

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**ХМІЛЬ РОМАН ЄВГЕНОВИЧ**



УДК 624.012.45

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТА ЗАЛИШКОВИЙ  
РЕСУРС ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ, ПІДСИЛЕНИХ ЗА ДІЇ  
НАВАНТАЖЕННЯ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Львів – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Бліхарський Зіновій Ярославович**,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
директор Інституту будівництва та інженерних систем.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Савицький Микола Васильович**,  
Державний вищий навчальний заклад  
«Придніпровська державна академія будівництва  
та архітектури», ректор;

доктор технічних наук, професор  
**Ватуля Гліб Леонідович**,  
Український державний університет залізничного  
транспорту, проректор з наукової роботи;

доктор технічних наук, професор  
**Семко Олександр Володимирович**,  
Національний університет «Полтавська політехніка  
ім. Юрія Кондратюка», завідувач кафедри  
архітектури та міського будівництва.

Захист відбудеться «11» травня 2021 р., о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.17 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Карпінського, 6, гол. корпус, ауд. 226.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1 та сайті <https://lpnu.ua/>.

Автореферат розісланий: «7» квітня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 35.052.17



П. Ф. Холод

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Залізобетон справедливо вважається найбільш ефективним композитним матеріалом для зведення несучих конструкцій будівель та споруд. На сьогоднішній день значна кількість таких конструкцій експлуатуються не менше 50...70 років і, як наслідок, дуже часто стають перед нами постає проблема в необхідності їх підсиленні або ремонті, і в переважній більшості випадків підсилення виконують при дії навантаження. Дослідження ефективності використання різних методів підсилення залізобетонних конструкцій є на сьогодні актуальним завданням. Беручи до уваги результати великої кількості досліджень напруженого стану залізобетонних конструкцій, підсиленних різними методами за дії навантаження, можна зробити такий висновок: найефективнішими, з погляду складності влаштування, вартості та впливу на напружений стан конструкції, є методи нарощування перерізу розтягнутого армування, бетону та одночасно армування і бетону.

Проведені раніше дослідження стосуються, в основному, способів, методів та технологій підсилення. Роботи з підсилення і відновлення несучої здатності залізобетонних конструкцій, своєю чергою, потребують удосконалення методик розрахунку, які повинні враховувати передісторію навантаження конструкції та фізичну нелінійність роботи матеріалів. Це можливо вирішити на підставі експериментально-теоретичних досліджень бетону та залізобетону. Оскільки підсилення залізобетонних конструкцій у більшості випадків проводиться за дії навантаження, то під час проектування необхідно повною мірою враховувати напружений стан залізобетонної конструкції, зумовлений постійною наявністю навантаження того чи іншого рівня.

Розрахунок елементів підсиленних конструкцій будівель і споруд сьогодні не повною мірою відображає дійсний напружено-деформований стан конструкції в стадії експлуатації, що призводить до неточності чи помилок під час проектування підсиленних залізобетонних конструкцій. Відсутні чіткі рекомендації з оцінювання залишкової міцності конструктивного елемента. Недостатня кількість досліджень не дає можливості оцінити дійсну несучу здатність вже підсиленого залізобетонного елемента.

Також варто зазначити, що ймовірнісні методи розрахунку будівельних конструкцій привертають все більшу увагу науковців, оскільки дозволяють проводити кількісну оцінку надійності у вигляді показника ймовірності безвідмовної роботи та призначати гарантований рівень їхньої надійності на стадії проектування як нових, так і підсиленних конструкцій.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової проблеми встановлення дійсного напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій, підсиленних за дії навантаження, і має важливе наукове та прикладне значення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертації відповідає напрямку науково-дослідної роботи кафедри будівельних конструкцій та мостів Національного університету «Львівська політехніка» на тему: «Теоретичні та експериментальні дослідження звичайних та попередньо

напружених залізобетонних, металевих, дерев'яних та інших конструкцій будівель, споруд, мостів і фундаментів та методів їх підсилення з врахуванням різних видів армування, бетонування, способів та інтенсивності навантаження, дії агресивного середовища, підвищених температур» (державна реєстрація №0117U007366), а також окремі її дослідження виконували в межах держбюджетних науково-дослідних робіт за темами «Розроблення методів розрахунку залізобетонних конструкцій, підсилених за дії навантаження з експериментальним обґрунтуванням» (державна реєстрація №0113U001359) та «Розроблення методик визначення несучої здатності та деформативності залізобетонних конструкцій зміцнених новітніми матеріалами за дії навантаження» (державна реєстрація №0115U000436).

