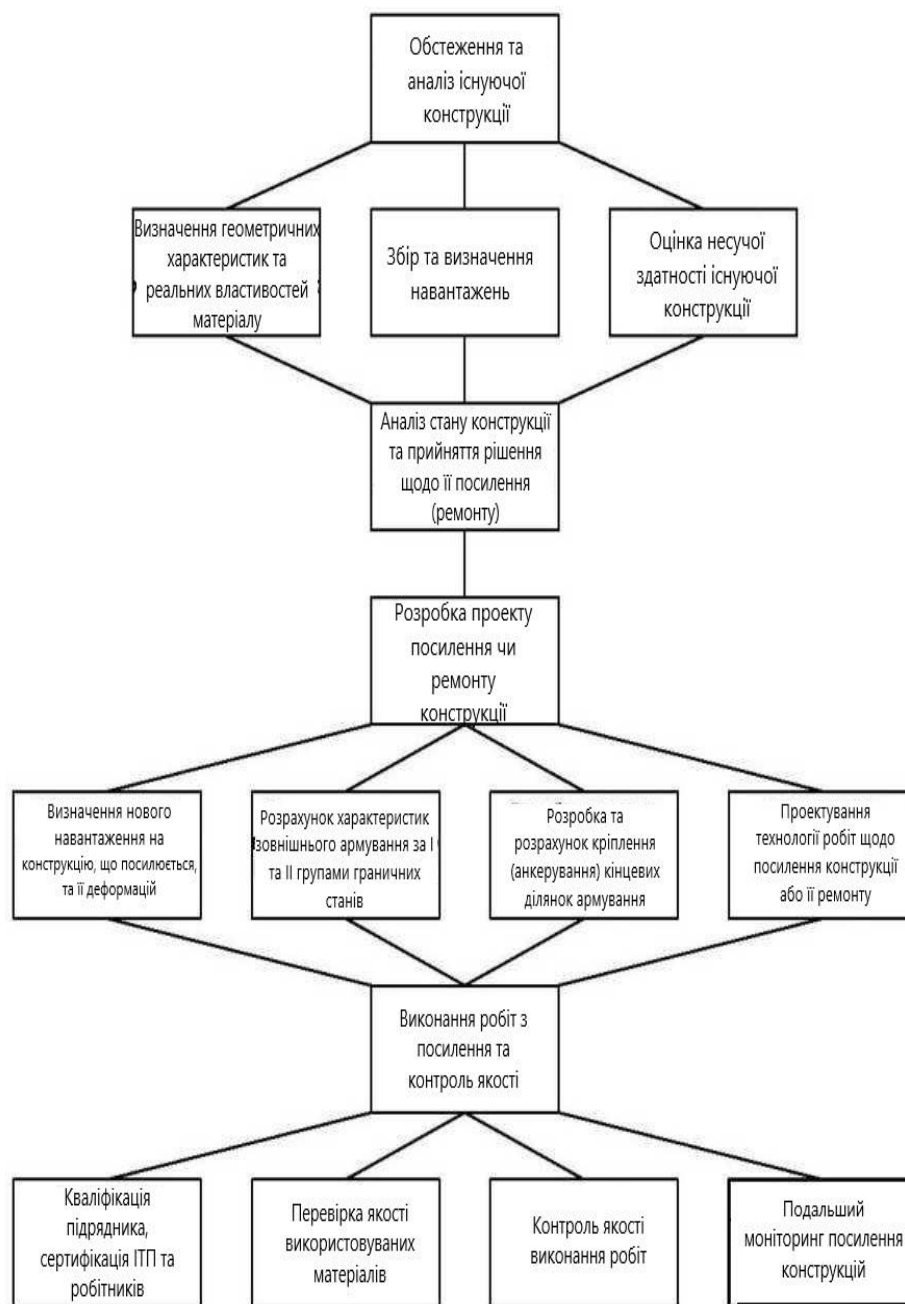
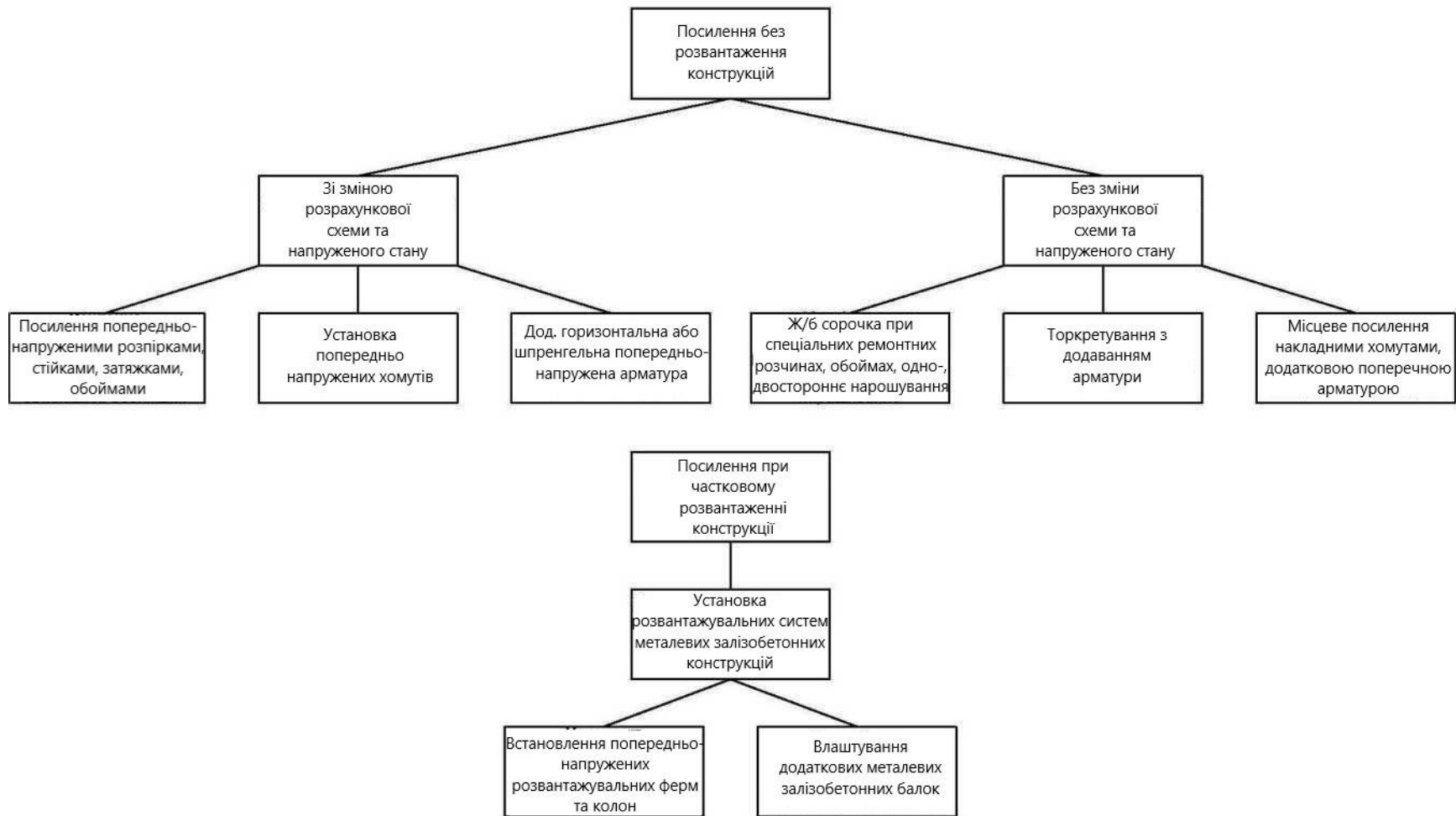


Рисунок 1.2 - Схема комплексу робіт по посиленню будівельних конструкцій

Способи відновлення несучої здатності та посилення будівельних конструкцій, які представлені на рисунку 1.3, є найбільш поширеними і відображають різноманітність доступних методів [27].

Практично всі дослідники, які займаються питанням посилення конструкцій, в своїх роботах подають докладні огляди методів посилення, аналізуючи їх переваги та недоліки. Вони розробляють детальні класифікації методів посилення, хоча у багатьох випадках межа між ними є умовною. Наприклад, різні методи часто взаємопов'язані, і важко провести чітку межу між методами, які передбачають зміну конструктивної схеми, та тими, які використовують часткове розвантаження конструкції. "Прості" попередньо-напружені зтяжки або шпренгелі, в суті, є конструкціями, спрямованими на розвантаження існуючих елементів, які згинаються, тоді як додаткові залізобетонні опори, створені для посилення згинаються елементів, викликають перерозподіл зусиль у статично невизначених конструкціях.

Рисунок 1.3 - Способи посилення будівельних конструкцій



Посилення конструкцій споруд є частиною загального процесу по відновленню їх працездатного стану (рис.1.4).

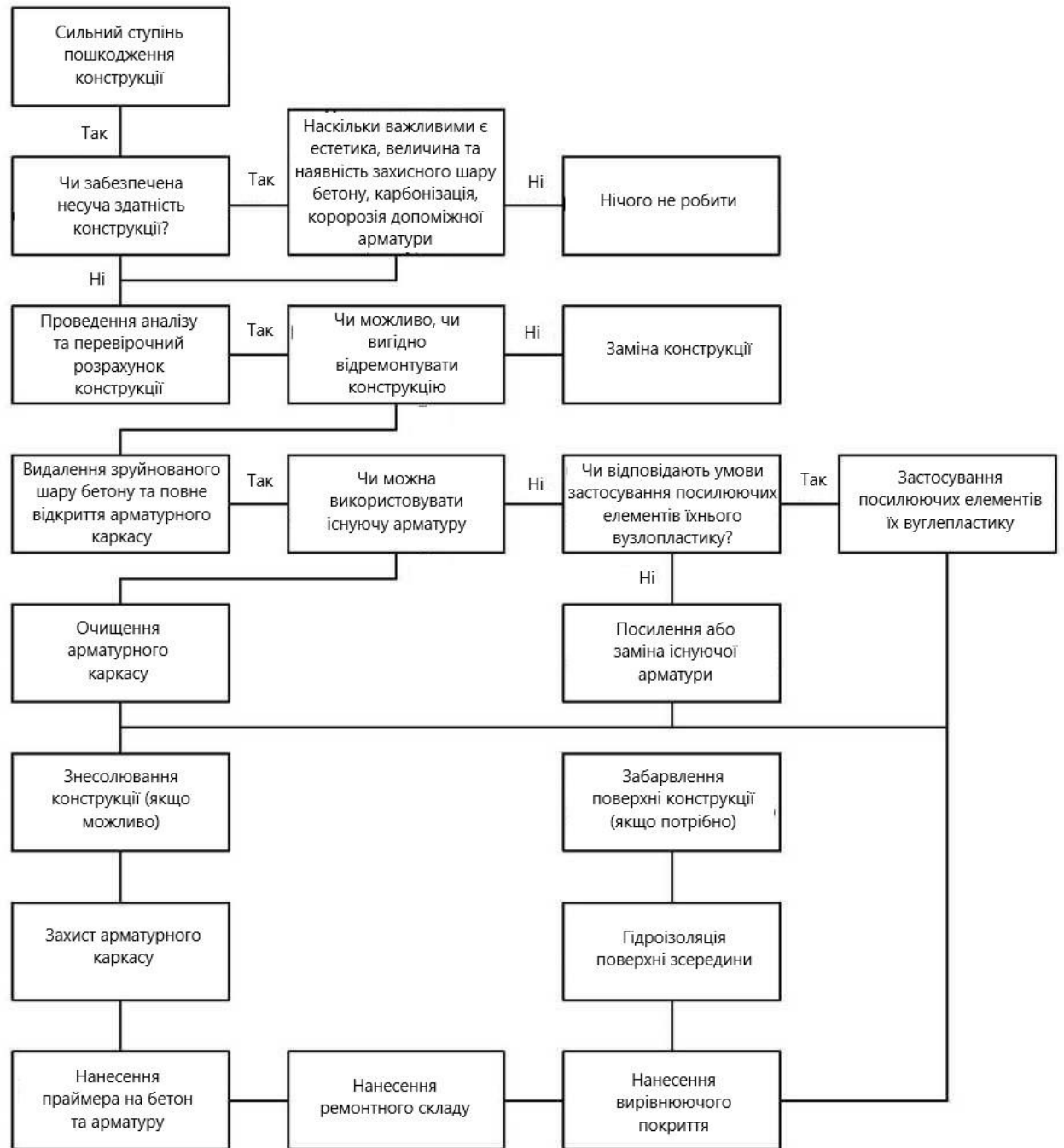


Рисунок 1.4 - Технологічний маршрут ремонту конструкцій із застосуванням композиційних матеріалів

Посилення інженерних конструкцій є необхідним, якщо вони не відповідають перевірочним розрахункам з несучою здатністю або нормами експлуатації. Після проведення відповідних розрахунків важливо вибрати метод посилення, який відповідає вимогам безпечної експлуатації споруди, забезпечує зручність монтажу елементів і може бути реалізований без

припинення виробничого процесу. У цьому відношенні композитні матеріали на основі вуглецевих волокон є найбільш відповідними, враховуючи їхню технологічність та здатність забезпечити безперервність виробничого процесу.

1.2.6 Проектування посилення згинальних залізобетонних конструкцій - загальні положення

Можливість посилення залізобетонних конструкцій у режимі вигину шляхом застосування зовнішнього армування композиційними матеріалами визначається можливістю приклеювання цих матеріалів в розтягнутій зоні конструкції. При цьому важливим аспектом є встановлення напрямку фібри композиту паралельно максимальним зусиллям, яке виникає внаслідок розтягуючого навантаження (вздовж осі конструкції).

У випадку відновлення або підвищення несучої здатності залізобетонних плит існує кілька варіантів посилення. Найбільш поширеним є метод посилення плит в напрямку дії максимального згинального моменту вздовж їх довгої сторони. При цьому, при впливі зосередженого навантаження на плиту, не завжди виникає потреба в посиленні всієї розтягнутої грані. Часто достатньо зміцнення лише тих областей, де діє зосереджена сила.

Відповідно до загальних нормативних положень щодо розрахунку залізобетонних елементів, які піддаються згину та були посилені композиційним матеріалом, проектування конструкцій повинно включати розрахунки на міцність перерізу, які проводяться для напрямків, нормальних до поздовжньої осі елемента, і для перерізів, нахилених до поздовжньої осі елемента, за другою групою граничних умов. Ці розрахунки охоплюють перевірку отриманих результатів за міцністю та деформаційною поведінкою.

У разі розташування композиційних матеріалів у розтягнутій зоні перерізу посиленого елемента, необхідно виконати перевірку можливості відшарування композиту під впливом поперечних і зсувних сил. Також важливо оцінити можливість втрати зчеплення між композиційним

матеріалом і старим бетоном або ремонтним матеріалом у тих місцях, де можуть виникнути стрибки дотичних напруг.

Граничні зусилля в перерізі, нормальному до подовжньої осі елемента, в подібних випадках визначаються виходячи з таких допущень:

- перетин, плоский до застосування навантаження залишається таким і після його застосування (гіпотеза плоских перерізів);
- опір бетону стиску визначається напругами, рівними R_b і рівномірно розподіленими по стиснутій зоні бетону;
- опір бетону розтягнутої зони приймається рівним нулю;
- деформації (напруга) в арматурі визначаються залежно від висоти стислої зони бетону;
- стискаюча напруга в арматурі приймаються не більше за розрахунковий опір стиску R_{sc} , але не більше 400 МПа;
- композиційний матеріал посилення має лінійну діаграму деформації аж до руйнування;
- розтягуюча напруга в арматурі приймається не більше розрахункового опору розтягуванню R_s ;
- виключається зсув поверхні між бетоном і композиційним матеріалом (це припущення цілком обгрунтовано для найчастіше застосовуваних адгезивів товщиною до 1,0 - 1,5мм, деформуються в'язко-пружно, а деформації зсувної повзучості і усадки яких незначні).
- В ході розрахунків визначається необхідна площа поперечного перерізу композиційного матеріалу, зокрема вуглепластика.

У першому етапі проектування важливо оцінити навантаження на конструкцію до та під час проведення робіт з посилення та відновлення несучої здатності. Це включає визначення початкової деформації вкрай розтягнутого волокна бетону, до якого в подальшому буде приклеєний композиційний матеріал для посилення. При проектуванні важливо розрізняти дві основні ситуації.

У першій ситуації мова йде про посилення конструкції, яка знаходиться у працездатному стані та розрахована на нове підвищене навантаження. У цьому випадку деформації S_{bto} (максимальна деформація вкрай розтягнутого волокна бетону перед посиленням) вже виникають до встановлення смуги композиційного матеріалу в розтягнутій зоні бетону і не будуть подальше враховуватися.

У другій ситуації йдеться про ремонт та відновлення початкової несучої здатності конструкції. Тут, як правило, ремонтному складу приєднується композитний матеріал. Хоча ремонтний склад частково передає деформації існуючого бетону, переважно він відчуває деформації, що розтягують, разом із приклеєною смугою композиту. Отже, при проектуванні відновлення несучої здатності конструкції не рекомендується враховувати початкові деформації розтягування бетону.

Система посилення конструкцій композиційними матеріалами.

Система посилення конструкцій композиційними матеріалами складається з двох ключових компонентів: самого композиційного матеріалу і адгезиву, або клеючого складу. Ефективність цієї системи залежить від надійності роботи кожного з її елементів та від спільної надійності їх взаємодії. Основне призначення адгезиву, крім самого процесу приклеювання, полягає в сприйнятті зсувних і відривних зусиль між поверхнями, які з'єднуються. Для приклеювання композитного матеріалу до бетонної поверхні часто використовують епоксидні двокомпонентні клеї, які здатні зчеплюватися при позитивних температурах навколишнього середовища.

У невеликому об'ємі застосовуються адгезиви і на іншій основі. Проте їм властивий цілий ряд недоліків, що обмежують сферу застосування:

- адгезиви, що базуються на поліестері, відзначаються великими усадковими деформаціями та високим коефіцієнтом температурного розширення. Ці матеріали схильні до агресії в лужному середовищі та швидко витворюють твердий стан.

- адгезиви, які містять вінілові полієфіри, характеризуються великими усадковими деформаціями, і при збільшеній вологості не можуть забезпечити надійне зчеплення між поверхнями, які приклеюються.
- поліуретанові адгезиви мають ті самі недоліки, що і полієфірні, і важко забезпечують необхідне зчеплення між поверхнями.

Вибір певного типу епоксидного адгезиву залежить від особливостей його застосування і визначається рядом факторів, таких як температурно-вологісний режим навколишнього середовища та поверхонь, які приклеюються, а також необхідна швидкість твердіння. Адгезиви повинні мати стійкість до температур до $+50^{\circ}\text{C}$ під час експлуатації і володіти температурою склеювання від $+50^{\circ}\text{C}$ до $+65^{\circ}\text{C}$.

Більшість використовуваних адгезивів призначені для з'єднання сухих поверхонь. Для приклеювання вологих поверхонь і для з'єднання конструкцій, які перебувають у воді, розроблені спеціальні клеї на основі епоксидів.

При використанні спеціального праймерного складу для вирівнювання поверхні бетону перед посиленням, механічні властивості цього складу повинні враховувати, з одного боку, сумісність з характеристиками старого бетону, і, з іншого боку, відповідати властивостям адгезиву. Тільки при врахуванні цього аспекту при виборі системи посилення можна досягти ефективної взаємодії між будівельною контракцією, що підсилюється, та посиленням композиційним матеріалом.

Для досягнення необхідного зчеплення композиційного матеріалу з поверхнею бетону важливими є температурно-вологісні умови на місці проведення робіт і якість підготовки поверхні конструкції, яка підсилюється. Забруднення та нерівна поверхня можуть ускладнити досягнення необхідного якісного зчеплення з композиційним матеріалом.

У процесі твердіння в адгезиві відбуваються хімічні процеси, що різко уповільнюються при температурі менше $+10^{\circ}\text{C}$. Тому в більшості випадків під час виконання робіт з посилення навколишня температура має бути понад

+10⁰C [26].

Останнім часом відбувся значний прогрес у технології прикріплення смуги композиційного матеріалу до бетонної поверхні за допомогою механічного методу, який включає в себе використання численних спеціальних затискачів, поєднаних з анкерними болтами на кінцях стрічки. Затискачі рівномірно розташовуються вздовж всієї довжини стрічки. Ця система посилення має кілька переваг порівняно з традиційним методом приклеювання: відпадає необхідність у дуже тщательній підготовці бетонної поверхні; роботи з посилення можна проводити при негативних температурах навколишнього середовища, зменшуються вимоги до кваліфікації робітників, і є можливість уникнути такого виду пошкодження посилених конструкцій, як відшарування смуги композиційного матеріалу від бетону, особливо на кінцевих ділянках.

Рекомендований ступінь посилення конструкцій.

При зовнішньому посиленні залізобетонних конструкцій композиційними матеріалами можна виділити два випадки, які відрізняються як за умовами подальшої експлуатації конструкції після приклеювання смуг композиційного матеріалу, так і за принципами проектування та технологією проведення робіт.

У першому випадку ми маємо ситуацію, коли композиційний матеріал використовується для посилення будівельної конструкції. Тобто, умови експлуатації передбачають збільшення навантаження на спорудження в цілому або на окремі його елементи. В таких випадках необхідно збільшити несучу здатність перерізу залізобетонної конструкції. Зазвичай сама конструкція перебуває в хорошому експлуатаційному стані і вимагає мінімальних витрат для проведення косметичного ремонту її поверхні, на яку буде приклеєно композиційний матеріал.

Другий випадок виникає в умовах, коли композиційний матеріал використовується для відновлення несучої здатності конструкції. У цьому випадку, під впливом негативних факторів навколишнього середовища,

таких як корозія арматури та руйнування бетону, несуча здатність залізобетонної конструкції падає пониженням початкової проектної навантаженості. Важливо відзначити, що йдеться про залізобетонні конструкції, які можна ще відремонтувати і відновити їх несучу здатність, а не про конструкції, які вимагають повної заміни.

Одним з найбільш важливих питань, які доводиться вирішувати при проектуванні посилення залізобетонних конструкцій композиційними матеріалами, є допустимий ступінь посилення, тобто наскільки можна збільшити здатність існуючого елемента, що несе, без шкоди подальшої безпечної експлуатації конструкції.

З одного боку, через обмежений досвід тривалої експлуатації будівельних конструкцій, посиленних композитами, мінімізація ризику проектних рішень досягається за допомогою використання збільшених коефіцієнтів надійності для застосовуваних матеріалів посилення та умов їх експлуатації.

З іншого боку, цілком логічною є вимога того, що навіть у випадку можливого руйнування композиційного матеріалу для посилення, будівельна конструкція повинна протягом певного часу зберігати свої експлуатаційні якості, щоб уникнути аварійних ситуацій.

Виходячи з цього, багато зарубіжних дослідників рекомендують не більше ніж дворазове збільшення несучої здатності конструкції при її посиленні при згинанні.

В принципі руйнування композиційного матеріалу можливе:

- при силових діях від статичних навантажень;
- при силових діях від динамічних навантажень;
- при зовнішніх діях (вогнь при пожежі, агресивне зовнішнє середовище, акту вандалізму і так далі).

При визначенні ступеня посилення важливим фактором є можливий вплив вогню. По-перше, клеї, що використовуються на основі епоксиду, мають невисоку температуру склеювання і швидко руйнуються при високих

температурах. По-друге, вимоги щодо пожежної безпеки є однією з основних для забезпечення надійності експлуатації залізобетонних конструкцій, особливо в аварійних ситуаціях.

Рекомендації з проектування посилення залізобетонних конструкцій композитними матеріалами, що були прийняті Американським інститутом бетону (США) [43], передбачають наступний підхід до обмеження рівня посилення: конструкція зі знизеними значеннями міцності арматурної сталі та бетону в процесі експлуатації і без урахування композитного матеріалу не повинна руйнуватися від впливу високих температур під час експлуатаційних навантажень. Звісно, час опору залізобетонної конструкції вогневому впливу визначається нормами протипожежної безпеки. Отже, навіть у разі руйнування композитного матеріалу, конструкція залишиться здатною сприймати певний рівень навантажень протягом певного періоду часу.