**Метою роботи** є вирішення наукової проблеми встановлення дійсного напружено-деформованого стану залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних конструкцій, підсилених за дії навантаження і створення розрахункових методик для проєктування та оцінювання надійності та залишкового ресурсу таких конструкцій.

Досягнення поставленої мети передбачає реалізацію таких **основних завдань дослідження**:

- на основі аналізу літературних джерел скласти програму експериментально-теоретичних досліджень напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій, підсилених під дією навантаження;
- розробити методик експериментальних і теоретичних досліджень залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних елементів, підсилених нарощуванням перетину арматури, одночасно арматури і бетону, за одночасної дії навантаження різного рівня;
- провести експериментальні дослідження арматурних стержнів, залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних елементів, підсилених за одночасної дії навантаження диференційованого рівня;
- дослідити результати експериментальних досліджень арматурних стержнів та сумісної роботи бетону існуючої конструкції й бетону додаткового перерізу підсилених залізобетонних конструкцій, виконаних під навантаженням,
- дослідити результати експериментальних досліджень залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних елементів, підсилених за різних рівнів навантаження;
- запропонувати й апробувати методик розрахунку залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних елементів, підсилених нарощуванням перетину арматури, одночасно арматури й бетону під навантаженням на основі існуючих в літературі та нормативних документів на проєктування підходів (силової та деформаційної моделі розрахунку);
- провести верифікацію методом скінчених елементів (МСЕ), запропонованих підходів до розрахунку, запропонувати алгоритм побудови геометричної, фізичної моделі та моделі прикладання навантаження до підсилених залізобетонних конструкцій, які б відображали дійсні умови їх експлуатації та підсилення;

- розробити та апробувати принципові підходи до оцінки показників надійності (індексу надійності  $\beta$  та ймовірності безвідмовної роботи  $P(\beta)$ ) непошкоджених прямокутних залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних елементів, підсилених за дії навантаження;
- використовуючи показники надійності, спрогнозувати залишковий ресурс залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних елементів, підсилених за дії навантаження.

**Об’єкт дослідження** – підсилення залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних конструкцій в умовах експлуатації, їхня поведінка під навантаженням.

**Предмет дослідження** – напружено-деформований стан, показники надійності та залишковий ресурс непошкоджених залізобетонних згинаних і стиснуто-згинаних конструкцій, підсилених нарощуванням перетину арматури, одночасно арматури і бетону під навантаженням.

**Методи дослідження:** вивчення та аналіз експериментально-теоретичних досліджень, що наведені в літературних джерелах, експериментальні випробовування залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних конструкцій із застосуванням лабораторного обладнання та пристроїв для влаштування підсилення за одночасної дії навантаження. Для проведення теоретичних досліджень використано силову та нелінійну деформаційну модель розрахунку залізобетонних конструкцій за граничними станами, а також метод скінченних елементів, реалізований у прикладних програмних комплексах для верифікації пропонованих теоретичних підходів. Під час розроблення принципових методик оцінки показників надійності досліджуваних конструкцій після підсилення використано методи теорії надійності, теорії ймовірностей і математичної статистики..

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому, що **вперше:**

- отримано нові дані щодо напружено-деформованого стану залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних конструкцій, що підсилюються способом нарощуванням перетину арматури, одночасно арматури і бетону під навантаженням в дійсних умовах експлуатації;
- експериментально-теоретичним шляхом визначено значення коефіцієнтів умов роботи додаткової арматури  $\gamma_s^{ad,exp}$  і бетону  $\gamma_c^{ad,exp}$  залізобетонних конструкцій, підсилених за дії навантаження, які значно відрізняються від величин, рекомендованих нормами проектування ДСТУ Б В.3.1-2:2016;
- встановлені закономірності між коефіцієнтами умов роботи додаткової арматури  $\gamma_s^{ad}$  і бетону  $\gamma_c^{ad}$  та величиною навантаження, за якого виконують підсилення, що дозволяє на стадії проектування проводити корегування кількості додаткового армування, бетону для підвищення їхніх коефіцієнтів умов роботи та, як наслідок, ефективності використання матеріалів підсилення.