Відповідно до визначених нормативами коефіцієнтів надійності при навантаженнях, максимальний рівень посилення може бути досягнутий шляхом збільшення тимчасового навантаження на більше ніж 2 рази. Мінімальний ступінь посилення визначається зі збільшенням постійного навантаження без наявності тимчасового (не більше 5%). У інших ситуаціях ступінь посилення залежить від відношення постійного і тимчасового навантажень до процесу посилення конструкції.

При визначенні ступеня посилення важливо враховувати, що нове підвищене навантаження повинно бути перевірене не лише для конструкцій, які піддаються посиленню, але і для всієї споруди в цілому.

Коли відновлюється початкова несуча здатність ремонтуваних конструкцій за допомогою композиційних матеріалів, важливо враховувати, що, навіть при зниженні несучої здатності, конструкція залишається працездатною і спроможною переносити постійні навантаження, такі як власна вага. Навіть у випадку виникнення пожежі та пошкодження

композитного матеріалу, конструкція може повернутися до свого стану перед ремонтними роботами і протягом певного часу залишатися функціональною.

1.2.7 Технологія виробництва робіт

Наклейка на нижню поверхню накладок з композитних матеріалів використовується для посилення плитних конструкцій. Напрямок волокон у нижніх накладках зорієнтований вздовж осі конструкції, тоді як у поперечних накладках напрямок волокон перпендикулярний до поздовжніх накладок.

Склад робіт з посилення залізобетонної конструкції виглядає так :

- Підготовка основи під наклейку (вирівнювання, очищення шляхом пікоструминної обробки тощо);
- Розкрій стрічки або ламінату (виконується відповідно до прийнятої проекту схеми);
- Приготування адгезиву;
- Наклейка стрічок (тканини) (тканина (стрічка) повинна укладатися без складок і без зайвого натягнення. Після укладання здійснюється наочення тканини);

По специфіці виробництва робіт можна виділити:

- наклейку на горизонтальні поверхні знизу (на поверхню плит, балок, стелі);
- наклейку на горизонтальні поверхні згори;
- наклейку на вертикальні поверхні (стіл, колон та ін.).

Під час наклеювання на горизонтальні поверхні знизу (наприклад, стеля), стрічка спочатку фіксується з одного кінця і потім поступово розгладжується та закріплюється по всій довжині. Час витримки, перед яким стрічка фіксується на поверхні, залежить від в'язкості використаного адгезиву і може бути здійснений або безпосередньо після нанесення адгезиву, або після певного часу, коли в'язкість адгезиву зростає, забезпечуючи надійну фіксацію стрічки на стелевій поверхні, тобто стрічка не відвалюється після наклеювання.

Час витримки визначається шляхом проведення експерименту. Для кожного наступного шару тривалість витримки перед наклейкою також визначається шляхом експерименту. Притискання (накочування) стрічки проводиться від центру до країв для запобігання утворенню складок. Зазвичай процес наклеювання стрічок на стельову поверхню виконується принаймні двома робітниками.

Для полегшення процесу укладання при довжині посилюючих елементів, перевищує 3 метри, рекомендується використовувати окремі смуги стрічки, які потрібно стикувати внахлест по довжині. Величина нахлеста повинна бути не менше 100 мм. Процес наклеювання внахлест може проводитися як на вологий шар адгезиву, так і на вже затверділий. У випадку останнього, зона покриття повинна бути оброблена наждачним папером і протерта змоченою ацетоном ганчіркою.

Стикування здійснюється завжди вздовж стрічки, за напрямом розташування волокон. Стикування багат шарової конструкції посилення має здійснюватися в розбіжність по довжині (у різних перерізах).

Рекомендується уникати розрізання стрічки вздовж волокон, оскільки це може призвести до її розпускання на окремі смужки. У випадках, коли розрізання вздовж волокон є необхідним, стрічка повинна перед цим бути попередньо оброблена клеєм БФ по лінії розрізу для запобігання розпусканню волокон у поперечному напрямку.

Виконання робіт з накладання посилювальних накладок в значній мірі залежить від різних факторів, таких як температура та вологість навколишнього середовища, температура поверхні бетону та його вологість, а також співвідношення температури поверхні бетону і точки роси. Операції з накладання стрічок можуть проводитися за температурного режиму в межах $+5^{\circ}\text{C}$ до $+45^{\circ}\text{C}$; при цьому температура поверхні бетону повинна бути не нижче 5°C і вище температури точки роси на 3°C . Якщо температура поверхні бетону опускається нижче допустимого рівня, це може призвести до недостатнього проникнення волокон і недостатньої затвердіння смоли, що

негативно вплине на функціональність системи посилення. Для збільшення температури можуть використовуватися додаткові місцеві джерела тепла.

Грунтові та адгезивні склади слід наносити тільки на суху поверхню. Будь-яка залишкова волога повинна бути видалена, поверхня бетону повинна бути протерта і продута стисненим повітрям. Максимально допустимий рівень вологості поверхні - не більше 5%.

Повний процес затвердіння адгезивних складів, який відбувається природним чином, зазвичай займає кілька днів і суттєво залежить від температури навколишнього середовища. Загалом, час затвердіння має складати принаймні 24 години при температурі вище 20°C та не менше 36 годин при температурі від 5°C до 20°C.

З метою забезпечення безпеки (вогнестійкості, захисту від вандалізму) або з оглядових причин, елементи посилення можуть бути покриті різними матеріалами на заключних етапах робіт. Ці покриття можуть включати полімерцементні, поліуретанові, або спеціальні вогнетривкі склади, які сумісні з адгезивом. Для забезпечення кращого зчеплення цих покриттів з накладкою, на поверхню останньої в процесі укладання фінішного шару може бути нанесений тонкий шар сухого піску з розміром часток 0,5 - 1,5 мм.

1.3 Особливості методу кінцевих елементів

Розрахунковий аналіз будь-якої конструкції розпочинається спробою визначити, які аспекти є ключовими, а які можна ігнорувати. Спрощення завдання вводяться завжди, оскільки врахування всіх властивостей реальної конструкції у розрахунках можливе лише з певним ступенем наближення.

Реальна конструкція, після усунення несуттєвих деталей і її ідеалізації у певну форму, визначається як розрахункова схема. Деякі методи ідеалізації є загальними (наприклад, уявлення про матеріал як суцільне середовище, припущення про однорідність матеріалу, перетворення геометричної форми тіла на стандартні схеми, такі як стрижні, пластини або оболонки, та інші),

тоді як інші є конкретними і пов'язаними із кожним конкретним завданням. У всіх випадках вибір розрахункової схеми є ключовим етапом аналізу, визначаючи рівень професійної майстерності інженера. Однак після того, як розрахункова схема встановлена, настає період її детального опису у формі, придатній для виконання розрахункового аналізу, і вже цьому етапу далі присвячені конкретні рекомендації.

Що стосується загальних аспектів, важливо врахувати, що на початкових етапах створення розрахункової схеми необхідно вирішити, чи слід використовувати лінійний чи нелінійний метод розрахунку, чи потрібно враховувати сили інерції та виконувати динамічний аналіз, чи можна обійтися статичним.

Очікувану поведінку конструкції оцінюють на основі інженерного досвіду та інтуїції, і всі прийняті рішення піддаються подальшій апостеріорній оцінці. Якщо всі рівняння, які описують поведінку системи, не містять похідних за часом, то ми маємо справу зі статичною задачею, що передбачає аналіз нерухомої системи. У випадках динаміки, де велике значення мають сили інерції, пропорційні прискоренням мас, або в завданнях повзучості, де враховуються швидкості, ми маємо справу з аналізом рухливої системи.

Нелінійні випадки можуть виникати у зв'язку з різноманітними ефектами. Наприклад, геометрична нелінійність пов'язана із зміною форми системи під навантаженням, фізична нелінійність виникає при відсутності пропорційності між напругою та деформаціями, конструктивна нелінійність пов'язана з увімкненням та вимиканням односторонніх зв'язків при дії навантаження, а генетична нелінійність визначається змінами структури системи під час її створення.

Всі вищезазначені особливості очікуваної поведінки конструкції впливають на вибір розрахункової схеми, зокрема враховуються при визначенні можливих ступенів свободи або при схематизації навантажень, які діють на систему.

Особливо важливим є питання розбиття системи на кінцеві елементи, тобто стандартні частини, з яких складається вся система.

Екстремально мале розбиття (дріблення) може призвести до збільшення часу розрахунку і вимагати значних ресурсів пам'яті комп'ютера для зберігання та обробки даних. Це також може спричинити нестабільність процесу розрахунку. З іншого боку, надто велике розбиття може призвести до втрати точності результатів, особливо при розрахунках для пластинчастих або оболонкових конструкцій.

1.4 Висновки по розділу.

Вуглецеві волокна є високоефективними, жорсткими та міцними композитними матеріалами, які широко використовуються для посилення будівельних конструкцій. З їхніми винятковими характеристиками, такими як висока міцність на розтягування та модуль пружності, низька щільність і здатність до адаптації під різноманітні форми конструкцій, вони не потребують громіздких установок для монтажу. Ці матеріали знаходять широке використання для відновлення несучої здатності та посилення будівельних конструкцій в різних інженерних спорудах, особливо під час реставрації пам'яток архітектури.

Вивчення вуглепластика обране в якості об'єкта дослідження через його широке поширення та часте застосування порівняно з іншими типами волокон (фібр).

Важливим елементом для аналізу напружено-деформованого стану системи є врахування процесу її монтажу у схемі, що моделює технологічні моменти, пов'язані з посиленням конструкцій (у цьому випадку системи із вуглепластику). Це дозволило впровадити можливість попередньої напруги для активації системи посилення під час подальших навантажень.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ. ПАРАМЕТРИ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Геометричні параметри

Залізобетонна плита перекриття.

Об'єктом дослідження є фрагмент каркасної конструктивної схеми будівлі, який охоплює один прольот у двох напрямках (див. рис. 2.1). Цей фрагмент включає безбалочну монолітну залізобетонну плиту перекриття товщиною 230 мм, монолітні залізобетонні колони з перетином 400x400 мм, із кроком колон 7,5 на 7,5 м. Обрано проліт завдовжки 7,5 м, що обумовлено результатами попередніх досліджень: значними деформаціями під впливом збільшення навантаження, які вказують на активну участь елементів системи посилення та формування характерних графіків залежностей. Товщина перекриття визначена на підставі рекомендацій, де для безбалочних плит при прольоті 1 товщина плити призначається в межах від 1/32 до 1/25 величини прольоту [17]. Розглядається робота плити у двох напрямках, враховуючи співвідношення довжин сторін, яке в даному випадку становить 1.

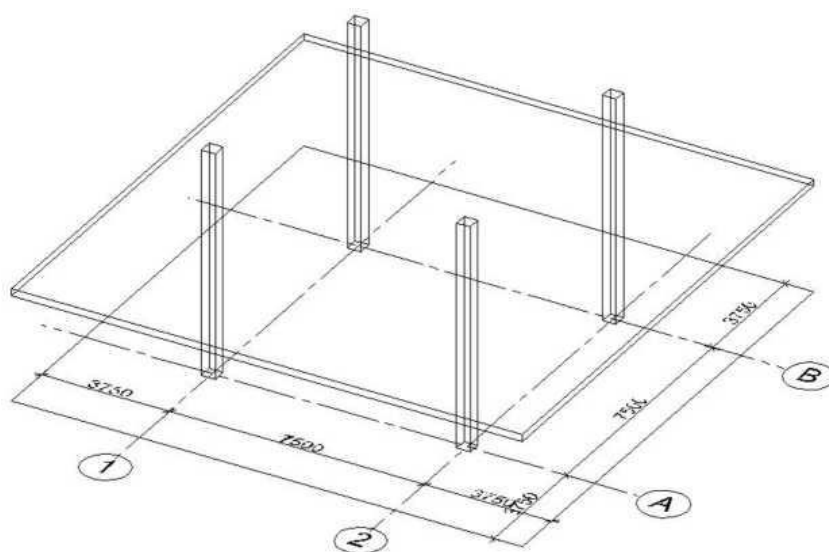


Рисунок 2.1 - Схема об'єкту дослідження

Система посилення углепластиком.

Залізобетонна плита при роботі на вигин посилена зовнішнім армуванням з углепластику шляхом приклеювання останніх у розтягнутій зоні конструкції з розташуванням фібри паралельно максимальним зусиллям, що розтягують - т.к. робота плити здійснюється у двох напрямках, те й система посилення двонаправлена (див.рис.2.2).

Як об'єкт дослідження системи посилення прийнятий композиційний матеріал на основі вуглецевих волокон і епоксидної смоли виробництва Sika [29,30,31]. Ширина тканини 300мм, волокна розташовуються в одному напрямі, для поліпшення стабільності форми в поперечному напрямі тканина забезпечена спеціальними термопластиковими волокнами. Товщина тканини 0,293 мм, товщина тканини, просоченої смолою, 1 мм.

У дослідженні прийнятий крок розташування системи посилення в двох напрямках 1200мм при ширині наклеюваних смуг 300мм і 900мм (3 полотна підряд).

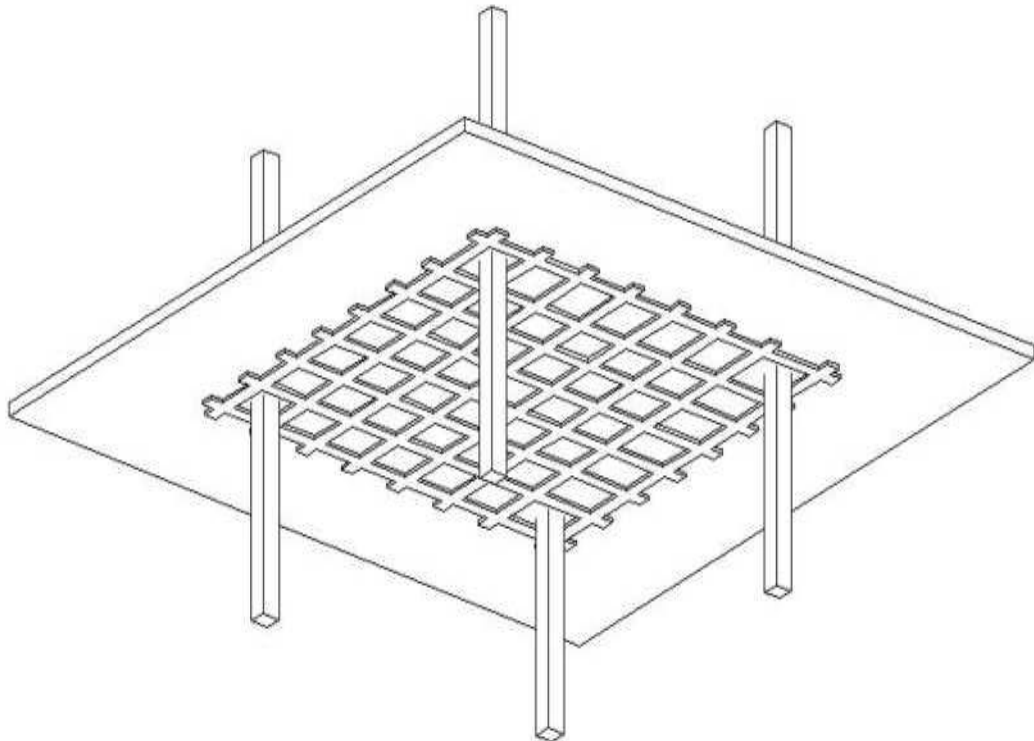


Рисунок 2.2 - Схема наклеювання углепластика на нижню поверхню плити

2.2 Фізико-механічні параметри

Залізобетонна плита перекриття.

В розглянутій моделі для залізобетонної частини конструкції використовується бетон з класом міцності на стискування С20/25.

Однією з основних деформаційних характеристик бетону є початковий модуль пружності E_b . Для бетону класу С20/25 це значення складає 30018,0 МПа. Проте, при тривалому впливі навантаження з урахуванням властивостей повзучості бетону, модуль пружності визначається за певним співвідношенням:

$$E_{b,\tau} = \frac{E_b}{1+\varphi_{b,cr}} \quad (2.1)$$

де $\varphi_{b,cr}$ - коефіцієнт повзучості, що приймається залежно від відносної вологості дошки.

Таким чином, модуль пружності бетону при тривалій дії навантаження складе: для усіх залізобетонних елементів.

$$E_{b,\tau} = \frac{30018}{1+2,5} = 8576,6 \text{ МПа}$$

Саме це значення і буде введено в

розрахунок

Питома вага бетону 2,5 Т/м³.

Розрахунковий опір бетону класу В25 по міцності на розтягування $R_{bt}=1,6$ МПа, на стискування, $R_b=14,5$ МПа.

Розрахунковий опір арматури класу А400 по міцності на розтягування і стискування $R_s= R_{st}=355$ МПа.

Система посилення углепластиком.

Усі наявні дані за фізико-механичними параметрами системи посилення зведені в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 -фізико-механическим параметрами системи посилення

Елемент системи	Щільність, т/м ³	Міцність на розтягування МПа	Модуль пружності, МПа	Подовження на розрив, %
Полотно з углеволокна	1,8	3800	231000	1,64
Епоксидна смола	1,3	30	3800	0,9%
Полотно, просочене смолою	-	700	63000	-

Представлені в таблиці дані достатні для формування необхідних початкових даних вносяться в розрахункову схему.

2.3 Побудова моделі дослідження

Системи координат.

- Для подання інформації про розрахункову схему можуть використовуватися різні системи координат, які потім трансформуються у декартові. Далі будуть використовані такі декартові системи координат для опису розрахункової схеми:

- Глобальна правостороння система координат XYZ, пов'язана з розрахунковою схемою.
- Локальні правосторонні системи координат, пов'язані з кожним кінцевим елементом.

Тип схеми.

Розрахункова схема визначена як система з ознакою 5. Це означає, що розглядається система загального типу, деформації якої та її основні невідомі представлені лінійними переміщеннями вузлових точок уздовж осей X, Y, Z та поворотами навколо цих осей.

Режим статичного розрахунку.

Статичний розрахунок системи виконаний у фізичній лінійній постановці.

Граничні умови.

Можливі переміщення вузлів звичайно-елементної розрахункової схеми обмежені зовнішніми зв'язками, що забороняють деякі з цих переміщень.

По контуру плити на грані, паралельні осі X в загальній системі координат накладаються зв'язки, що забороняють переміщення по осі Y і поворот навколо осі X .

По контуру плити на грані, паралельні осі Y в загальній системі координат накладаються зв'язки, що забороняють переміщення по осі X і поворот навколо осі Y .

На вузли верхніх і нижніх об'ємних кінцевих елементів, що моделюють колони, накладені зв'язки, що забороняють переміщення і повороти по усіх 6 ступенях свободи.

Таким чином досліджувана розрахункова схема геометрично незмінна.

2.4 Характеристики використаних типів кінцевих елементів.

При описі кожного кінцевого елемента залежно від властивостей матеріалу задаються наступні дані: $E^{(k)}$ (Т/м²), $\nu^{(k)}$ - для ізотропного матеріалу, модуль пружності і коефіцієнт Пуассона відповідно.

У розрахункову схему включені кінцеві елементи наступних типів :

Елементи, які використовуються для моделювання стержнів, де передбачено, що вони працюють відповідно до звичайних правил опору матеріалів. Опис їхнього напруженого стану пов'язаний із локальною системою координат, де вісь $X1$ орієнтована вздовж стержня, а осі $Y1$ і $Z1$ — вздовж головних осей інерції поперечного перерізу.

До стержневих кінцевих елементів даної розрахункової схеми відносяться наступні типи елементів :

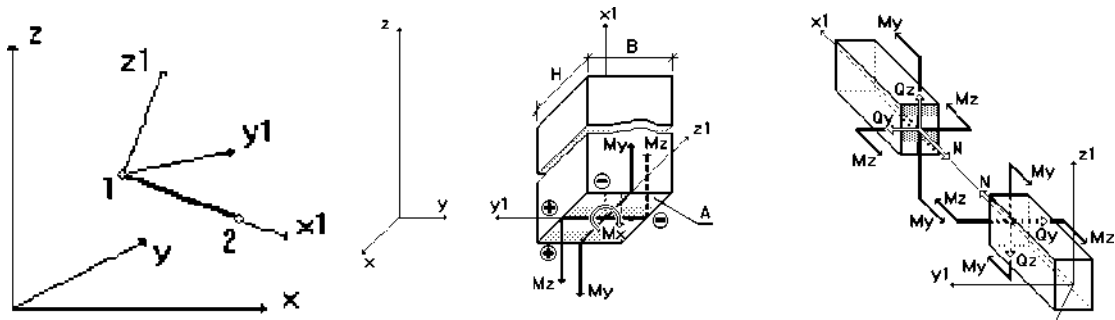


Рисунок 2.3 - Стержневий кінцевий елемент типу 5.

- елемент типу 5, який працює за просторовою схемою та сприймає поздовжню силу N , згинальні моменти M_y та M_z , поперечні сили Q_z та Q_y , а також крутний момент M_k . У досліджуваній моделі він моделює арматурні стрижні.

Елементи оболонок, чия геометрична форма на невеликій ділянці елемента є плоскою (тобто, вони утворюють многогранник, вписаний в дійсну криволінійну форму серединної поверхні оболонки). Для цих елементів, відповідно до методу кінцевих елементів, істинна форма переміщень усередині елемента приблизно представлена спрощеними залежностями. Опис їх напруженого стану пов'язаний з місцевою системою координат, де осі X_1 і Y_1 розташовані в площині елемента, а вісь Z_1 спрямована від першого вузла до другого, а вісь Z_1 ортогональна поверхні елемента.

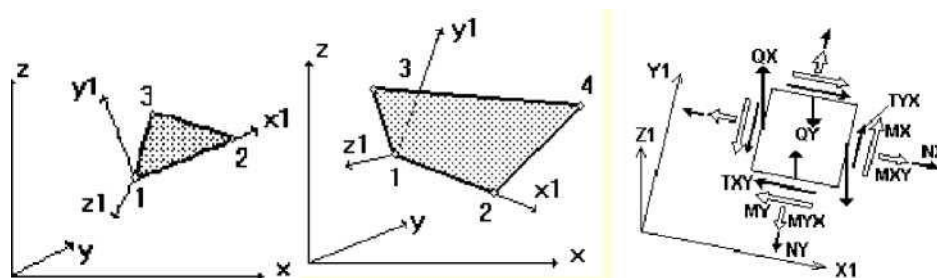


Рисунок 2.4 - Оболонкові кінцеві елементи типу 42,44

- Трикутний елемент типу 42, не є спільним і моделює поле нормальних переміщень усередині елемента поліномом 4 міри, а поле

тангенціальних переміщень поліномом першого ступеня. Розташовується в просторі довільним чином.

- Елемент типу 44 є чотирикутним, має чотири вузлові точки і моделює поле нормальних переміщень усередині елемента за допомогою полінома третього порядку, а поле тангенціальних переміщень - за допомогою неповного полінома другого порядку. Розташовується в просторі довільним чином.

Ці елементи моделюють вуглепластикові полотна шириною 300мм і тонку бетонну оболонку на верхній поверхні плити для зручнішого завдання навантажень на плиту, виготовлену з об'ємних кінцевих елементів.

Об'ємні кінцеві елементи:

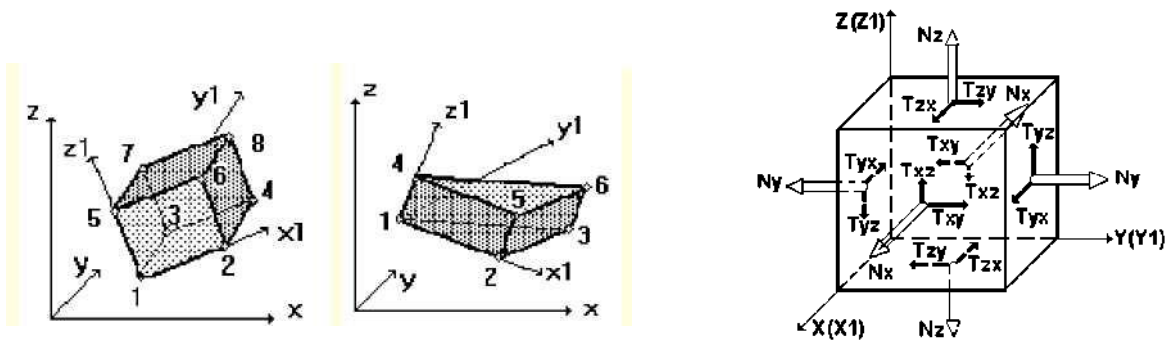


Рисунок 2.5 - Об'ємні кінцеві елементи типу 31,33

- Паралелепіпед елемент типу 31
- Тригранна призма елемент типу 33

Об'ємні кінцеві елементи моделюють матеріал бетон в залізобетонній конструкції досліджуваної моделі (плита і колони).

Спеціальні кінцеві елементи:

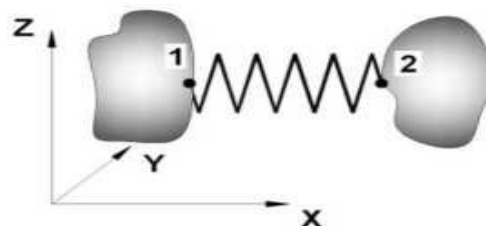


Рисунок 2.6 - Спеціальний кінцевий елемент типу 55

- Елемент типу 55 призначений для моделювання пружного зв'язку між вузлами і враховує податливість між суміжними вузлами. Цей кінцевий елемент може бути використаний для будь-якої ознаки схеми і дозволяє моделювати як лінійну, так і кутову податливість зв'язку в будь-якому напрямку.

При заданні вихідної інформації може бути вказана будь-яка ознака схеми. Жорсткісні характеристики цих елементів, число і порядок прямування яких повністю відповідає ознаці схеми, що використовується, можна інтерпретувати наступним чином:

- для переміщень X , Y , Z - це сила (T , жорсткість на стискування), що викликає взаємне одиничне зміщення вузлів 1 і 2 по заданому напрямку;
- для кутів повороту U_X , U_Y , U_Z - це момент (T_m , жорсткість на зрушення), що викликає взаємні одиничні повороти по заданому напрямку.

Крок розбиття.

Крок розбиття розрахункової схеми на кінцеві елементи в плані був вибраний 0,3 м. Причина - геометричні розміри посилюючого полотна на основі вуглецевих волокон, ширина якого 0,3 м. По висоті плити розбиття було виконане на 4 ділянки: верхній захисний шар - 0,05 м, нижній захисний шар - 0,05 м і 2 зони по 0,065 м від нейтральної осі плити (рис. 2.7).

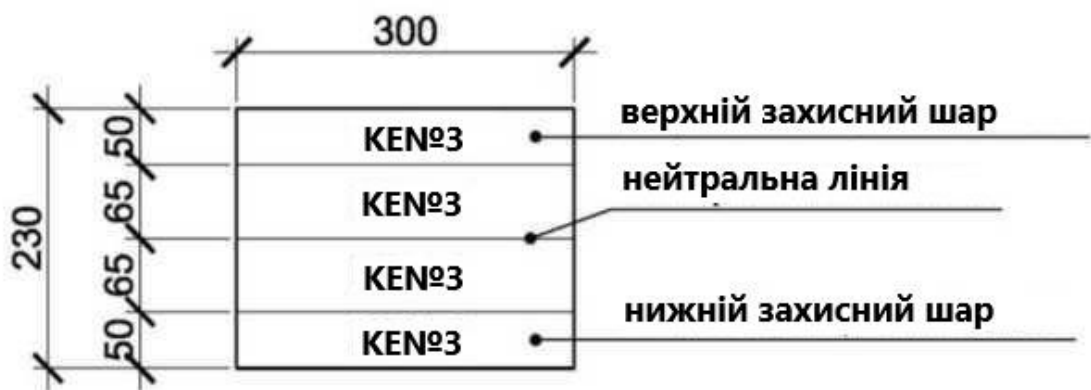


Рисунок 2.7 - Розбиття по висоті плити на кінцеві елементи

У зоні стику колони з плитою крок розбиття прискорений в 2 рази і складає 0,15 м. Габарити ділянки з частішим розбиттям - 2,4x2, 4 м, цей розмір обумовлений рекомендованою величиною «фартуха» в районі стику колони з

безбалочною плитою - $1/7$ величин прольоту, а отже і можливістю заармувати верхню надопірну зону згідно з розрахунками.

Для дослідження було відбудовано 7 моделей, перші 2 з яких стали причинами наступних 5, аналіз за результатами розрахунків розібраний і наведений нижче в тексті роботи.

Модель 1

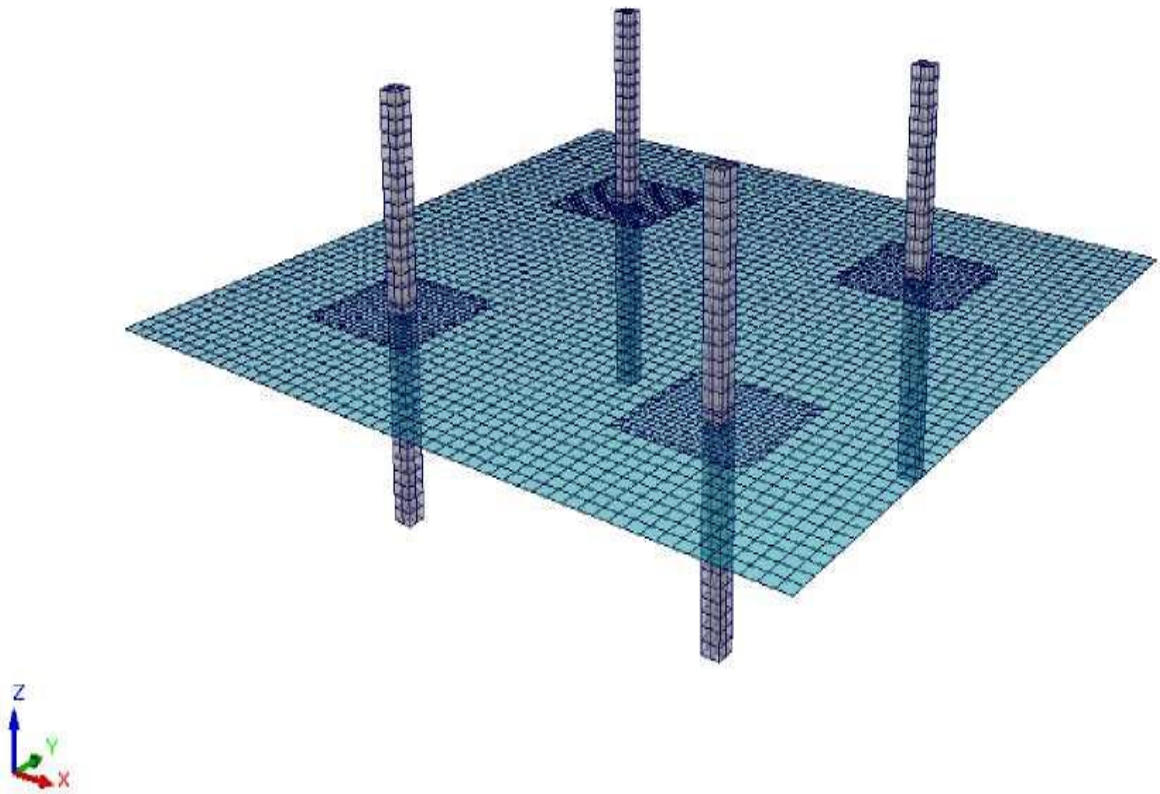


Рисунок 2.8 - Кінцево-елементна модель - Модель 1.

Аналіз армування залізобетонної плити був першим етапом дослідження.

Визначення необхідного армування з розрахунку на діючі навантаження від власної ваги та корисної ($0,4 \text{ т/м}^2$) виконано на основі відбудованої моделі в SCADOffice, де перекриття змодельовано оболонковими елементами, та розрахункового модуля «Бетон». На наведених нижче малюнках відображені результати розрахунку.

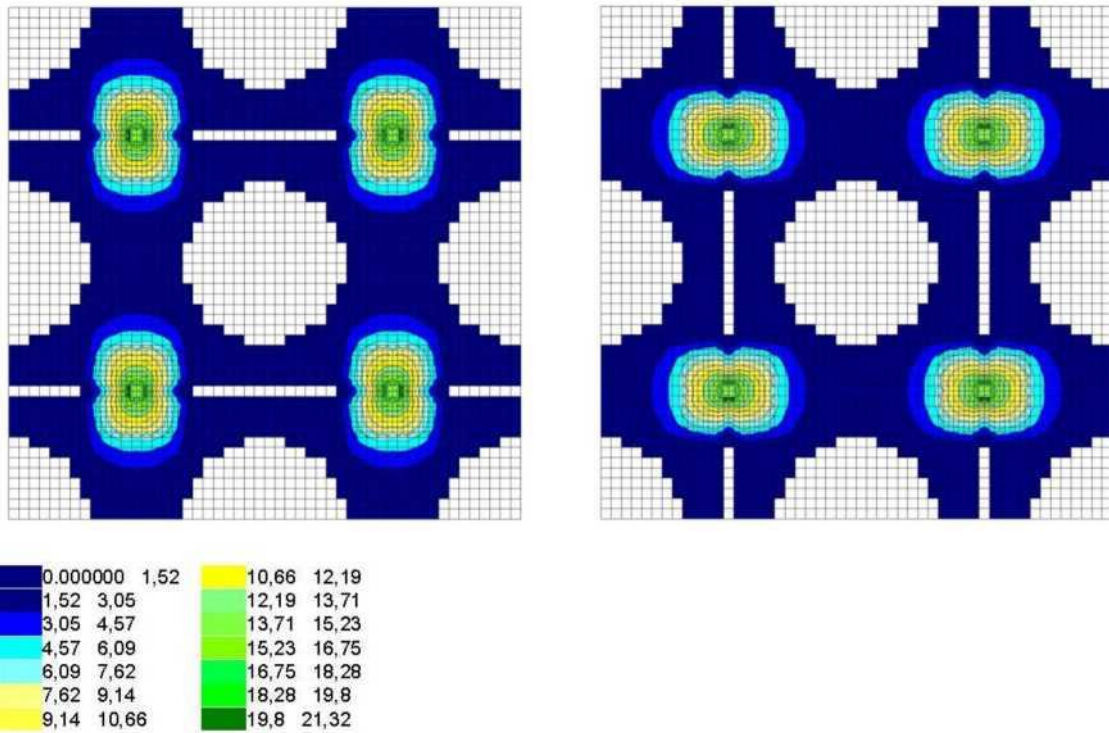
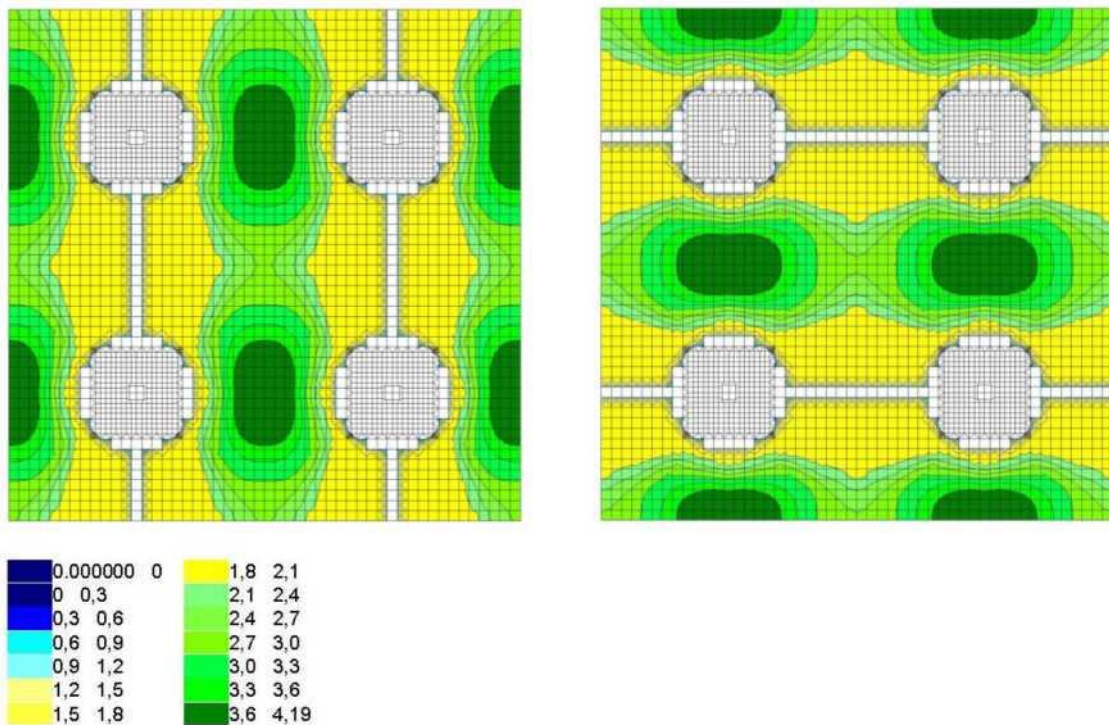


Рисунок 2.9 - Верхня арматура по напрямках X і Y



Риснок 2.10 - Нижня арматура по напрямках X і Y

За отриманими площами армування призначено: нижню сітку - діаметр 14 мм, верхню - 12мм, верхню надопірну - 28мм. Крок - 300мм у відповідність до прийнятої розбивки на кінцеві елементи.

Отриману в такий спосіб арматуру вставляємо як стрижнів (КЭ №5) в

об'ємну кінцево-елементну модель.

Інформація про розрахункову схему:

- порядок системи рівнянь 24050
- ширина стрічки 23640
- кількість елементів 4132
- кількість вузлів 4729

Модель 2.

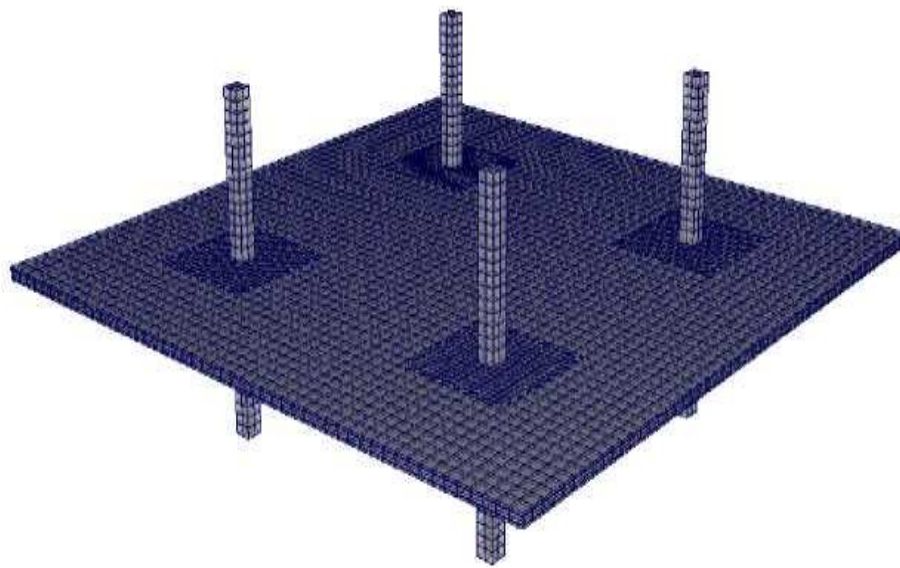


Рисунок 2.11 - Кінцево-елементна модель - Модель 2.

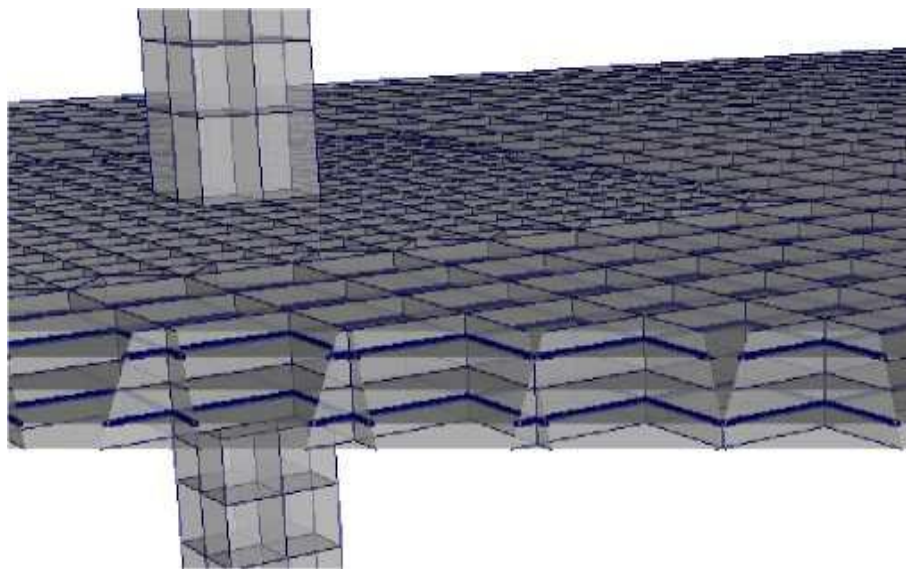


Рисунок 2.12 - Фрагмент кінцево-елементної моделі із стрижневою арматурою

У Моделі 2 - об'ємній кінцево-елементній моделі - арматура задана у вигляді стрижневих елементів за результатами розрахунку Моделі 1.

Інформація про розрахункову схему:

- порядок системи рівнянь 84180
- ширина стрічки 33135
- кількість елементів 30413
- кількість вузлів 18638
- крок розбиття 300 мм

За результатами статичного розрахунку Моделі 2 отримані наступні характеристики напружено-деформованого стану :

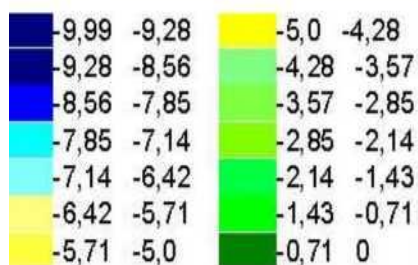
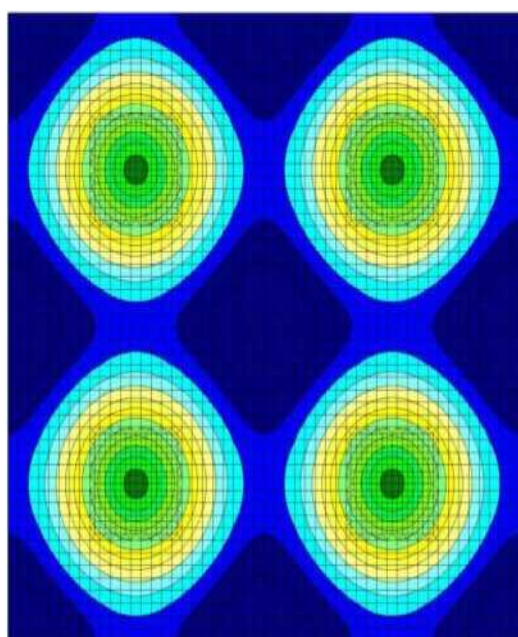


Рисунок 2.13 - Вертикальні деформації, мм

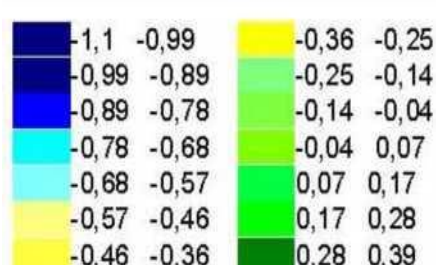
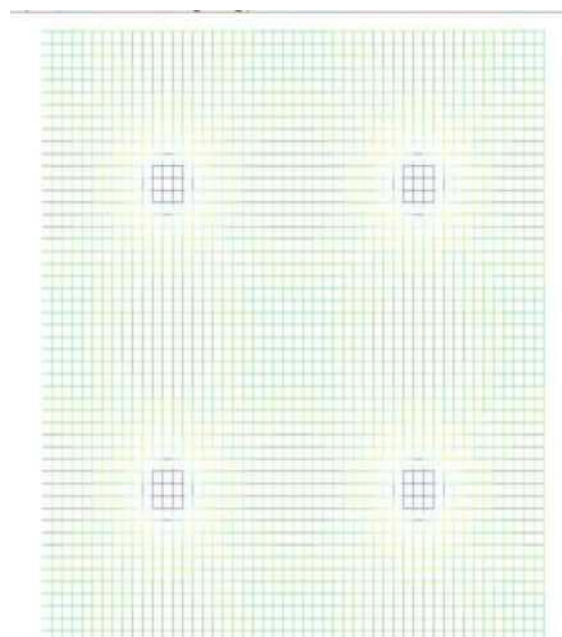


Рисунок 2.14 - Зусилля в нижній арматурі, Т

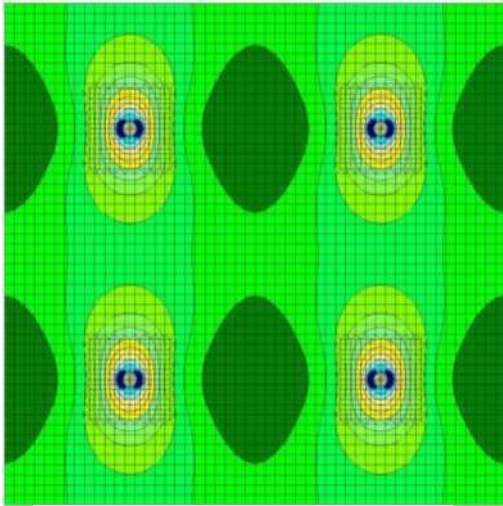


Рисунок 2.15 - Напряга N_x у бетони
нижньої зони плити, T/m^2

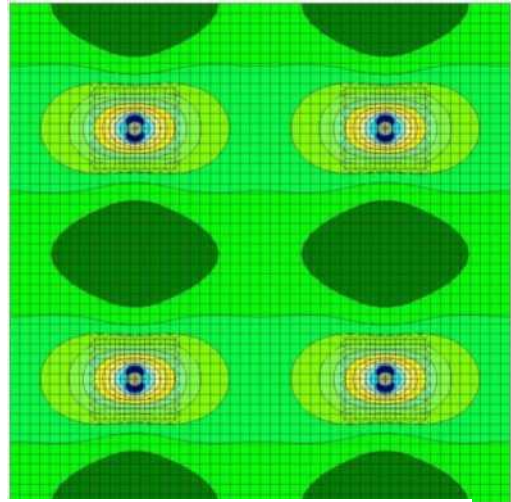


Рисунок 2.16 - Напряга N_y у бетони
нижньої зони плити, T/m^2

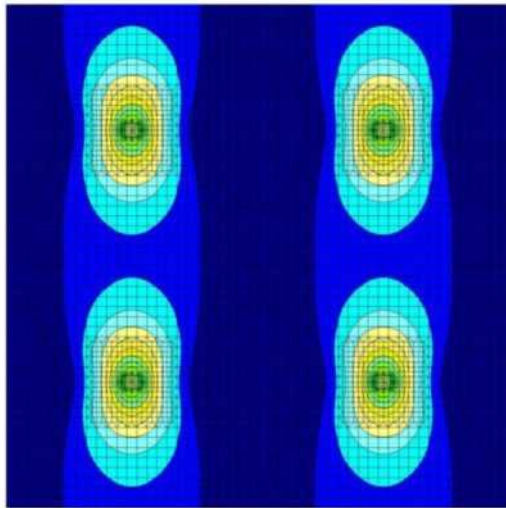


Рисунок 2.17 - Напряга N_x у бетони
верхньої зони плити, T/m^2

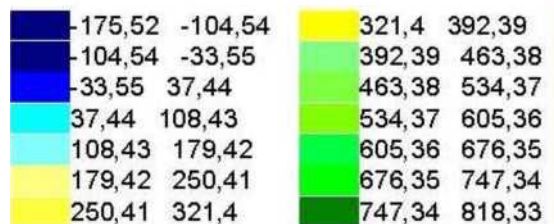
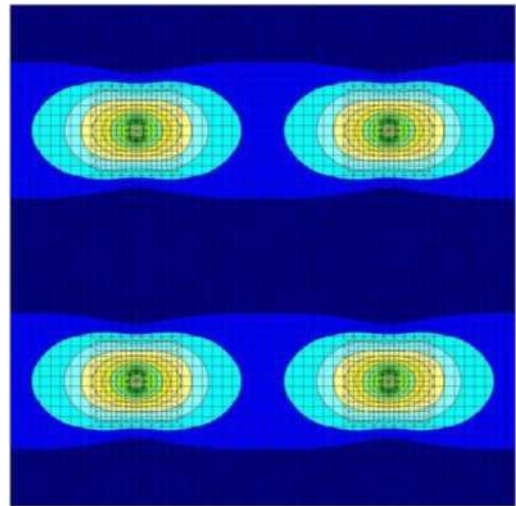


Рисунок 2.18 - Напряга N_y у бетони
верхньої зони плити, T/m^2

Розрахунки були проведені на ті ж завантаження, що і для Моделі 1.

На основі представлених характеристик напружено-деформованого стану робимо висновок про те, що модель не достатньо точно відтворює реальну роботу залізобетонної плити перекриття при прольоті 7,5 м та товщині 230 мм. Деформація від власної ваги та корисного навантаження (9,99 мм) є занадто малою у порівнянні з ручним розрахунком (20 мм). Крім того, спостерігається, що при вигині в роботу включається бетон, напруга в якому перевищує допустимі значення (157 Т/м^2), що сталося через включення бетону в роботу схеми на розтягування.

Помітимо, що модуль пружності бетону в розрахунковій схемі для усіх об'ємних кінцевих елементів однаковий і постійний.

Отже, при наявних вихідних даних і відсутності можливості фізично-нелінійного розрахунку, що дозволяє врахувати розвиток деформацій (тріщин) у бетоні та роботу на розтягування арматури як окремі процеси, моделювання реальної роботи конструкції за допомогою об'ємних кінцевих елементів стає недосяжним.

Для того, щоб це стало можливим, перейдемо до Моделі 3, де ми постаралися врахувати усі накладені обмеження в Моделі 2.

Модель 3.

За результатами розрахунку Моделі 2 дійшли висновку, що необхідне коригування вихідних даних - зміна жорстких характеристик елементів, що моделюють бетон конструкції.

Усі геометричні параметри, інформація про розрахункову схему ідентичні Моделі 3 розглянутим в Моделі 2.

Оскільки в об'ємній кінцево-елементній моделі, створеній в SCADOffice, всі об'ємні та стрижневі елементи плити (арматура та бетон) пропорційно пропорційно жорстким параметрам сприймають напруги, що розтягуються в нижній зоні, бетон працює за межами напруг, що допускаються на розтягування. Це відрізняється від традиційних аналітичних методів розрахунку залізобетонних елементів, де арматура сприймає напруги

на розтягування, а робота бетону на розтягування не враховується. Однак, щоб адекватно моделювати роботу конструкції, може бути введено обмеження на жорсткі характеристики бетонних елементів, виключаючи їхню роботу на сприйняття зусиль, що розтягуються.

Таким чином, згідно з результатами розрахунку Моделі 2 із полям нормальних напруг, елементам, у яких зусилля, що розтягують, перевищують допускаються нормами, призначено модуль пружності, рівний 1 Т/м². Це досягається шляхом пошарової фрагментації елементів, які моделюють плиту, та послідовного призначення їм зменшеного модуля пружності. Зміна висоти перерізу плити в моделі модуля пружності бетону відповідає епюрам згинальних моментів.

На прикладі нижньої зони показано, як розподілені значення модулів пружності бетону - рис. 2.19

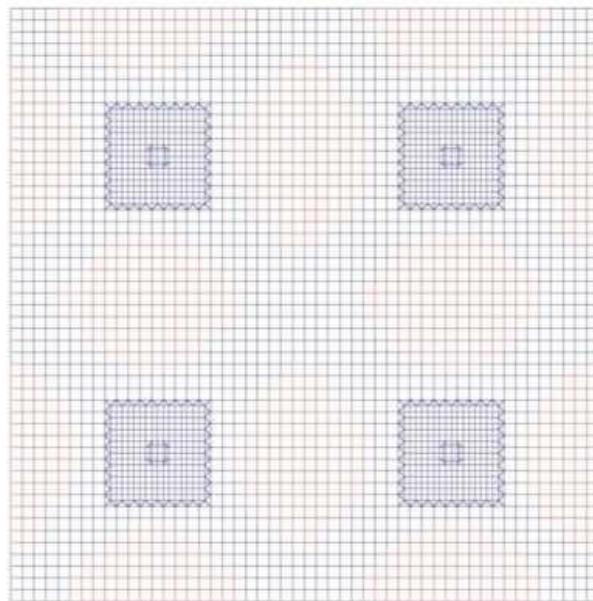


Рисунок 2.19 - Розподіл жорсткостей в нижній зоні бетону плити

Рис.2.19. відповідає характеру напрузі N_x і N_y Моделі 2 при їх накладенні один на одного.

При статичному розрахунок Моделі 3 з відкоригованими початковими параметрами отримані наступні характеристики напружено-деформованого стану плити :

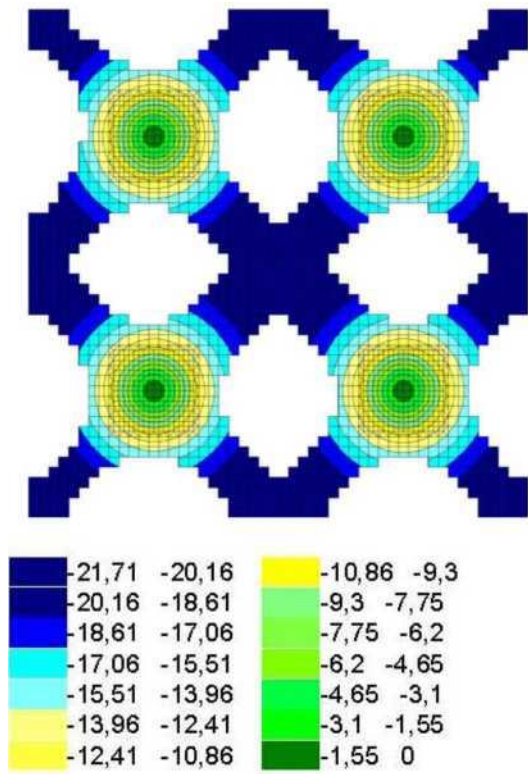


Рисунок 2.20 -Вертикальні деформації, мм

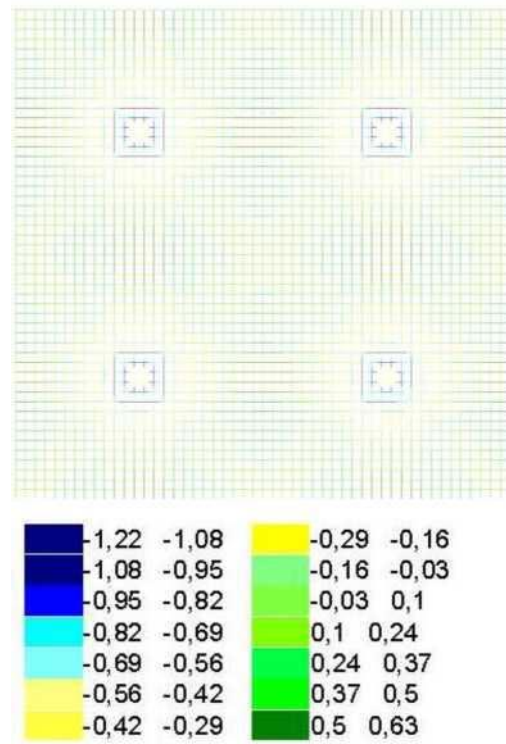


Рисунок 2.21 - Зусилля в нижній арматурі, Т

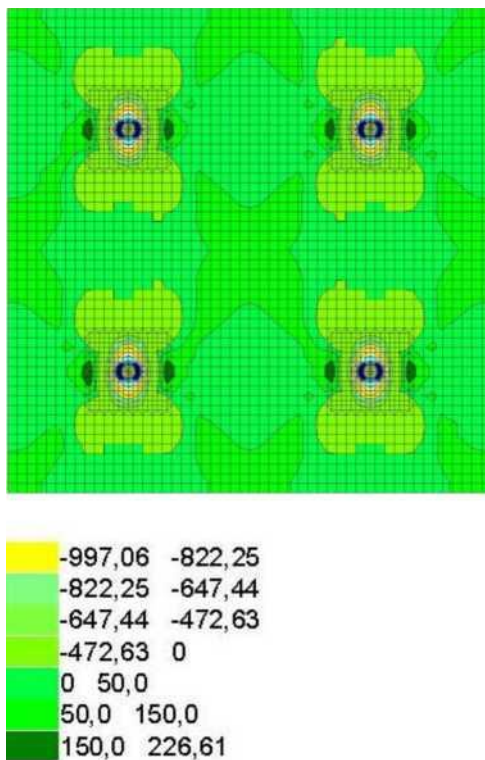


Рисунок 2.22 - Напряга N_x у бетоні нижньої зони плити, T/m^2

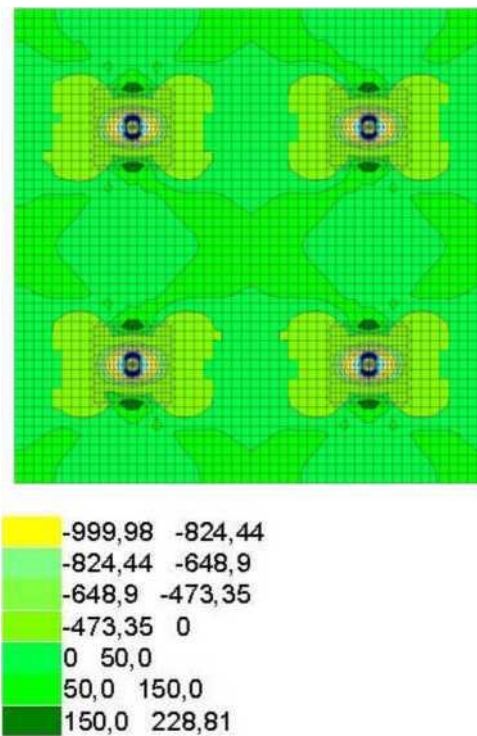


Рисунок 2.23 - Напряга N_y у бетоні нижньої зони плити, T/m^2

По ізополям на рис.2.22 і 2.23 отримані в декількох елементах напруги більше за тих, що допускаються, але вони практично не позначаються на характері розподілу деформацій і зусиль, тому ми нехтуємо ними.

У подальших розрахунках і Моделях за основу приймаємо Модель 3.

Модель 4 і Модель .

Модель 4 і 5 створені на основі Моделі 3, тут в схемі вже з'являються елементи, що моделюють систему посилення з вуглепластика. Відмінність Моделі 4 від Моделі 5 полягає в площі перерізу посилення на користь Моделі 5. Для моделі 4 полотна шириною 300мм йдуть з кроком 1200мм в обох напрямках, для моделі 5 - ширина складає 900мм при тому ж кроці.

Інформація про розрахункову схему:

- порядок систем рівнянь 84180
- ширина стрічки 36243
- кількість елементів 32125
- кількість вузлів 19435
- крок розбиття 300 мм

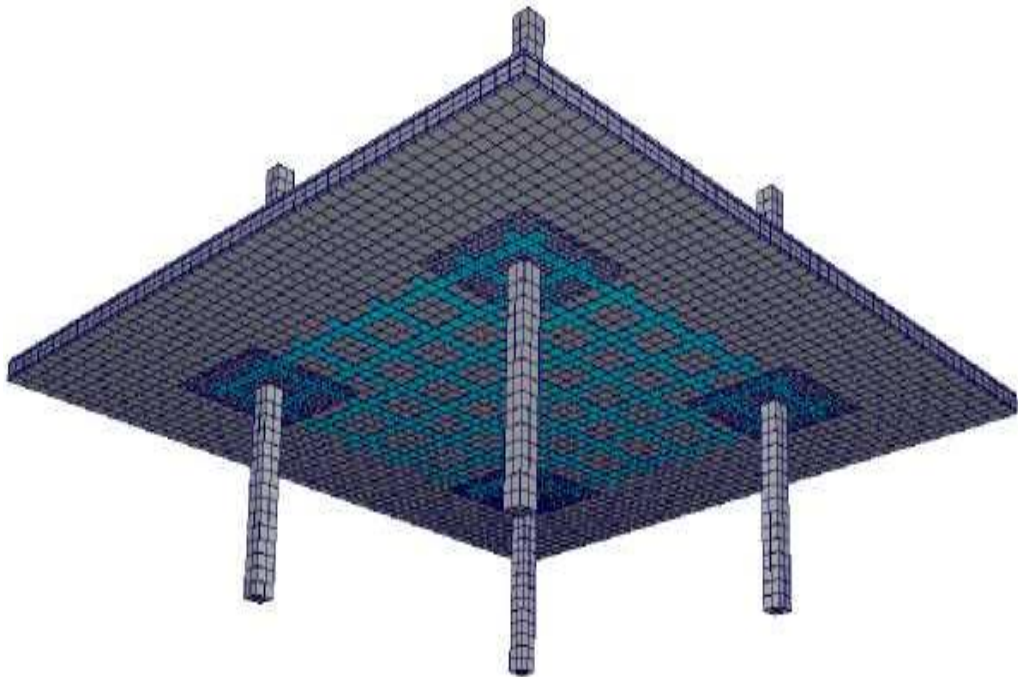


Рисунок 2.24 – Кінцево -елементна модель - Модель 4

Інформація про розрахункову схему:

- порядок системи рівнянь 84180
- ширина стрічки 58613
- кількість елементів 38105
- кількість вузлів 19683
- крок розбиття 300 мм

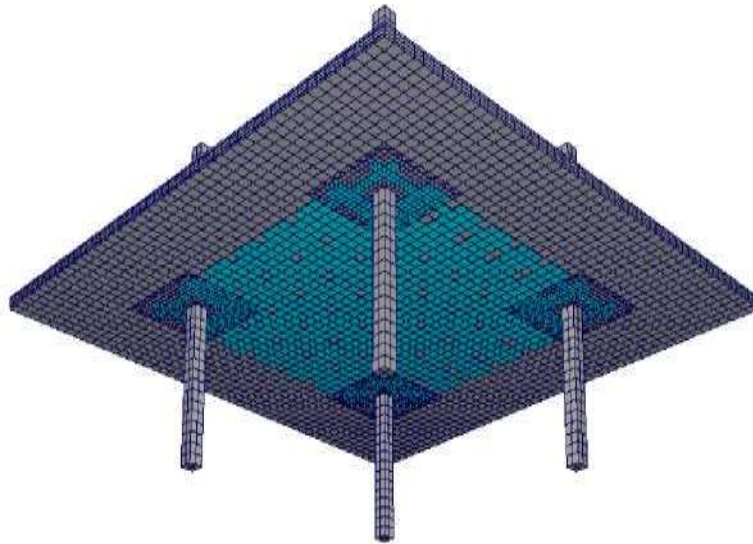


Рисунок 2.25 - Кінцево-елементна модель - Модель 5

Для моделювання системи підсилення використовуються кінцеві оболонкові елементи (полотно, просочене смолою). Зв'язок між бетоном і системою підсилення в моделі представлений спеціальними кінцевими елементами - пружними зв'язками (55 тип КЕ).

Механічні характеристики кінцевого елемента 55 у розрахунковій схемі були визначені, використовуючи закон Гука. У ролі вихідних параметрів були прийняті фізико-механічні характеристики, надані виробником.

Таким чином, жорсткість на розтягування-стискування:

$R_z=10R_x=10R_y= EF = 6,3 \cdot 10^6 \cdot 0,045 = 283500 \text{ Т}$, де F - площа оболонки, моделюючою углепластик і що доводиться на 1 «пружинку», E - модуль пружності тканини, просоченої смолою.

На зрушення на 1м довжини елемента - зсувна жорсткість:

$$U_z=10U_x=10U_y= GI_K = \frac{1}{2} * \frac{E}{2(1+\nu)} K_2 h^4 = \frac{1}{2} * \frac{6,3*10^6}{2(1+0,3)} 0,141 * 0,3^4 * 1 = 1384\text{Тм},$$

де G - модуль зрушення, ν - коефіцієнт Пуассона, I_k - момент інерції при крученні для прямокутного перерізу, K_2 - коефіцієнт, залежний від відношення сторін прямокутного перерізу (у нашому випадку прямокутний переріз - оболонковий елемент $0,3 \times 0,3\text{м}$, моделюючий углепластик, тому перед вираженням стоїть коефіцієнт $\frac{1}{2}$, що означає, що на кожен елемент прямокутний доводиться по 2 «пружинки» (КЕ №55)).

Коефіцієнт 10 перед жорсткостними характеристиками був призначений за рекомендацією наукового керівника.

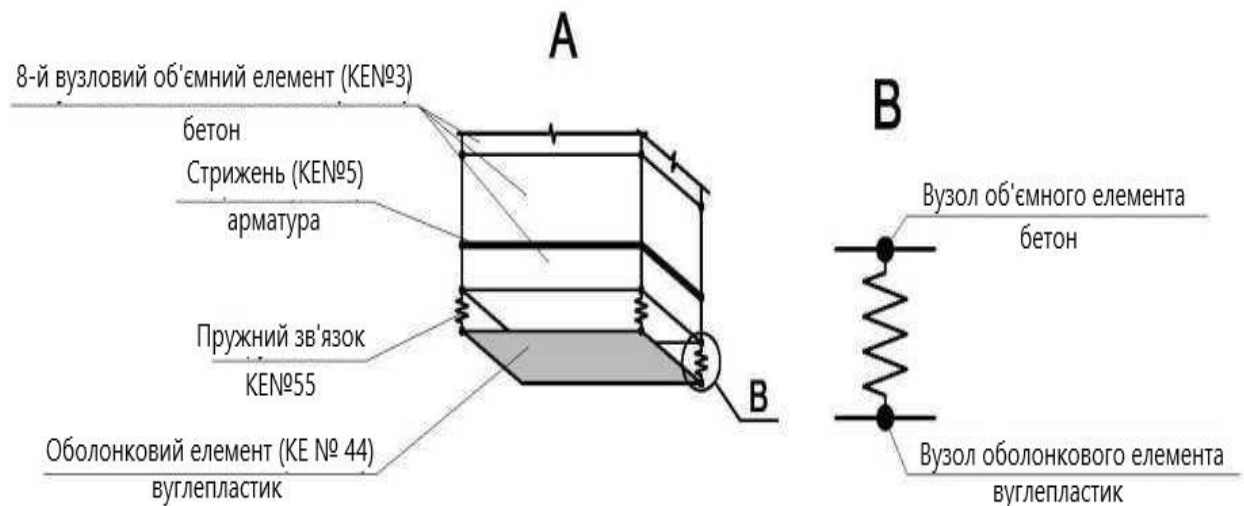


Рисунок 2.26 - Кінцево-елементна схема вузла з'єднання бетону і вуглепластика

Створення Моделей 4 і 5 здійснюється з реалізацією можливості технологічного зведення конструкції в SCADOffice за допомогою модуля «Монтаж».

Створення моделей в режимі «Монтаж» було розбито на наступні етапи (стадії) :

Таблиця 2.1- Стадії створення моделей

Стадія монтажу	Елементи	Навантаження
1. Залізобетонна плита	КЕ:колони, плита, арматура	Власна вага
2. Напряга плити	Ті ж	Власна вага «Домкрат»
3. Наклейка вуглепластика	Ті ж +КЕ: вуглепластик, пружні зв'язки	Ті ж
4. Зняття напруги	Ті ж	Власна вага
5-п. Завантаження корисним	Ті ж	Власна вага Корисна (ітерації)

Завдяки спадкоємству системи властивостей (а саме деформованої схеми) з попереднього етапу монтажу, є можливість:

- реалізувати переднапрягу системи для включення в роботу системи посилення з вуглепластика;
- проводити ітераційні розрахунку при послідовному збільшенні навантаження (у досліджуваній моделі крок навантаження прийнятий 50 кг/м²).

Т. е. розрахунок можна назвати нелінійним з цієї точки зору.

Введення в напружений стан вказаних елементів здійснюється шляхом підклеювання за допомогою домкратів або напружених затягувань. При цьому важливо досягти максимального розвантаження конструкції до моменту її посилення, оскільки лише після включення посилення в роботу буде перерозподілено навантаження. Якщо розвантаження конструкції виявляється неефективним, використовується попередній підйом її на місці установки додаткової опори. Сили підйому можуть визначатися з урахуванням величини прогину конструкції.

Переднапругу можна змоделювати різними методами: підняття перекриття за допомогою домкратів або використання переднапружених елементів (наприклад, стренди), що входять до системи посилення і включаються в роботу за допомогою навантаження. У даній моделі конструкція отримує переднапругу через навантаження від чотирьох домкратів, розташованих рівномірно в центрі плити, і передають зосереджене навантаження по 1,25 тонни кожен.

Модель 6 і Модель 7.

Моделі 6 і 7 не відрізняються зовні від розрахункових схем Моделей 4 і 5, оскільки вони також базуються на Моделі 3. Проте, принципова відмінність між ними полягає в розгляді випадку пошкодження плити, такого як відстріл захисного нижнього шару бетону, а також обриви і провисання, що можуть виникнути в результаті вогневої дії на конструкцію. Інформація про розрахункову схему вказана нижче:

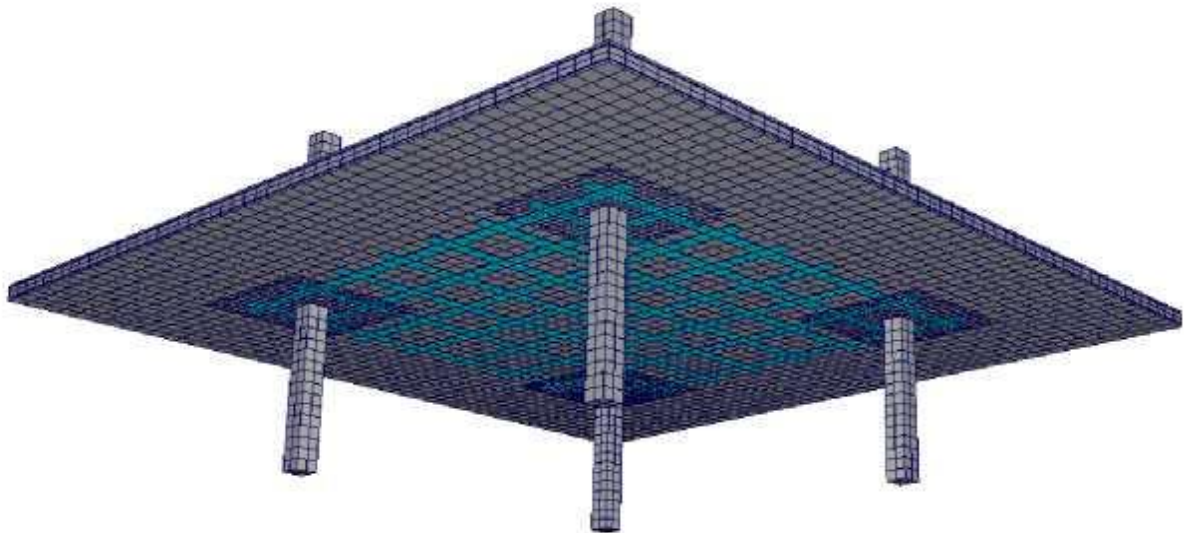


Рисунок 2.27 – Кінцево - елементна модель - Модель 6

Інформація про розрахункову схему:

- порядок системи рівнянь 64676
- ширина стрічки 28055
- кількість елементів 26563
- кількість вузлів 19436
- крок розбиття 300 мм

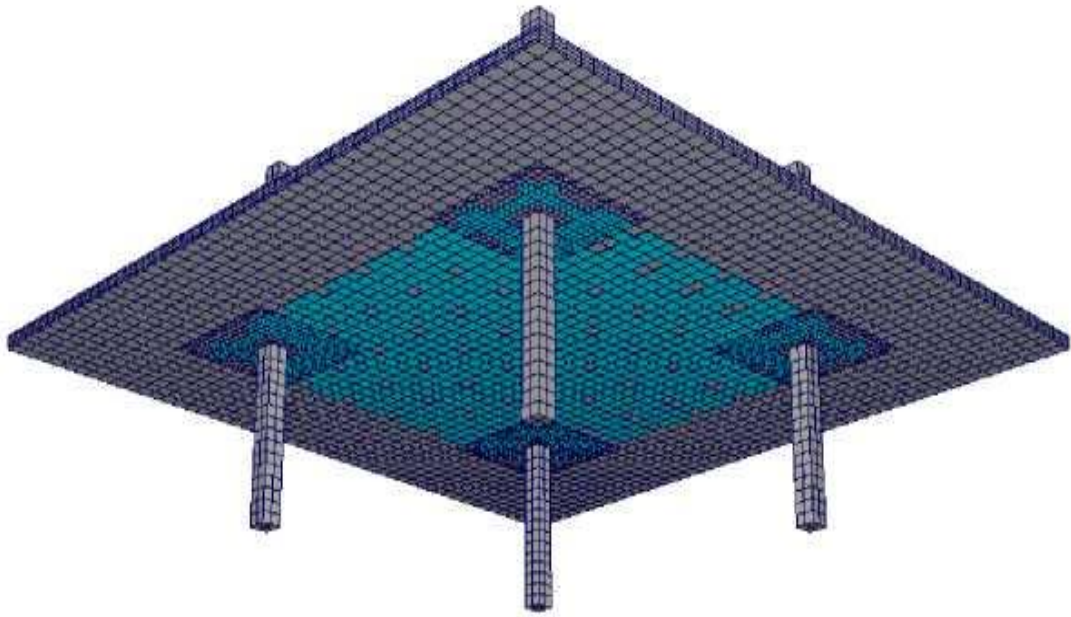


Рисунок 2.28 - Кінцево-елементна модель - Модель 7

Інформація про розрахункову схему:

- порядок системи рівнянь 84180
- ширина стрічки 43595
- кількість елементів 32546
- кількість вузлів 19682
- крок розбиття 300 мм

Мета - відновити несучу здатність, відновивши захисний шар без урахування роботи нижньої арматури (по суті вилучивши з розрахункової

схеми) та посиливши вуглепластиком прогонову зону.

Посилення системи моделюється за допомогою оболонкових кінцевих елементів (полотно, просочене смолою), а зв'язок між бетоном і системою посилення відтворюється спеціальними кінцевими елементами - пружними зв'язками (елементи типу 55).

Створення моделей в режимі «Монтаж» було розбито на наступні етапи (стадії) :

Таблиця 2.2 – Стадії створення моделей

Стадія монтажу	Елементи	Навантаження
1. Залізобетонна плита	КЕ: колонна плита без нижнього з.с., арматура верхня	Власна вага
2. Відновлення захисного шару	Ті ж +КЕ: нижній захисний шар	Власна вага
3. Напруга плити	Ті ж	Власна вага «Домкрат»
4. Наклейка вуглепластика	Ті ж +КЕ: вуглепластик, пружні зв'язки	Ті ж
5. Зняття напруги	Ті ж	Власна вага
6-п. Завантаження корисним навантаженням	Ті ж	Власна вага Корисна (ітерації)

Обмеження, що накладаються на модель дослідження.

Перше обмеження полягає в тому, що простою фізичною моделлю залізобетону є лінійно-пружний ізотропний матеріал, де арматура замінюється еквівалентною по жорсткості кількістю бетону. Реальна діаграма деформації бетону при розтягуванні і стискуванні зображена на рис. 2.29. У дослідженні розглядається та частина діаграми, де в фізичній моделі розтягнутого залізобетону спостерігаються лінійно-пружні деформації.

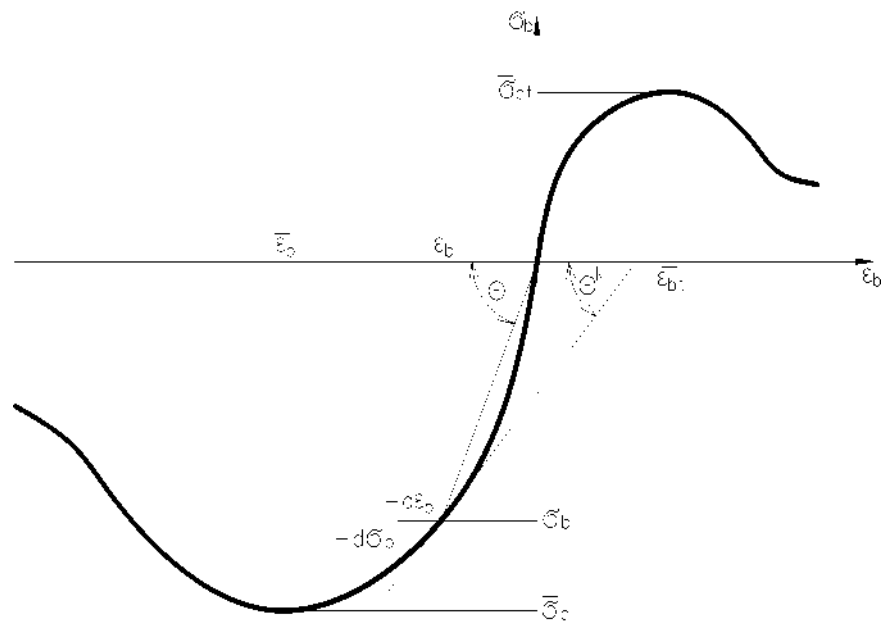


Рисунок 2.29 - Діаграма деформації бетону при розтягуванні і стискуванні.

Але т.к. залізобетон є суттєво фізично-нелінійним матеріалом, у розтягнутих зонах бетонним елементам мінімально знижений модуль пружності (див. Модель 3). Це умовно моделює утворення та розвиток тріщин у розтягнутих зонах.

Друге обмеження про те, що геометричні габарити схеми прийняті в межах прольоту і півпрольоту по периметру, а вплив суміжних плит перекриттів враховано завданням граничних умов.

Третє обмеження полягає в тому, що при створенні схеми не приділено належної уваги моделюванню стику колони з безбалковою плитою перекриття: не введені жорсткі елементи в місці стику в плиту, у зв'язку з чим характеристики вузла міцності не розглядаються докладно в роботі, а отже питання посилення надопірних розтягнутих зон у роботі не розглядаються.

Четверте обмеження випливає з того, що модель є об'ємною, арматура в якій задана стрижнями, має жорсткий розподіл стрижнів по вузлах об'ємних кінцевих елементів без урахування зчеплення, яке можна було б змоделювати за допомогою пружних зв'язків по вузлах елементів.

П'яте обмеження – процеси не розглядаються, що відбуваються на поверхнях розділу посиленої конструкції: між старим та новим бетоном, у ремонтному складі, між ремонтним складом та клеєм, у клеї, усередині вуглепластику. Найбільш вірогідний варіант розвитку деформацій і, отже, руйнування відбувається при відшаровуванні смуги від поверхні бетону, що відбувається в результаті тріщин, що виникають у розтягнутій зоні.

2.5 Дослідження моделей

Розглянемо результати статичних розрахунків МКЕ Моделей 4- 7.

Деформації.

При прольоті плити перекриття 7,5 м гранично-допустиме значення прогину складає 37,5 мм.

Розглянемо результати розрахунку по деформаціях Моделей 3 - 7. Значення переміщення по вертикалі знімалося з вузла в центрі плити в нижній її зоні. На рис.2.30 представлена деформована схема моделі, характерна для усіх Моделей.

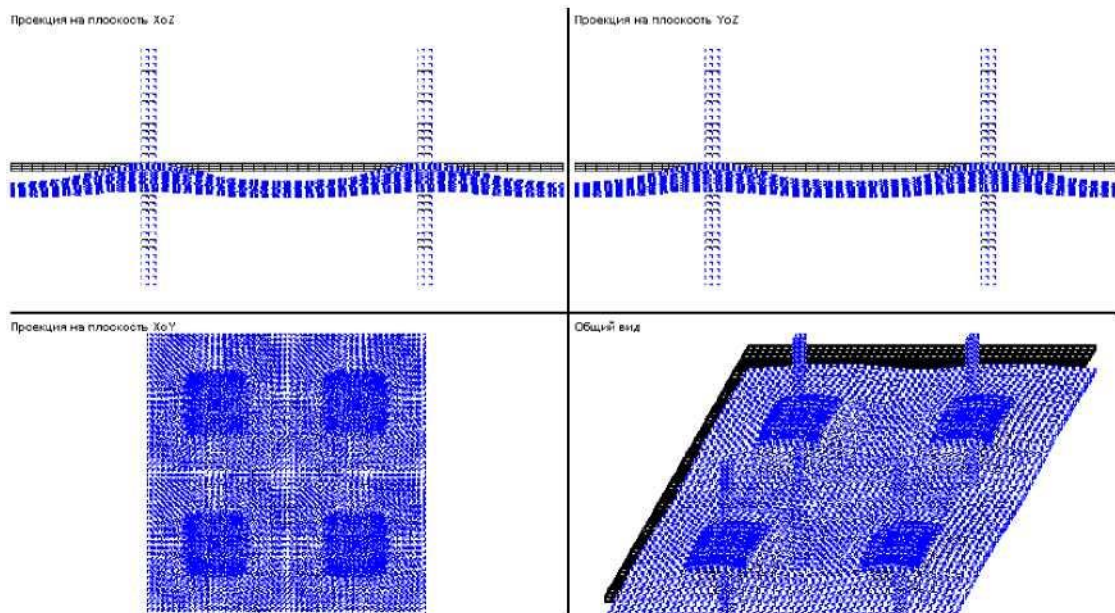


Рисунок 2.30 - Деформована схема Моделі дослідження

Результати за розрахунками наведені нижче в таблиці і на графіках залежностей деформацій від навантаження, що збільшується. У результатах

відносного нуля прийнято значення навантаження від власної ваги конструкцій.

Таблиця 2.3 - Результати за розрахунками

Навантажен- ня т/м ²	Модель3	Модель4	Модель5	Модельб	Модель7
СВ	15,31	15,25	15,17	28,65	26,12
0,1	17,94	17,39	17,6	31,32	27,59
0,2	20,42	20,31	20,02	33,98	32,06
0,3	23,05	22,73	22,45	36,32	38,53
0,4	25,62	25,39	24,83	39,36	36
0,5	28,23	27,48	27,31		38,47
0,6	30,79	30,41	29,79		
0,7	33,36	32,72	32,15		
0,8	35,93	35,44	34,51		
0,9	38,57	37,94	37,04		
1,0		40,47	39,49		

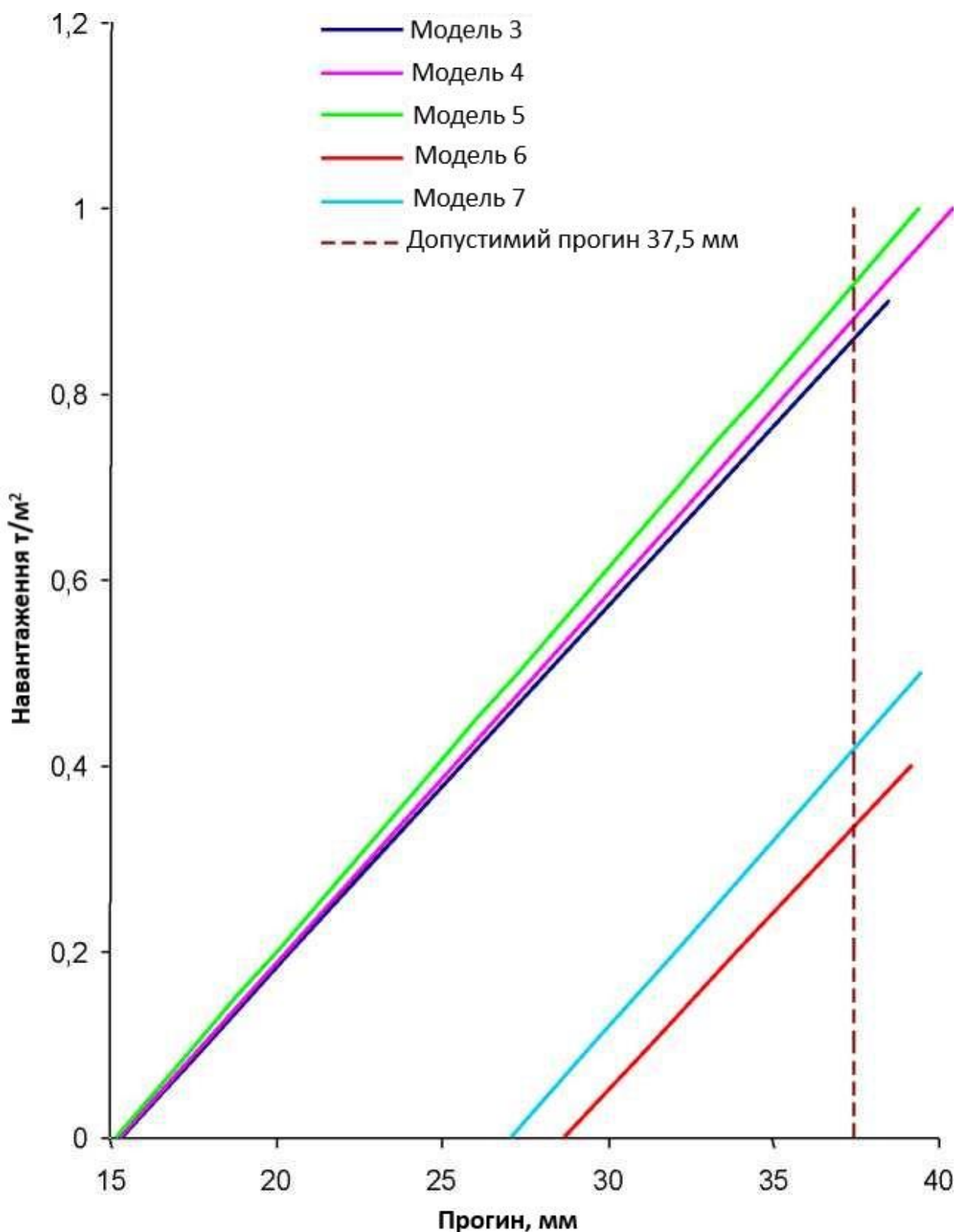


Рисунок 2.31 - Графік залежності вертикальних перемещень від завантажень

з графіків і таблиць видно, що при посиленні прольоту плити углепластиком по запропонованій моделі відбувається зменшення вертикальних деформацій на 1,3% по Моделі 4(менша площа перерізів

вуглепластика), на 3,5% по Моделі 5 (велика площа перерізу вуглепластика). У разі виключення з роботи нижньої арматури відновлення несучої здатності по деформаціях відбувається на 70% зі зменшенням корисного навантаження до $0,3 \text{ т/м}^2$ по Моделі 6 (менша площа перерізів вуглепластика), на 69,3% зі збереженням проектних навантажень по Моделі 7(велика площа перерізу вуглепластика).

Напруга.

Розтягуюча напруга у вуглепластиці.

Розглянемо напругу, яка виникає у вуглепластиці у міру включення його в роботу, для Моделей 4 - 7.

На наступних рисунках відображені ізополя розтягуючої напруги в оболонкових кінцевих елементах, моделюючих вуглепластик, прикріпленій до нижньої пролітної зони плити. Для наочності отриманих результатів вибрана напруга, що виникає при дії власної ваги і корисного розподіленого навантаження в $0,2 \text{ т/м}^2$, власної ваги і $1,0 \text{ т/м}^2$.

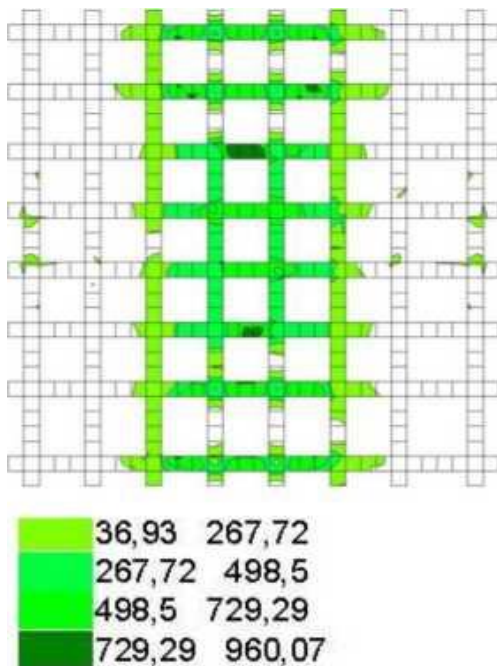


Рисунок 2.32 - Модель 4: напруги N_x , Т/м^2
(с.в.+ $+0,2 \text{ Т/м}^2$)

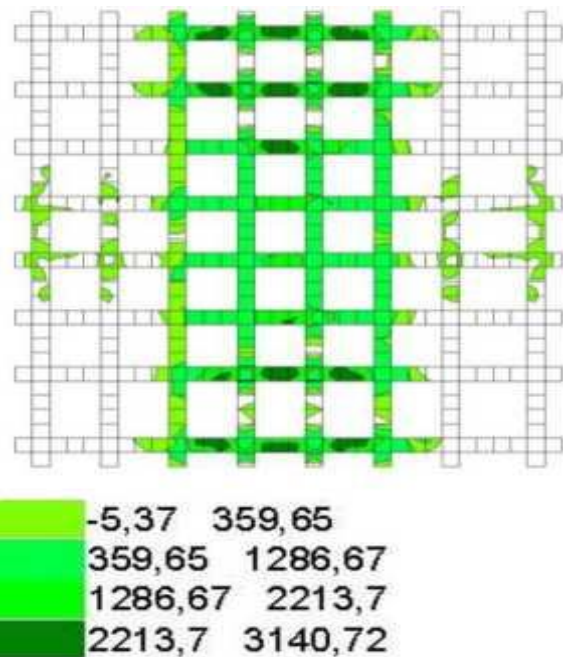


Рисунок 2.33. Модель 4: напруги N_x , Т/м^2
(с.в. $+1,0 \text{ Т/м}^2$)

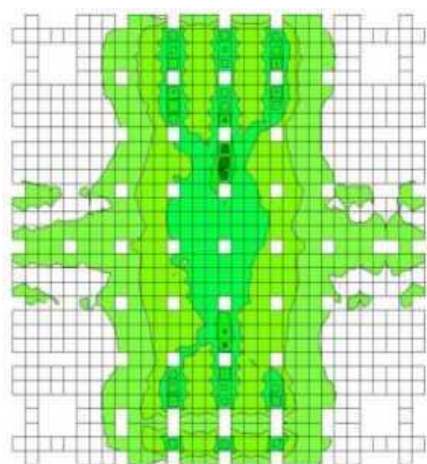


Рисунок 2.34 - Модель 5: напряжения N_x , T/m^2
(с.в.+0,2 T/m^2)

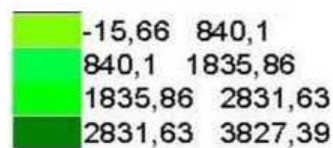
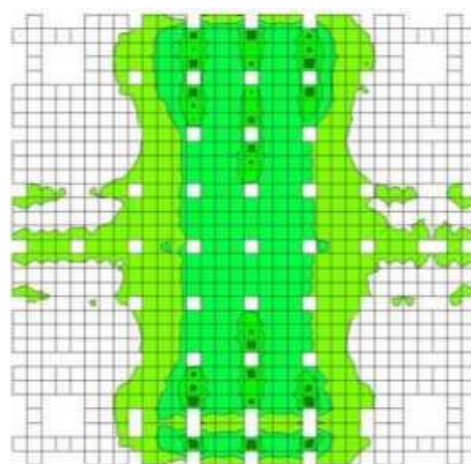


Рисунок 2.35 - Модель 5: напряжения N_x , T/m^2
(с.в.+1,0 T/m^2)

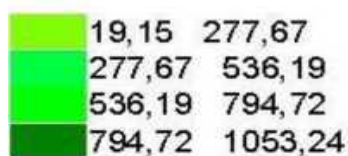
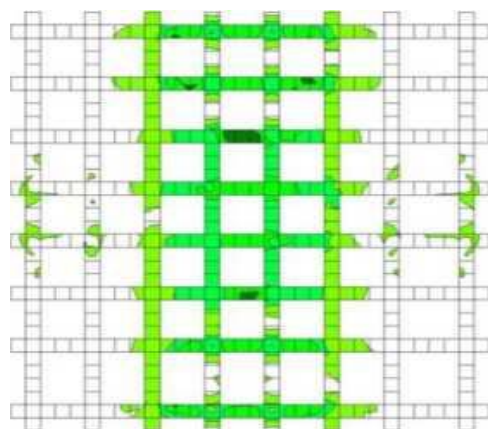


Рисунок 2.36 - Модель 6: напряжения N_x , T/m^2
(с.в.+0,2 T/m^2)

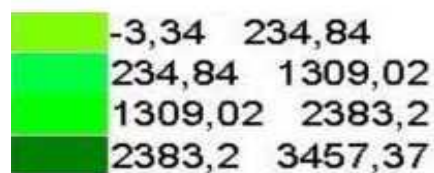
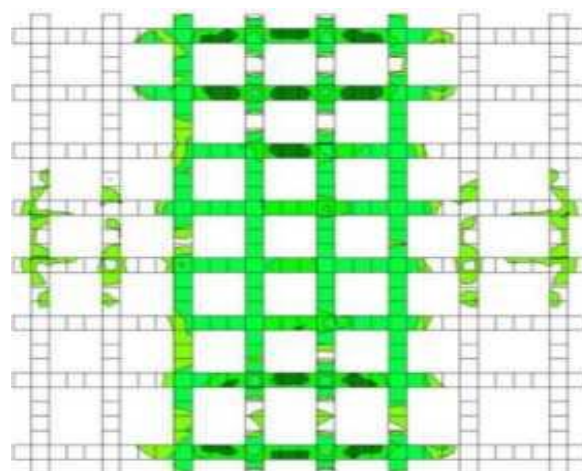


Рисунок 2.37 - Модель 6: напряжения N_x , T/m^2
(с.в.+1,0 T/m^2)

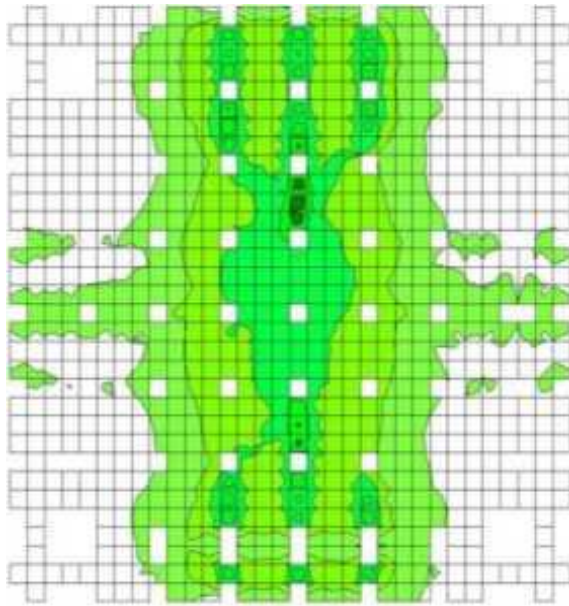


Рис.2.38. Модель 7: напруги
 N_x , Т/м²
 (с.в.+0,2 Т/м²)

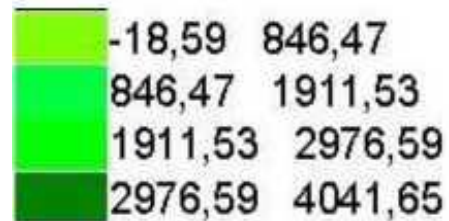
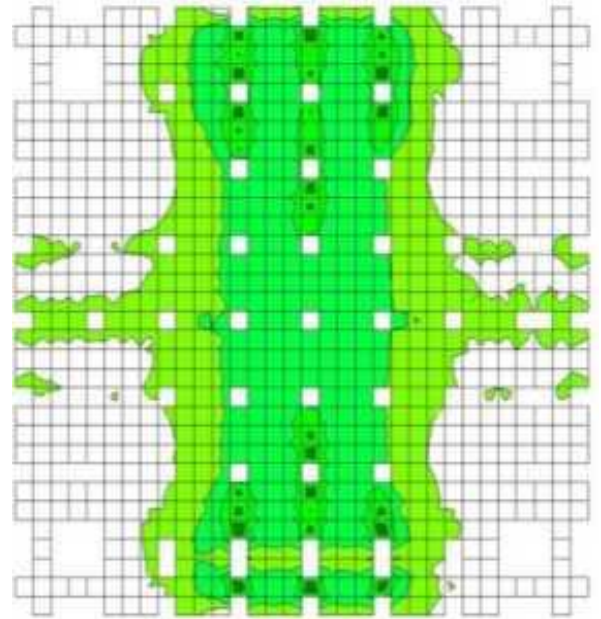


Рис.2.39. Модель 7: напруги
 N_x , Т/м²
 (с.в.+1,0 Т/м²)

Напруга N_y має симетрію 4-го порядку N_x і має ті ж значення, що і N_x .

Зміна розподілу максимальної напруги з ростом навантаження : з пролітної частини плити в прольоти прихованих ригелів.

Далі на графіці і в таблиці представлені залежності напруги по моделях від поетапного вантаження перекриття. Тут за відносний нуль прийнято навантаження - власну вагу.

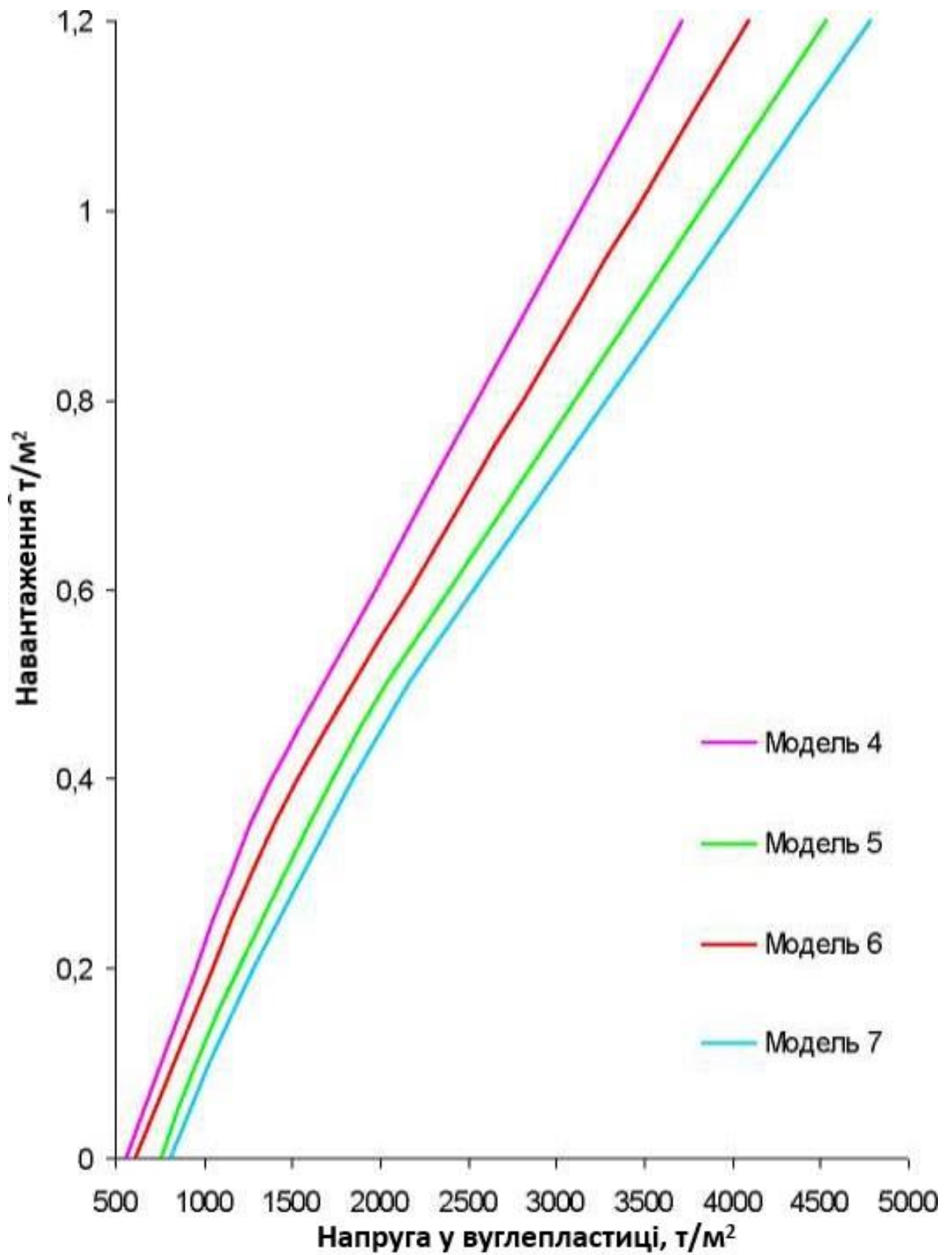


Рисунок 2.40 - Графік залежності розтягуючої напруги у вуглепластиці N_x від навантажень

Таблиця 2.4- Результати за розрахунками

Навантаження т/м ²	Модель 4	Модель 5	Модель 6	Модель 7
СВ	566,08	759,34	615,27	8146
0,1	763,06	958,78	834,66	1031,09
0,2	970,07	1305,91	1053,84	1201,82
0,3	1147,08	1479,07	1272,92	1573,02
0,4	1383,15	1634,23	1535,32	1854,43
0,5	1664,41	2026,94	1855,82	2104,63
0,6	1975,57	2409,03	2176,81	2540,54
0,7	2266,83	2789,12	2494,5	2915,04
0,8	2558,29	3165,21	2816,779	3200,85
0,9	2849,76	3371,3	3137,98	3606,25
1,0	3240,72	3817,39	3457,07	4001,65
1,1	3461,98	4193,48	3777,07	4410,06
1,2	3723,84	4529,57	4097,26	4792,07

За отриманими ізополями напруг видно, що при збільшенні корисного навантаження з 0,4т/м² змінюється характер напруги: максимальні значення переходять з прогонової частини плити в прольоти прихованих ригелів між колонами, що підтверджує зміна лінійного характеру на графіках (рис.2.40). Межа міцності на розтяг вуглепластика - 380000 Т/м², що на порядок більше за межу арматурної сталі. Недовикористання властивостей міцності вуглепластика компенсується жорсткими властивостями конструкції - гранично допустимі деформації конструкції настають раніше ніж гранично допустимі напруги в вуглепластику.

Розтягуюча напруга в арматурі.

Розтягуюча напруга в арматурі була визначена для робочих стержнів в прольотах.

Результати були узагальнені в таблиці та представлені у вигляді графіків. Як видно, для Моделей 3–5, де арматура нижня перебуває в активному стані, спостерігається лінійна залежність із зростанням навантаження. Слід відзначити, що зниження напруги в матеріалі з углепластика порівняно з Моделлю 3 є невеликим - менше 1%. Також можна відзначити, що при збільшенні площі поперечного перерізу углепластика (Модель 5) значення напруги залишилися незмінними - графіки співпадають, що свідчить про спільну роботу арматури із зміцнювачем. Для порівняння характеру залежностей також наведені графіки напруги в углепластику для Моделей 6–7, де арматура нижньої зони залишається неактивною.

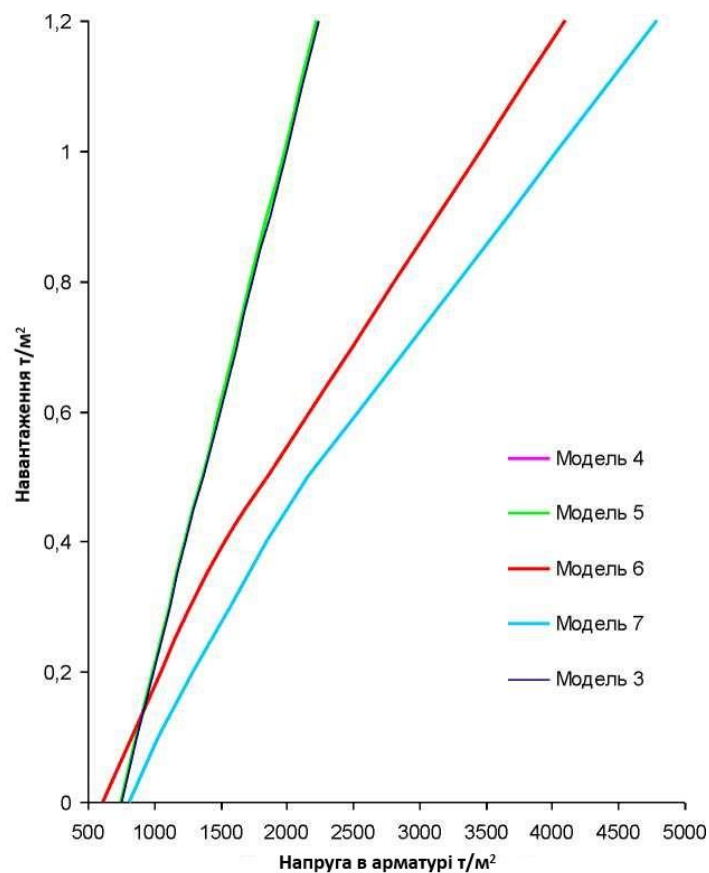


Рисунок 2.41 - Графік залежності розтягуючої напруги в арматурі від навантажень.

Таблиця 2.5 - Результати за розрахунками

Навантаження т/м ²	Модель 3	Модель 4	Модель 5	Модель 6	Модель 7
СВ	747,08	747,96	747,96	615,47	814,53
0,1	861,20	861,2	861,03	834,33	1031,29
0,2	901,23	991,2	991,03	1033,24	1292,82
0,3	1121,2	1121,23	1141,2	1372,12	1572,12
0,4	1230,97	1234,98	1234,97	1535,62	1854,42
0,5	1304,97	1364,67	1364,07	1853,92	2164,62
0,6	1494,06	1478,74	1478,97	2176,23	2542,04
0,7	1604,96	1608,01	1608,01	2496,3	2912,44
0,8	1730,71	1726,46	1722,36	2816,73	3290,82
0,9	1860,7	1832,45	1852,25	3133,08	3666,24
1,0	1908,7	1982,45	1982,405	3457,37	4042,65
1,1	2112,05	2076,18	2096,58	3773,67	4417,08
1,2	2242,04	2225,19	2226,109	4097,936	4792,40

Стискуюча напруга у бетоні.

На нижчеприведеному малюнку показаний характер ізополей напруги стислої зони бетону N_x в прольотах (напруга N_y симетрична, мають ті ж числові значення) : вони піддони в усіх моделях (у синіх тонах - найбільша по абсолютному значенню стискуюча напруга).

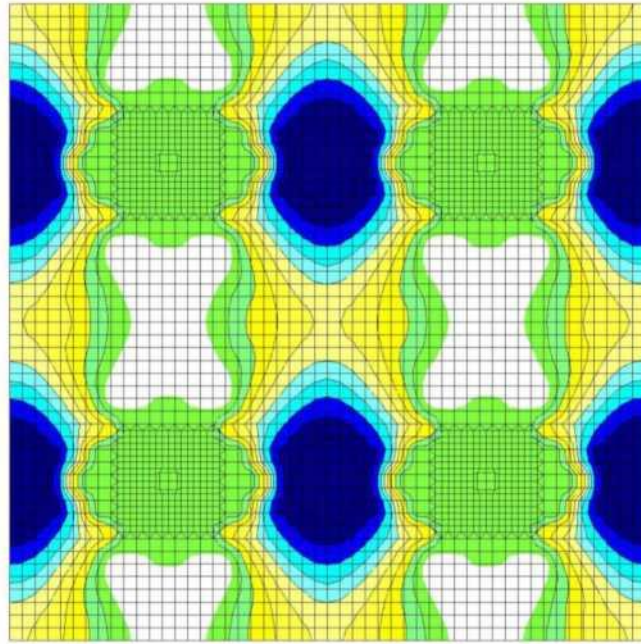


Рисунок 2.42 - Ізополі стискаючих напруг характерні для всіх моделей.

Далі на графіку та таблиці представлені залежності стискаючих напруг за моделями від поетапного навантаження перекриття. Тут за відносний нуль прийнято навантаження - власну вагу.

Таблиця 2.6 - Результати за розрахунками

Навантаження, т/м ²	Модель 3	Модель 4	Модель 5	Модель 6	Модель 7
СВ	206,43	201,31	201,38	248,53	238,43
0,1	235,64	231,01	234,73	284,53	272,26
0,2	267,24	261,64	268,17	319,67	306,17
0,3	303,13	302,21	307,5	355,1	340,14
0,4	338,05	336,9	337,89	390,71	374,09
0,5	370,06	369,56	368,77	426,2	408,05
0,6	414,87	404,15	401,75	461,81	448
0,7	431,77	436,48	437,04	497,33	475,9
0,8	472,18	470,44	467,42	532,8	509,9
0,9	506,51	504,44	501,79	568,4	543,8
1,0	540,41	537,64	535,45	603,9	577,83
1,1	571,39	571,37	5686,82	639,53	611,826
1,2	601,3	604,97	602,09	675,08	645,7

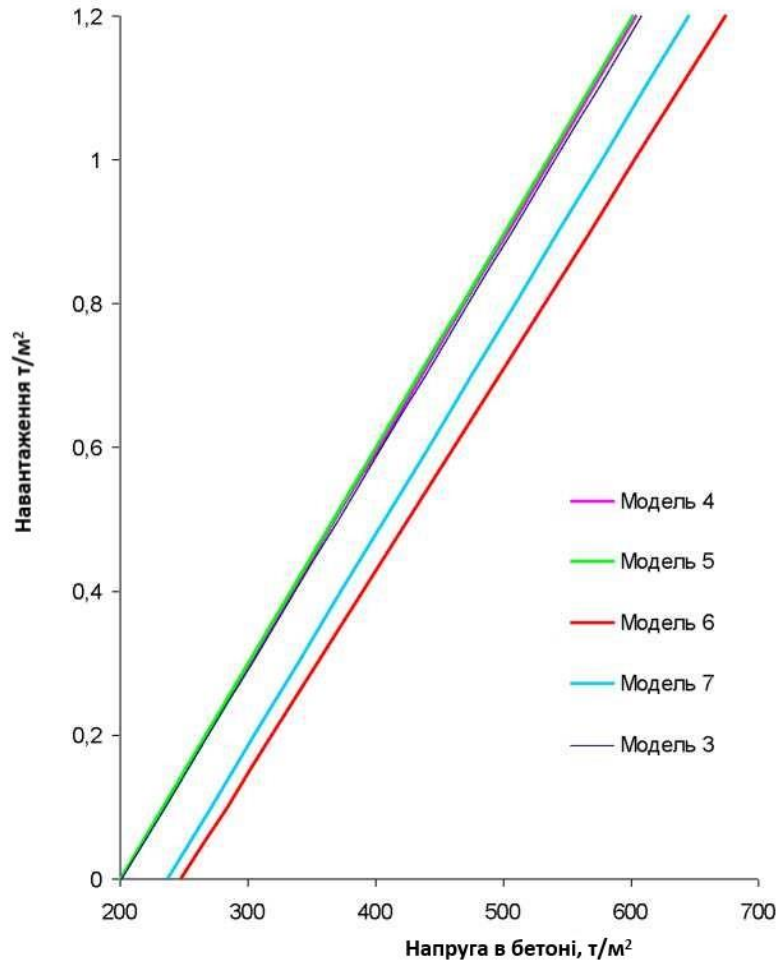


Рисунок 2.43 - Графік залежності стискуючої напруги у бетоні N_x від завантажень

З наведених результатів випливає, що відбувається зменшення лінійної залежності стискаючих напруг на 0,5% по Моделі 4 (рідкісний крок), на 0,75% по Моделі 5 (частий крок). У разі виключення з роботи нижньої арматури відновлення несучої здатності по напругах відбувається на 88% по Моделі 6, на 93% по Моделі 7. Гранично допустимих стискаючих напруг у бетоні в прольотах не відбувається.

Визначення достовірності моделі.

Практично будь-який об'єкт проектування, крім найпростіших, у процесі розрахунку розглядається з різних точок зору, і при цьому цілком природним було б поставити у відповідність такому об'єкту не одну, а безліч розрахункових схем. Кожна з таких схем робить свій внесок у розуміння роботи споруди, і лише її сукупність дає більш менш адекватне уявлення про

дійсний характер його несучої здатності. Крім того, збіг рішень за різними (незалежними) схемами різко підвищує оцінку достовірності результату.

2.6 Висновки по розділу

Виходячи з вищевикладеного процесу моделювання розрахункових схем і аналізу напружено-деформованого стану, запропонований наступний порядок операцій і дії при розрахунку посилення залізобетонної плити углепластиком за розглянутою методикою:

1. Підбір (чи перевірка) армування залізобетонної плити в оболонковій кінцево-елементній моделі на проектні навантаження.
2. Завдання об'ємної звичайно-елементної моделі з результатами армування.
3. Розрахунок та визначення зон з перевищенням допустимих розтягуючих напруг у бетоні (об'ємних елементах) з наступним «вимкненням» їх за допомогою зниження жорсткості - призначення мінімального модуля пружності.
4. Перерахунок схеми - визначення напружено-деформованого стану.
5. Поетапна зборка розрахункової схеми з системою посилення :
 - попередня напруга;
 - встановлення углепластику;
 - зняття напруги;
 - завантаження.

РОЗДІЛ 3

КОНСТРУКТИВНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПОСИЛЕННЯ ПЛИТИ ВУГЛЕПЛАСТИКОМ

Методика розрахунку і моделювання напружено-деформованого стану залізобетонних плит методом кінцевих елементів в програмному обчислювальному комплексі SCADOffice, посилених композитним матеріалом на основі вуглецевих волокон.

3.1 Обстеження конструкцій, що вимагають посилення

Обстежуваний об'єкт є будівлею, що будується. Основними несучими надземними конструкціями є колони, балки і плити перекриттів, виконані в монолітному залізобетоні.

Причина обстеження - виявлення технічного стану конструкцій, пошкоджених пожежею.

В результаті візуального огляду конструкцій виявлені наступні ушкодження від вогневої дії (див. рис 3.1, 3.2) :

- Покриття сажею і кіптявою конструкцій.
- Утворення поперечних тріщин, а також сітки тріщин в захисному шарі бетону балок розкриттям до 0,3 мм.
- Утворення сітки тріщин в захисному шарі бетону колон і перекриття розкриттям до 0,3 мм.
- Обвалення захисного шару бетону перекриття з оголенням робочої арматури нижньої сітки на площі « 310 м².
- Деформація і відшаровування арматури плити перекриття з подальшим прогином до 5 см.



Рисунок 3.1 - Обвалення захисного шару бетону перекриття 2-го поверху, відшаровування і деформація арматури нижньої етки



Рисунок 3.2 - Плити перекриття і балки по осі 3

3.1.1. Результати технічного обстеження

За результатами технічного обстеження несучих конструкцій, пошкоджених пожежею у будівлі за адресою : м.Кривий Ріг, вул., Лермонтова, 9а, виявлене наступне:

- За непрямыми ознаками (зміни міцності бетону та арматури, наявність сажі, колір бетону тощо) встановлена температура горіння в діапазоні 800-900°C.

- Потужність вогневої дії на конструкції характеризується як середня (максимальна температура близько 800°C), максимальна щільність теплового потоку близько $150 \text{ МДж}(\text{м}^2\text{-г})$. Температурний режим помірний. Температури вогневої дії класифіковані як високі. По тривалості вогнева дія на конструкції класифікована як вогневу дію середньої тривалості (короткочасна пожежа).

- Стан перекриття і балок другого поверху характеризується вогневою ерозією бетону на глибину більше 20мм, обваленням захисного шару, втратою зчеплення арматури з бетоном і вигинами стержнів, зниженням міцності бетону. Стан перекриття і балок по осі 3 оцінюється як аварійне. Перекриття другого поверху на момент обстеження посилене тимчасовими підпорами.

- Перекриття першого поверху не пошкоджене, міцність бетону відповідає проектній.

- Особливістю вогневого ураження конструкцій є збільшення ступеня пошкодження по висоті поверху знизу вгору від повної відсутності будь-яких пошкоджень підлоги та нижньої частини колон до значного руйнування та зниження міцності бетону перекриття та верхніх частин колон. Найбільш пошкоджені верхні частини колон у зоні вогнища пожежі та прилеглих до них. Міцність бетону колон місцями знижена від проектного класу C28/35 до C12/15. Захисний шар бетону на ділянках інтенсивної дії полум'я обрушений без оголення арматури. Стан колон на рівні 2-го поверху в осях 2/E, 2/F, 2/G, 3/E, 3/F, 3/G, а також колони в осях 2/E на рівні 3-го поверху оцінюється як аварійне. Стан інших колон працездатний.

- Міцність робочої арматури перекриття в зоні вогнища пожежі не понижена відносно нормативної.

На підставі вищеперелічених висновків можна сформульовані наступні рекомендації по подальшій експлуатації об'єкту :

- Обгороджування зону в осях 1-3/E - G від перебування людей.

- Влаштування тимчасових посилень (вже встановлені підпірки на момент написання висновку).
- Посилення конструкцій, що знаходяться в аварійному стані, розробити проект посилення.

Проект посилення конструкцій.

У проекті представлений варіант посилення конструкцій композиційними матеріалами з тканин на основі вуглецевих волокон за рахунок просочення і наклейки їх спеціальними полімерними сумішами на епоксидній основі. Матеріал Sika Wrap-230C використаний для створення армуючих усилиючих оболонок на колонах і для подовжнього і поперечного армування перекриттів[29].

Мета застосування - підвищення несучої здатності від початкової по "Висновку" на 10% - 60%.

3.2 Основні розрахункові положення

- При проектуванні посилення залізобетонних конструкцій тканиною використовувався метод розрахунку по граничних станах.
- Система посилення спроектована на сприйняття розтягуючих зусиль з урахуванням спільної деформації зовнішньої арматури і бетону конструкцій.
- У граничному стані елементу зусилля, що згинається, в стислій зоні сприймаються бетоном і стислою стержневою арматурою, а в розтягнутій - стержневою арматурою і зовнішньою композитною арматурою.
- При проектуванні посилення конструкцій враховано, що здатність несучих конструкції достатня для сприйняття постійного і обмеженого тимчасового навантаження у разі ушкодження системи посилення з яких-небудь причин.
- Обойма з композитної арматури Sika Wrap - 230C на колонах грає роль непрямого армування і забезпечує збільшення міцності на стискування.

- Проектом запропоновано посилити надпорні зони перекриття системою із попередньо напружених канатів. Зусилля попередньої напруги заведено $N = 16$ тонн. Посилення дає можливість частково зняти прогону. Це рішення підтверджено розрахунками в розрахунковому комплексі SCAD.

3.3 Принципові схеми посилення

- Посилення колон і простінка здійснюється шляхом облаштування навколо перерізу елементів бандажів з напрямом волокон перпендикулярно подовжній осі посилюваної конструкції.

- Посилення балок здійснюється наклейкою композитної арматури на нижню поверхню ребра у напрямі волокон уздовж осі і хомутів в поперечному напрямі.

- Посилення плити перекриття здійснюється наклейкою на нижню поверхню накладок композитної арматури з напрямом волокон уздовж осі конструкції і поверх них поперечних накладок з напрямом волокон перпендикулярно подовжніх накладок.

3.3.1 Фізико-механічні властивості тканини, вживаної для посилення

Sika Wrap - 230C

- товщина -0.293мм, ширина-300мм, вес- 530 г/м²
- модуль пружності - 2354740 кг/см²
- міцність на розтягування - 38735 кг/см², деформація при розриві - 1,64%
- щільність -1,8г/см³.

Sika Wrap - 230C, просочена смолою Sikadur – 330

- товщина -1,0мм
- граничне навантаження - 71355 кг/м
- модуль Юнга 642201 кг/см².

Умови експлуатації

Максимальна температура не повинна перевищувати 60-150°C.

3.3.2 Технологія застосування

1. Перед посиленням конструкції (колон, балок, перекриття) необхідно:

- видалити слабкі і незв'язані ділянки бетону ручним способом із застосуванням зубила і молотка на усю глибину ушкодження з видаленням слабких і незв'язаних ділянок. Товщина видаленого шару фіксується в журналі.

- нижня поверхня залізобетонного перекриття має бути очищена від фарби, олії, жирних плям, сажі, цементної плівки. Очищення поверхні здійснюється шляхом піскоструминної обробки з подальшим високонапірним промиванням водою (під тиском не менше 100атм.).

- демонтувати нижній захисний шар армування плити нижній грані поперечної арматури $d=10\text{мм}$, потім зачистити поверхню металевими щітками;

- встановити поздовжню арматуру $d=16\text{ мм}$ у проектне положення і закріпити її до бетонної основи плити перекриття, приваривши прихватками арматуру, що провисла, до поперечної арматури перекриття.

- у місцях оголення арматуру обробити сумішшю MAPEFER.

- відновити захисний шар зони нижнього армування (арматура $d=16$) плити перекриття шириною 400мм безпосередньо в місцях приклеювання елементів посилення Sika Wrap - 230С високоміцним полімербетоном Mapegrout Thixotropic.

У проміжках між відновленими смугами захисний шар відновлюється торкрет бетоном марки C28/35.

2. До наклеювання підсилюючих елементів поверхня має бути вирівняна, а локальні геометричні дефекти усунути.

3. Неплощинність поверхні має бути менше 5 мм на базі 2м або 1мм на базі 0,3м. Дрібні дефекти (сколи, раковини, каверни) не мають бути глибші 5мм і площею не більше 25см². Такі дефекти мають бути усунені за допомогою полімерних ремонтних сумішей зі швидким набором міцності. Вирівнювання значних (більше 25см²) ділянок поверхні проводиться з використанням полімер цементних ремонтних сумішей з наповнювачем у вигляді піску та дрібного щебеню.

4. Для кращого зчеплення адгезиву з бетоном поверхня основи має бути шорсткою. Це досягається обробкою поверхні бетону кам'яотесним долотом з подальшим зачищенням металевою щіткою. Обробці повинен бути підданий тільки поверхневий шар до оголення на поверхні великого заповнювача бетону.

5. Після очищення поверхня бетону обробляється складом ґрунтовки Sikadur - 330/Sikadur – 30 з метою зміцнення основи і поліпшення зчеплення адгезиву з бетонною поверхнею. Використовується смола для просочення Sikadur – 30[30-31].

6. Суміші ґрунтовок і адгезивних не можна наносити на мокру поверхню. Відкрита волога має бути видалена, поверхня бетону витерта і продута стислим повітрям. Допустима вологість поверхні - не більше 5%.

7. На поверхню основи крейдою наносяться лінії розмітки відповідно до прийнятої проектом схеми наклейки елементів посилення.

8. При обертанні колон на зовнішніх кутах конструкцій необхідно виконати фаски з катетом 1-2 см, або скруглення з радіусом 12см, а на внутрішніх кутах ремонтними сумішами виконати галтель радіусом не менше 20см.

9. Перший шар адгезиву наносять на основу з розрахунку 0,7-1,0кг/м².

10. Перед укладанням другого шару тканини наноситься шар адгезиву з розрахунку 0,5кг/м².

11. Тканину можна наклеювати із стикуванням внахлест не менше 100мм. Стикування здійснюється по напрямку розташування волокон в

разбежку по довжині в різних перерізах.

12. Операції по наклейці можуть виконуватися при температурі навколишнього середовища в діапазоні $+5 - +45^{\circ}\text{C}$, при цьому температура основи бетону повинна бути не нижче 5°C і вище температури точки роси на 3°C . Для підвищення температури можна використовувати додаткові локальні джерела тепла.

13. Час затвердіння має становити не менше 24 годин при температурі $+20^{\circ}\text{C}$ і не менше 36 годин при температурі від $+5$ до $+20^{\circ}\text{C}$.

14. Для забезпечення безпеки елементи посилення на завершальній стадії додатково покриваються спеціальними вогнетривкими сумішами, сумісними з використовуваним адгезивом.

Вимоги по пожежному захисту посилених залізобетонних конструкцій.

Усі елементи конструкцій посилення мають бути надійно захищені від вогневої дії шляхом обклеювання негорючою ізоляцією Rockwool Conlit 150 із склотканиною на одній стороні щільністю 150 кг/м^3 товщиною 40мм за допомогою клею Conlit Glue (модифікований силікатний негорючий клей) торцевим з'єднанням виробництва фірми Rockwool с подальшою, що затерла під фарбування. Стики мають бути повністю проклеєні.

Порядок проведення робіт з відтворення несучої здатності конструкцій підданих вогневному впливу.

1. Перед проведенням безпосереднього посилення виставляються підпори.

Схема розставлення підпор розробляється в розділі "Проект виробництва робіт" (ППР).

2. Спочатку виконується посилення колон, вказаних на кресленнях.

3. Після посилення колон виконується посилення балок, вказаних на кресленнях.

4. По тім робиться посилення заздалегідь напруженими канатами прихованих капітелей безбалочного перекриття. Посилення капітелей

робити строго по буквених осях по обох колонах, рівномірно пересуваючись від середини ділянки перекриття.

5. При виробництві посилення заздалегідь напруженими канатами прихованих капітелей безбалочного перекриття в обов'язковому порядку одночасно ведеться моніторинг за його деформаціями з фіксацією величин в журналі.

Розрахунок напружено-деформованого стану конструкцій.

Виконані статичні розрахунки в лінійній і в нелінійній постановці за трьома основними схемами. Розрахункові схеми прийняті у вигляді рядового фрагмента з використанням навантаження на ці перекриття, а так само від основних вищерозміщених несучих конструкцій. Навантаження від основних вищерозміщених несучих конструкцій отримані в результаті розрахунку усього каркаса будівлі.

Отримання напружено-деформованого стану перекриття, балок і колон, схильних до вогневої дії полягає в прийнятих чотирьох стадіях зведення :

- 1-я стадія, напружено- деформованого стану перекриття без нижнього захисного шару і нижнього шару арматури.

- 2-я стадія, напружено- деформованого стану перекриття без нижнього захисного шару і нижнього шару арматури при посиленні перекриття попередньою напругою канатів. Канати встановлюються згори на перекритті, в районі зірваних капітелей, для зняття частини пролітного моменту. За результатами розрахунку контролюються зусилля в канатах і напруга в перекритті.

- 3-я стадія, напружено- деформованого стану перекриття після відновлення геометрії перекриття торкретбетоном. Шар торкретбетона враховується як навантаження.

- 4-я стадія, відтворення нижнього арматурного шару шляхом наклеювання на нижню поверхню перекриття смуг 300 мм. високоміцної тканини з вуглепластика за технологією фірми SICA. За результатами

розрахунку, контролюються зусилля в канатах і напруженно- деформованого стану, як перекриття, так і смуг посилення.

3.4 Опис розрахункової моделі

Конструктивна система змішана, перехресна. Стики колон з балками та плитами - жорсткі. Несуча конструктивна система регулярна в плані та за висотою. Розрахункова модель прийнята просторовою, оболонково-стрижневою. Розрахункова схема виконана моделюванням фрагмента конструктивних елементів. Загальний вигляд наведено на рисунках 3.3-3.4.

Лінійні та нелінійні розрахунки виконано за допомогою системи кінцевого елементного аналізу SCAD 11.3.

Розрахункова модель має:

- вузлів - 21302
- елементів - 23605

Матеріал і перерізи основних несучих конструкцій в розрахунковій схемі:

- Залізобетон, який не схильний до вогневої дії, прийнятий класу С28/35 за ДСТУ Б В.2.7-43-9[13].
- Залізобетон, який схильний до вогневої дії прийнятий клас С12/15 за ДСТУ Б В.2.7-43-9[13].
- Арматура усіх конструкцій класу А400С.
- Колони прямокутні перерізом 600х800 мм.
- Балки прямокутні перерізом 300х400 мм. і перерізом 500х600 мм.
- Пол - завтовшки 150 мм відповідно до проектних рішень.
- Перекриття, не схильних до вогневої дії, завтовшки 300 мм;
- Перекриття, схильне до вогневої дії, завтовшки 250 мм.

У проекті представлений варіант посилення конструкцій композиційними матеріалами з тканин на основі вуглецевих волокон за рахунок просочення і наклейки їх спеціальними полімерними складами на

епоксидній основі. Матеріал Sika Wrap - 230C використаний для створення армуючих усилиючих оболонок на колонах і для подовжнього і поперечного армування перекриття.

3.5 Прийняті в розрахунку навантаження і дії

Навантаження приведені в таблицях 3.1, 3.2, 3.3.

Розрахунок виконаний по нормах проектування "ДБН В.1.2-2:2006* зі зміною №2"[14].

Таблиця 3.1- Постійних навантажень

Для розрахунку об'єкту в цілому		
1. Власна вага залізобетонних конструкцій		
Повне	Визначається за геометрією	Т/м ²
Коефіцієнт надійності за навантаженням γ_f	1,1	
3. Власна вага конструкцій (стіна), що захищають		
Повне	Визначається за геометрією	Т/ пм
Коефіцієнт надійності за навантаженням γ_f	1,2	
Для розрахунку об'єкту в цілому		
	Нормативне значення	Розрахункове значення
Повне	2,37 Т/м ²	2.84 Т/пм

Таблиця 3.2 - Тимчасові навантаження

Для розрахунку об'єкту в цілому		
4. Зали:		
г) торгові, виставкові і експозиційні		
Максимальне значення нормативного навантаження :		
Повне	0,4	Т/м ²
Знижене	0,14	Т/м ²

Коефіцієнт надійності по навантаженню γ_f	1,2	
	Нормативне значення	Розрахункове значення
Повне	0,4 Т/м ²	0,48 Т/м ²
Знижене	0,14 Т/м ²	0,168 Т/м ²

Таблиця 3.3 - Завантаження та їх комбінації у розрахунковій схемі

N	Найменування Завантаження.	Розшифровка	Примітки
L1	Власна вага	Власна вага конструкцій	
L2	Навантаження від верху конструкцій	Навантаження від верхніх конструкцій	
L3	Стіна	Навантаження огорожувальної конструкції	
L4	Підлога та перегородки	Навантаження від підлоги і перегородок	
L5	Корисна 400	Навантаження від тимчасової Експлуатаційного впливу на перекриття	
L6	Торкретбетон	Навантаження від поновлюючого шару торкретбетона	
L7	Переднапруга - 610	Попередня напруга канатів	
N	Комбінація.		

C1	$(L1)*1.1 + (L2)*0.85$ $+ (L3)*1.1$	Для визначення деформацій до посилення	Стадія 1, (схема №1). Для L2 застосований коефіцієнт, що враховує відсутність навантажень L3, L4, L5, на вищерозміщених поверхах на цій стадії
C2	$(L1)*1.1 + (L2)*0.85$ $+ (L3)*1.1 + (L7)*1.0$	Для визначення деформацій при посиленні попередньою напругою канатів	Стадія 2 (схема №2). Для L2 застосований коефіцієнт, що враховує відсутність навантажень L3, L4, L5, на вищерозміщених поверхах на цій стадії

С3	$(L1)*1.1 + (L2)*0.85$ $+ (L3)*1.1 +$ $(L6)*1.3 + (L7)*1.0$	Для визначення деформацій при посиленні попередньою напругою канатів і включення навантаження від торкретбетона	Стадія 3. (схема №3) Для L2 застосований коефіцієнт, що враховує відсутність навантажень L3, L4, L5, на вищерозміщених поверхах на цій стадії
С4	$(L1)*1.1 + (L2)*1.1 +$ $(L3)*1.1 + (L4)*1.3 +$ $(L5)*1.2 +$ $(L6)*1.3 + (L7)*1.0$	Для визначення деформацій при посиленні попередньою напругою канатів і включення в роботу ламинатов при повному навантаженні	Стадія 4 (схема №41). Для L2 застосований коефіцієнт, що враховує наявність навантажень L3, L4, L5, на вищерозміщених поверхах на цій стадії

3.6 Візуалізація результатів розрахунку

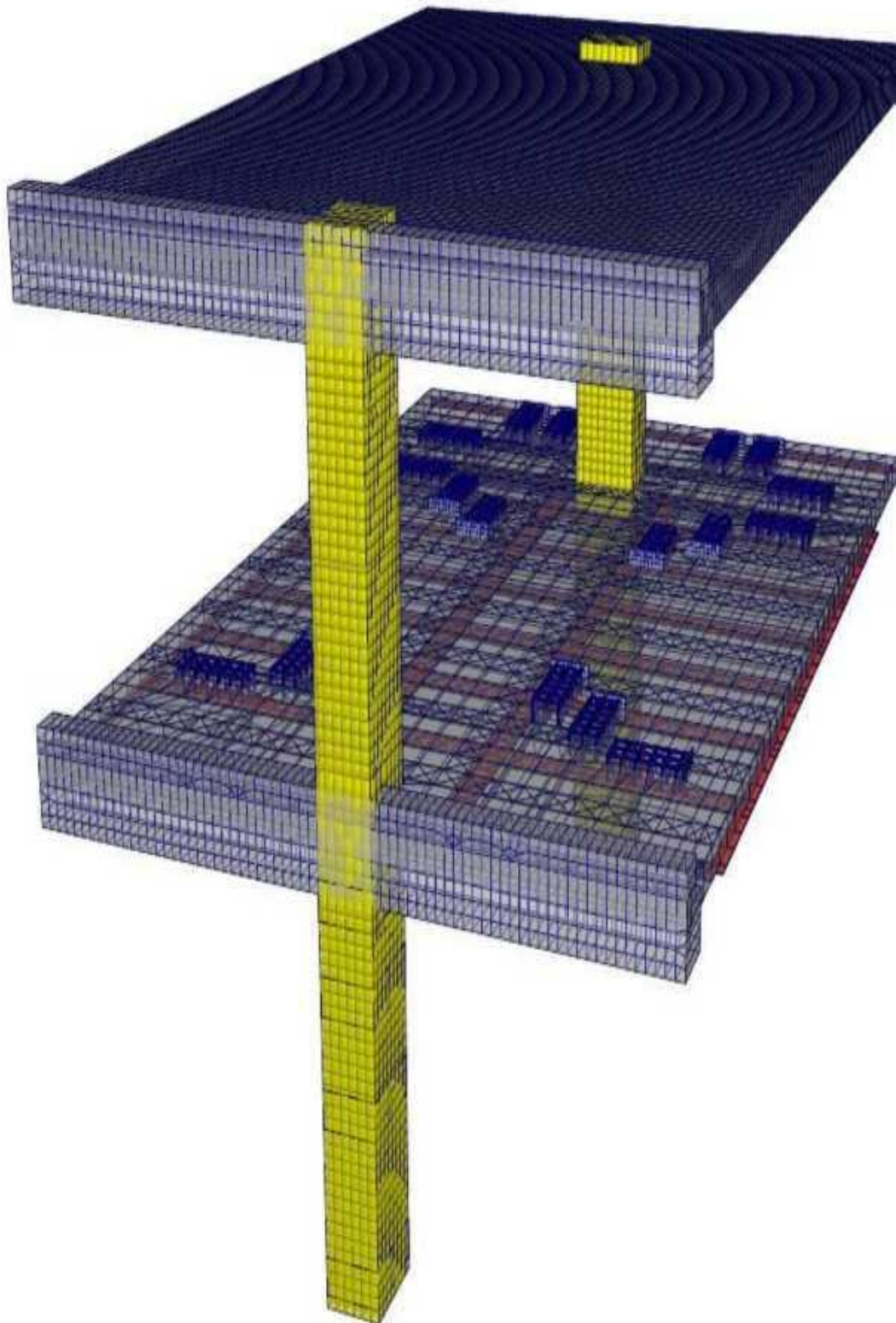


Рисунок 3.3 - Загальна розрахункова схема в КЭ.

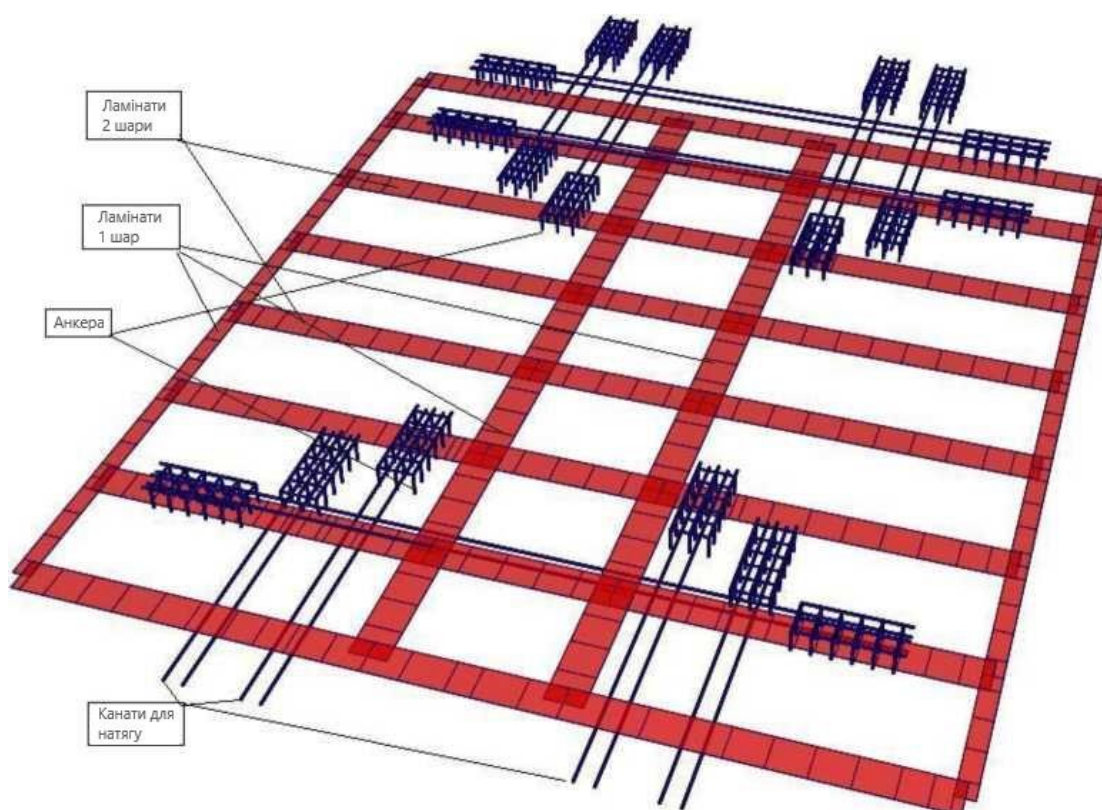


Рисунок 3.4- Загальний вигляд на елементи посилення з розрахункової схеми

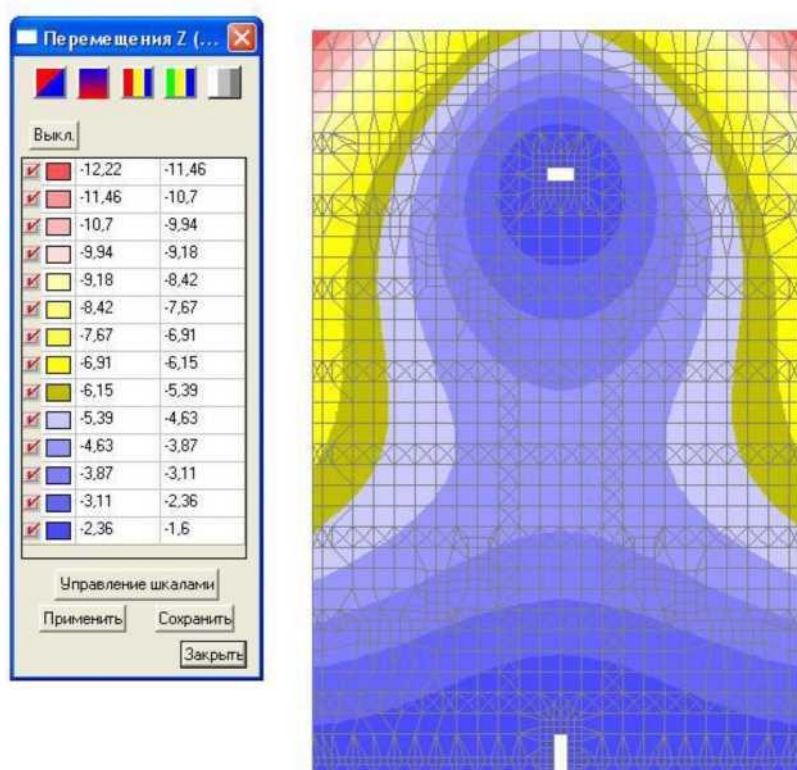


Рисунок 3.5 - Етап 1. Деформація перекриття над 2-м поверхом по вертикалі

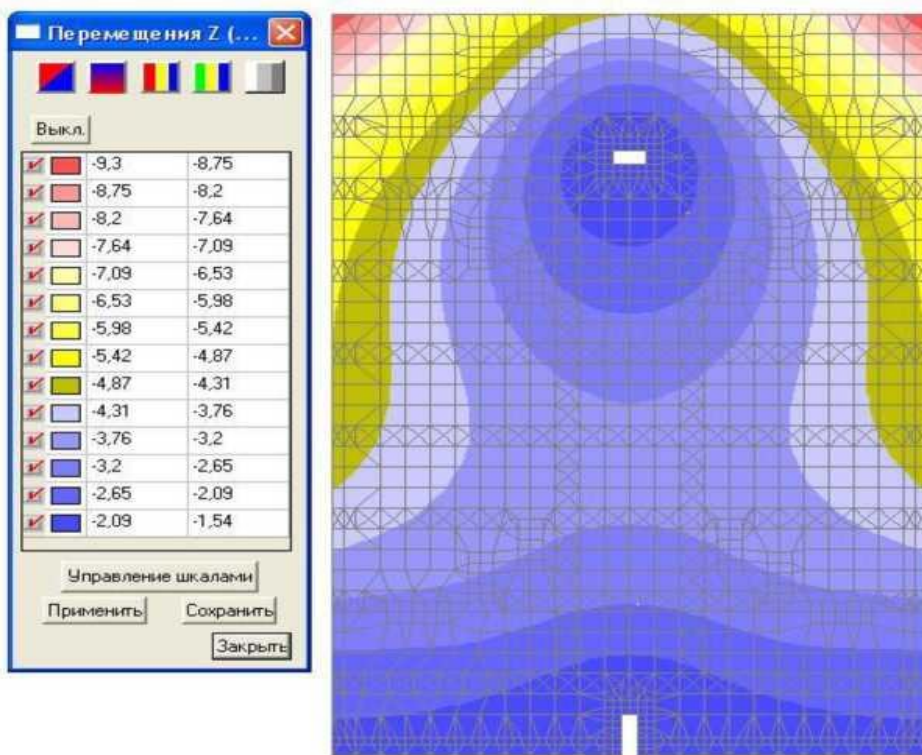


Рисунок 3.6 - Этап 2. Сумарна деформація перекриття над 2-м поверхом по вертикалі.

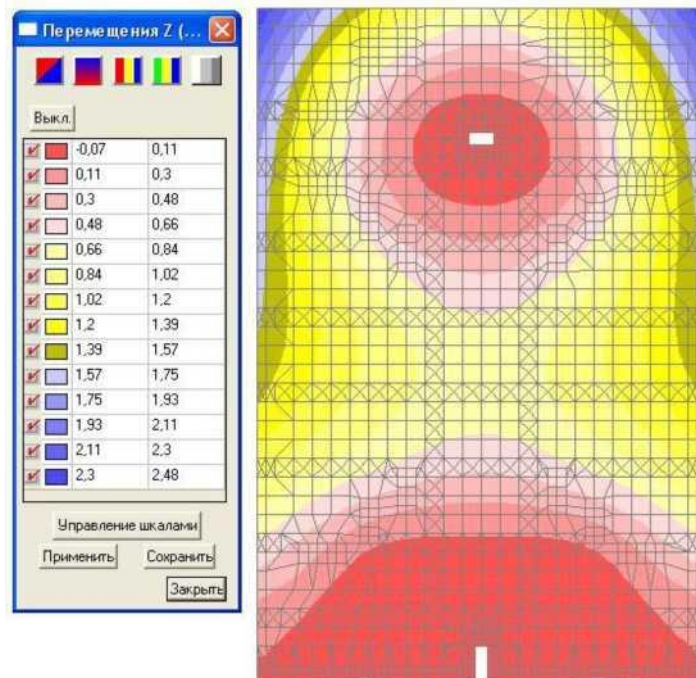


Рисунок 3.7 - Этап 2. Складова деформація перекриття над 2-м поверхом по вертикалі від натягу

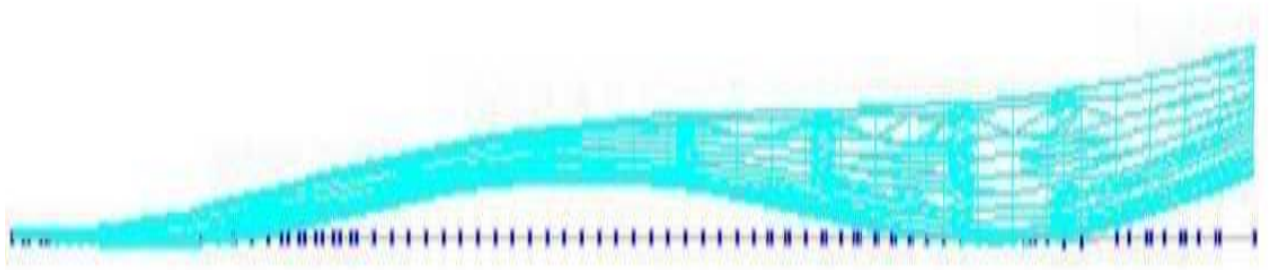


Рисунок 3.8 - Візуалізація вертикальної деформації перекриття над 2-м поверхом від попереднього натягнення

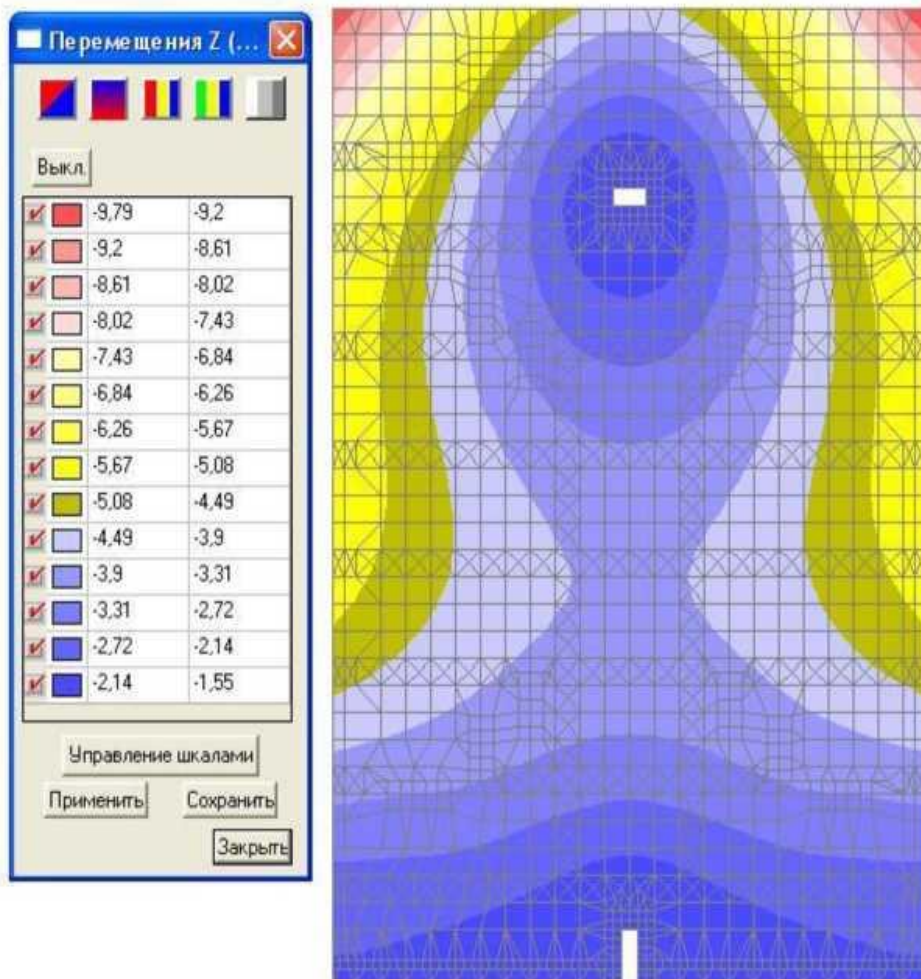


Рисунок 3.9 - Етап 3. Деформація перекриття над 2-м поверхом по вертикалі

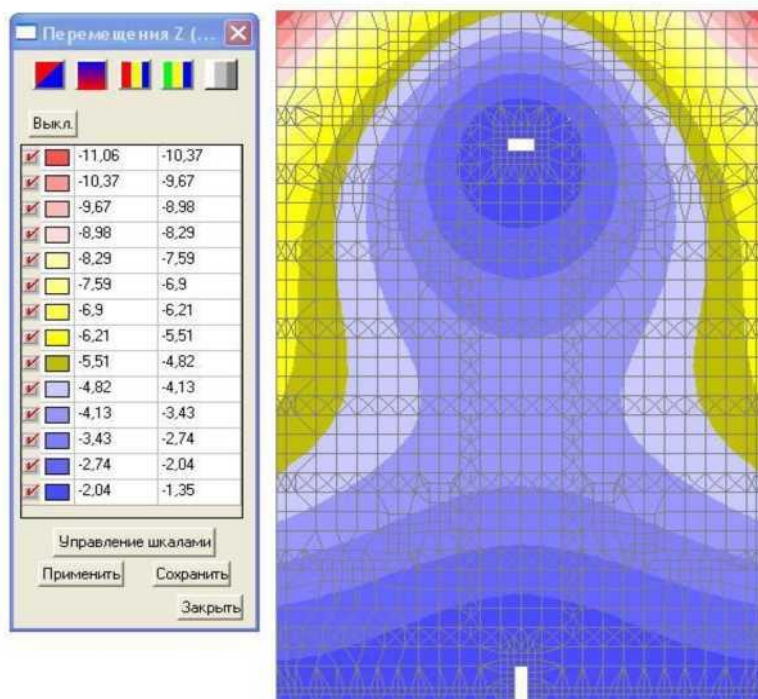
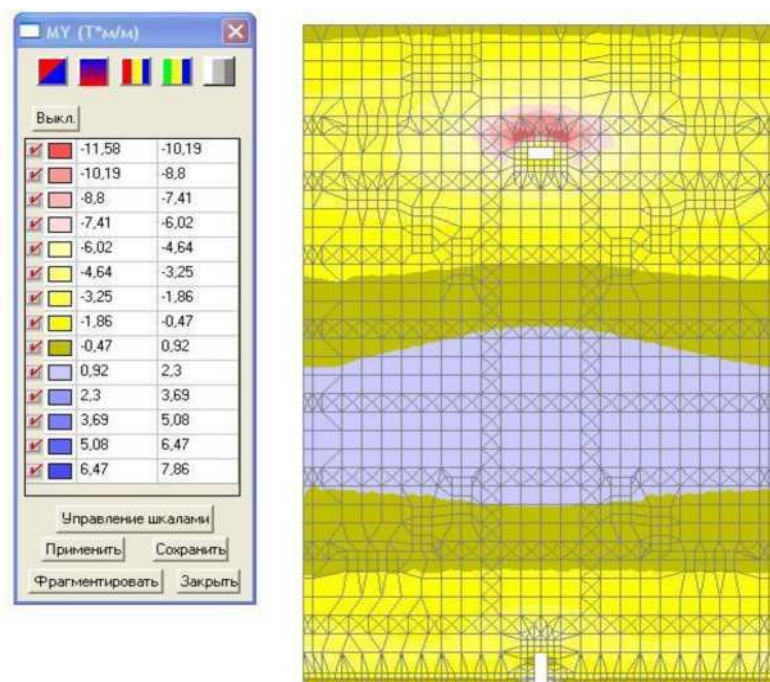


Рисунок 3.10 - Этап 4. Деформация перекрытия над 2-м поверхом по вертикали



Рисвнок 3.11 - Этап 2. Момент M_y , що вигинає, в перекритті над 2-м поверхом

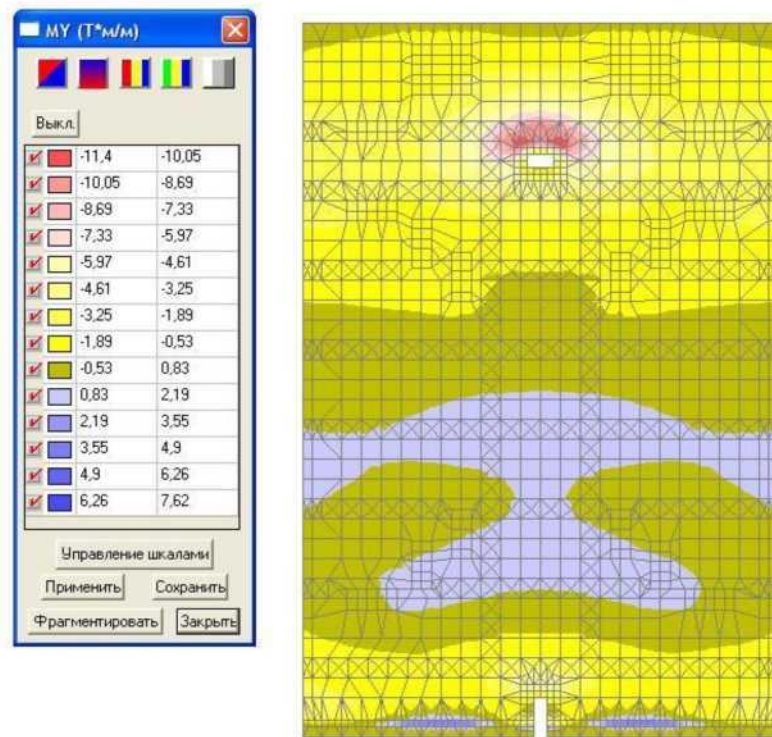


Рисунок 3.12 - Етап 3. Момент M_y , що вигинає, в перекритті над 2-м поверхом

3.7 Випробування системи посилення

До застосування навантаження має бути розпочато моніторинг за деформаціями посилених конструкцій. Фіксація деформацій повинна вестись кожні три години протягом двох тижнів із записом до журналу.

Як навантаження застосовуються мішки, заповнені піском. Кількість мішків та їх розташування відповідає прикладеному навантаженню під час експлуатації.

За результатами випробувань прогин перекриття становив 1 мм, отримане значення знаходиться в межах похибки приладу. Розбіжність з очікуваною осадкою (12мм) можна пояснити великим запасом міцності залізобетонної плити завтовшки 300мм, що ще не введена в експлуатацію. Проведені випробування прийнято вважати успішними.

3.8 Висновки по розділу

Розроблена модель дозволила ввести ідею переднапруги за допомогою реалізованого режиму «Монтаж» в ПК SCADOffice - поетапного створення розрахункової схеми (з додаванням або видаленням елементів, зміною схем завантажень, зміною напруженого стану конструкції). Усі розрахунки, пов'язані з монтажем системи і з процесом створення попередньої напруги, виконано в припущенні справедливості звичайних допущень лінійної будівельної механіки для кожного етапу монтажу. Проте, в цілому, за рахунок зміни розрахункової схеми при переході від етапу до етапу, завдання було нелінійним. Така нелінійність, обумовлена історією створення системи, була названа генетичною.

Достовірність отриманих результатів підтверджується використанням теоретично обґрунтованих методів будівельної механіки і теорії пружності, порівнянням результатів виконаних за запропованою методикою розрахунку з традиційними аналітичними способами розрахунку дозволило зробити висновок про життєздатність запропованої методики розрахунку посилення.

Розроблена модель дозволяє проводити подальші дослідження в області розрахунку посилення залізобетонної плити вуглепластиком : посилення розтягнутих опорних зон, дослідження ефекту відшарування композитного матеріалу в стислій зоні, продовжити дослідження конструкції у фізически- нелінійній постановці і з урахуванням трещинообразования.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Під час виконання ремонтних або реконструкційних робіт часто потрібно посилити несучі конструкції, які проявляють недостатню здатність. Традиційні методи для цього зазвичай є складними і працезатратними. У той час як за кордоном, і недавно в Україні, широкого поширення набула система підсилення конструкцій з використанням зовнішнього армування високоміцними полімерними матеріалами, такими як вуглецеві та склопластикові композити.

2. Нова технологія вирішує проблему обмеженої несучої здатності конструкцій за допомогою застосування спеціально модифікованих та епоксидних смол, які приклеюються до їх поверхні. Ці смоли містять тканини з вуглецевих та скляних ниток або готові елементи з них. Зміцнення полімерними композитними матеріалами спрямоване на підвищення несучої здатності, тріщиностійкості, жорсткості та сейсмостійкості конструкцій, а також значного підвищення стійкості до динамічних та ударних навантажень.

3. На сьогодні в Україні відсутні офіційно опубліковані дані по розроблених або таких, що розробляються методиках розрахунку посилення залізобетонних конструкцій композиційними матеріалами (зокрема углепластиками), проектування, що реалізуються за допомогою автоматизованих систем, в основі яких лежить метод кінцевих елементів.

4. Об'єктом дослідження послужила монолітна залізобетонна плоска плита перекриття, працююча в двох напрямках. При посиленні конструкції углепластиком була змодельована сітка з оболонкових кінцевих елементів з фізико-механічними властивостями матеріалу посилення, прикріплюваних до низу перекриття за допомогою пружних зв'язків, що моделюють зв'язок «бетон - углепластик».

5. Були розглянуті 2 ситуації застосування системи посилення : посилення цілої неушкодженої плити композитом і плити, де в результаті дії на неї вогню були змодельовані ушкодження - неробочий стан нижньої

арматури (виключення її з роботи конструкції) і відстріл нижнього захисного шару.

б. Розглянута і запропонована методика розрахунку посилення вуглепластиком пролітної частини плоскої монолітної залізобетонної плити, працюючої в двох напрямках, на основі методу кінцевих елементів, проведений аналіз напружено-деформованого стану моделей об'єкту дослідження, результати були представлені по нарузі, що виникає в арматурі, вуглепластиці, бетоні і деформаціям конструкції. Відбудована розрахункова модель залізобетонної плити з системою посилення з вуглепластика в ПК SCADOffice на основі методу кінцевих елементів дозволила отримати залежності напруги і деформацій від завантажень конструкції плити, що додавалися, з посиленням і без посилення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бліхарський З.Я. Реконструкція та підсилення будинків та споруд: Навчальний посібник. – Львів: НУ "Львівська політехніка", 2008. – 108 с.
2. Борисюк О.П. Аналіз стану питання підсилення розтягнутої зони та розрахунку за нормальними перерізами згинальних залізобетонних елементів /Борисюк О.П., Конончук О.П. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП, 2010. – Вип. 20. – С. 452 – 458.
3. Борисюк О.П. Вплив анкерування композитної стрічки при підсиленні дослідних зразків згинальних елементів / Борисюк О.П., Конончук О.П., Собко Ю.М. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП, 2012. – Вип. 24. – С. 496 – 501.
4. Борисюк О.П. Дослідження роботи підсилених залізобетонних балок при дії малоциклових навантажень / Борисюк О.П., Конончук О.П., Мельник С.В., Петришин В.М. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне, 2008. – Вип. 17. – С. 404 – 410.
5. Борисюк О.П. Методика випробовування підсилених згинальних залізобетонних елементів при малоциклових навантаженнях / Борисюк О.П., Конончук О.П. // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – Київ, ДП НДІБК, 2011. – Вип. 74. – Книга 2. – С. 709 – 717.
6. Борисюк О.П. Міцність, жорсткість та тріщиностійкість нормальних перерізів залізобетонних балок, підсилених композитними матеріалами / Борисюк О.П., Конончук О.П. // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: НТУ, 2012. – Випуск 2 (32), Т.2. – С. 3 – 10.
7. Боярчук Б.А. Міцність, тріщиностійкість та деформативність залізобетонних конструкцій при різних способах підсилення розтягнутої зони: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Б.А. Боярчук // Луцьк, 2003. – 157 с.

8. Васильєв І.В. Методика виконання та експериментальні дослідження залізобетонних балок, підсилених обіймою під навантаженням / І.В. Васильєв, З.Я. Бліхарський, Р.Є. Хміль // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2007. – Вип. 15. – С. 358 – 363.

9. Гнідець Б. Г. Реконструкція і підсилення мостів зі зміною статичної схеми і регулюванням зусиль // Збірник наукових праць : Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. – Львів.: Каменяр, 2000. – Вип. 4. – С. 569 – 576.

10. Гриневич Є.О. Підсилення залізобетонних балок локальним обтисненням додатковою зовнішньою арматурою: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Є.О. Гриневич // Харків: ХДТУБА, 2004. – 19 с.

11. ДБН В.2.6-98:2009 Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.

12. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. – Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010.– 166 с.

13. ДСТУ Б В.2.7-43-96 Бетони важкі. Технічні умови – Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 1997.– 16 с.

14.ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи. Норми проектування. – Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2006. – 75 с.

15. Кваша В.Г. Відновлення автодорожного моста після наслідків повені з розширенням і підсиленням прольотної будови / Кваша В.Г., Салійчук Л.В., Рачкевич В.С., Семанів Л.Я. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2008.– Вип. 16. Ч.1. – С. 342 – 350.

16. Кваша В.Г. Експериментальні дослідження і розрахунок витривалості, жорсткості і тріщиностійкості згинальних залізобетонних елементів при багаторазових навантаженнях / В.Г. Кваша, В.В. Левчич, І.В.

Мельник //Проблеми теорії і практики будівництва: Збірник матеріалів конференції. – Львів:1994. – Том 1. – С. 131 – 141.

17. Кваша В.Г. Експлуатаційний стан струнобетонних прольотних будов та ефективні способи їх розширення і підсилення / Кваша В.Г., Салійчук Л.В., Собко Ю.М. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне,2008. – Вип. 16. Ч.1. – С. 351 – 362.

18. Кваша В.Г. Розрахунок міцності нормальних перерізів залізобетонних балок, підсилених зовнішнім наклеєним композитним армуванням, на основі деформаційної моделі // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2008. – Вип. 16. Ч.1. – С. 363 – 371.

19. Конончук О.П. Результати експериментальних досліджень залізобетонних балок, підсилених композитними матеріалами // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП, 2012. – Вип. 23. – С. 479 – 486.

20. Конончук О.П. Розрахунок несучої здатності нормальних перерізів підсилених згинальних залізобетонних елементів при дії на них малоциклових навантажень. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: ОДАБА, 2012. – Вип. 46. – С. 185 – 192.

21. Мельник І.В. Міцність і деформативність залізобетонних балок підсилених конструкційними композитами при різних умовах попереднього завантаження / І.В. Мельник, Р.З. Добрянський, А.Я. Мурин // Зб. наук. праць "Будівельні конструкції" . – Київ, 2005. – Вип. 56. – С. 121 – 129.

22. Мельник І.В. Ширина розкриття нормальних тріщин залізобетонних балок, підсилених зовнішньою композитною арматурою / І. В. Мельник, А. Я. Мурин, Р.І. Канафоцький, Т. В. Приставський // Вісник НУ "Львівська політехніка" : теорія і практика будівництва. – Львів, 2010. – № 662. – С. 308 – 315.

23. Мурин А.Я. Міцність, жорсткість і тріщиностійкість залізобетонних балок, підсилених зовнішньою композитною арматурою: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 /А.Я. Мурин // Львів, 2011. – 163 с.

24. Новікова С.М. Залізобетонні елементи, підсилені регульованим обтиском /С.М. Новікова, М.Г. Чеканович // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2000. – Вип. 5. – С. 316 – 321.

25. Римар Я.В. Міцність та деформативність залізобетонних балок, підсилених під навантаженням нарощуванням арматури: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 /Я.В. Римар // Львів: НУ "Львівська політехніка", 2010. – 20 с.

26. Смолянінов М.Ю. Підвищення міцності й тріщиностійкості залізобетонних елементів, підсилених акриловим полімеррозчином, при дії короткочасних статичних і багаторазово повторних навантажень: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / М.Ю. Смолянінов // Харків: УДАЗТ, 2007. – 23 с.

27. Смолянінов М.Ю. Підсилення залізобетонних елементів, що зазнають згину, акриловим полімеррозчином // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2005. – Вип. 12. – С. 432 – 439.

28. Технічна мапа матеріалу. Ідентифікаційний № 02040101 System Sika® CarboDur® Plates. Видання UA_YS_04/2011.

29. Технічна мапа матеріалу. Ідентифікаційний № 020401020010000025 SikaWrap®-230 C/45. Видання UA_YS_04/2011.

30. Технічна мапа матеріалу. Ідентифікаційний № 020401040010000001 Sikadur®-30. Видання UA_YS_04/2011.

31. Технічна мапа матеріалу. Ідентифікаційний № 020401040010000004 Sikadur®-330. Видання UA_YS_04/2011.

32. Al-Mahaidi R., Hii A. Bond behaviour of CFRP reinforcement for torsional strengthening of solid and box / section RC beams. Al – Mahaidi Riadh, Hii Adrian K.Y. Composites. B. 2007. 38, №5 – 6, S.720 – 731.

33. Мурин А. Я. Комп'ютерне моделювання роботи залізобетонних балок, підсилених фібропластиковою арматурою / А. Я. Мурин, М. М. Іванів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2012. – № 742: Теорія і практика будівництва. – С. 139–144. –

34. Бабич Є. М., Бабич В. Є. Розрахунок і конструювання залізобетонних балок :навчальний посібник / Є. М. Бабич, В. Є. Бабич. – 2-ге видання, перероблене і доповнене. – Рівне : НУВГП, 2017. – 191 с
35. Дворкін Л.Й. Основи бетонознавства/ Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Дворкін. - К.: Основа, 2007.
36. Kaminska M.E. Obliczanie nosnosci belek wzmacnionych tasmami CFRP / M.E. Kaminska, R. Kotynia // XLV konf. nauk. KILiW PAN i KN PZITB Problemy naukowo - badawcze budownictwa. – Tom 2, Konstrukcje betonowe. – Krynica, –1999. – S. 87 – 94.
37. Meier U. Composite for structural repair and retrofitting / U. Meier // International Conference on Fiber Composites in Infrastructure ICC1 1996. – S. 1202 – 1216.
38. Meier U. Strengthening of Structures with CFRP Laminates: Research and applications in Switzerland Advanced composite materials in bridges and structures. / U. Meier, M. Deuring, H. Meier, G. Shwegler // 1st International Conference. Sherbrooke, Canada. – 1992.
39. Ritchie P. External Reinforcement of Concrete Beams / P. Ritchie, D. Thomas, G.M. Connelly // Iszng Fiber-Reinforced Plastics, AC 1 Structural Jornal, 8 (4), 1991. S. 490 – 500.
40. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report fib,bulletin 14, 2001, – 130 s.
41. Kaminska M.E. Badania zelbetowych belek z tasmami CFRP przyklejonymi na ich powierzchniach / M.E. Kaminska, R. Kotynia // XVI konferencja naukowo-techniczna "Beton i prefabrykacja". – Tom 2, – Jadwisin., – 1998. – S. 479 – 484.
42. Kaminska M. E., Ignatowski P.: O ograniczaniu odkształcen betonu sciskanego kompozytami CFRP. Inzynieria i Budownictwo nr, 2003.
43. Concrete Admixture Handbook/ Properties, Science and Technology. V. S. Ramachandran, Noyes Publications, New Jersey, USA, 1984. – 340 p.

44. Optimization Methods for Material Design of Cement-based Composites./ Ed. A.M. Brandt – E&FN Spon, 1998. – 328 p.
45. Lea's Chemistry of cement and concrete, eq. by Peter C. Hewlett, 1998. – 1008 c.
46. Neville A. M. Wlasciwosci betonu, wudanie 4, Krakow, 2000. –874 s.
47. Orchard D. F. Concrete Technology. – London, 1979. – Vol.1,2.-1033
48. Nabil F. Grace, S.B. Singh. Durability Evaluation of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strengthened Concrete Beams: Experimental Study and Design. ACI Structural Journal, January- February, 2005, p 40-53.
49. Cardolin A. Carbon Fibre Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements. Division of Structural Engineering, Department of Civil and Mining Engineering, Lulea University of Technology, Sweden. 2003, p. 194.
50. FRP Repair Materials and Methods. Concrete International, 2005, vol. 27, 1, p. 66.
51. Сазонова О.Ю., Зінчук О.В., Гребенюк О.В. Композиційні матеріали // Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції за участю молодих науковців «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України». - Запоріжжя : ЗНУ, 2023. - С.213-214.