**Набули подальшого розвитку та вдосконалені:**

- методики розрахунку залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних елементів, підсилених нарощуванням перетину арматури, одночасно арматури і бетону під навантаженням із використанням двох альтернативних моделей (силової та деформаційної моделі розрахунку),

при цьому передбачено врахування діючого на конструкцію навантаження в момент підсилення;

- критерій вичерпання несучої здатності комплексного перерізу підсиленої залізобетонної конструкції, якому відповідає момент досягнення напружень межі текучості в арматурі основного і додаткового перерізів, що підвищує ефективність використання матеріалів підсилення;
- алгоритм побудови геометричної, фізичної кінцево-елементної моделі та моделі прикладання навантаження до залізобетонних конструкцій, підсилених під навантаженням у прикладних програмних комплексах, що використовують МСЕ;
- принципова методика визначення індексів надійності (дальності відмови)  $\beta$  та ймовірності безвідмовної роботи  $P(\beta)$  для згинаних та стиснуто-згинаних конструкцій, що підсилюються за дії навантаження. При цьому рівень діючого на час підсилення навантаження розглядається як додаткова, до загально прийнятих у теорії оцінювання надійності залізобетону, випадкова величина;
- прогнозування залишкового ресурсу залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних елементів, підсилених за дії навантаження, використовуючи їхні показники надійності, що дозволяє визначити термін експлуатації підсилених конструкцій.

**Достовірність отриманих наукових результатів** забезпечується використанням стандартних методів досліджень будівельних конструкцій, задовільною збіжністю теоретичних та експериментальних результатів, верифікацією методом скінчених елементів запропонованих підходів до розрахунку, а також застосуванням методів теорії надійності, теорії ймовірностей і математичної статистики.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в можливості їх використання у проектуванні залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних конструкцій, підсилених способом нарощування перетину арматури, одночасно арматури і бетону за дії навантаження, і при цьому оцінювання дійсного напружено-деформованого стану підсилених конструкцій, що дозволить підвищити ефективність використання матеріалів підсилення під час розроблення проектного рішення.

Розроблені принципові методики оцінки надійності під час проектування та реконструкції залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних елементів, підсилених різними методами за дії навантаження дають можливість з достатньо високою точністю оцінювати ймовірність їхньої безвідмовної роботи. За результатами такої оцінки стає можливим проектування підсилення залізобетонної конструкції з заданим наперед рівнем надійності, прогнозування їхнього залишкового ресурсу та забезпечення при цьому більшої економічності та ефективності прийнятих конструктивних рішень з підсилення.

Результати виконаних експериментально-теоретичних досліджень за участю автора застосовані на будівлях та спорудах ТОВ «Карпатнафтохім» (м. Калуш), ТзОВ «Марконі» (м. Львів) під час виконання робіт із встановлення дійсного технічного стану, оцінки необхідності їхнього підсилення та під час

розроблення конструктивних рішень підсилення залізобетонних конструкцій значної кількості об'єктів (2006–2020 рр). Також результати роботи застосовані в ТОВ «Інститут проектування «Комфортбуд» та проектно-інжиніринговій компанії ТОВ «Сіменерго» під час розробки проектів реконструкції будівель громадського та виробничого призначення. Ефективність впровадження результатів досліджень підтверджена довідками й актами про їх використання.

Окремі матеріали дисертаційних досліджень використовуються у навчальному процесі в Національному університеті «Львівська політехніка» при підготовці бакалаврів та магістрів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» спеціалізації «Промислове та цивільне будівництво», а також були частиною виконання держбюджетних НДР, що виконувалися в Національному університеті «Львівська політехніка» у 2013–2016 рр.

**Особистий внесок здобувача** полягає у розробці методології, організації виконання програми та безпосередній участі разом із співавторами в експериментально-теоретичних дослідженнях, узагальненому аналізі результатів експериментально-теоретичних досліджень, формуванні базових принципів розрахунку параметрів НДС підсилених конструкцій, оцінці надійності та залишкового ресурсу залізобетонних елементів, підсилених за дії навантаження. Ця дисертаційна робота виконана за ініціативою автора. З тематики сформованого наукового напрямку за участі та керівництва автора виконані кандидатські дисертації Римара Я. В. та аспірантів Дубіжанського Д. І., Бліхарського Я. З., Країнського П. І., Титаренка Р. Ю. Участь автора в спільних публікаціях відображена у списку опублікованих праць.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи були представлені та обговорювалися на таких науково-технічних конференціях: «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (м. Рівне, 2006, 2008 р., 2011 р., 2013 р., 2014 р., 2018 р.), міжнародній науковій конференції «Актуальні проблеми будівництва та інженерії довкілля» (Львів–Кошице–Жешув, 2007 р., 2011 р., 2013 р., 2015 р., 2017 р., 2019 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології і методи розрахунків у будівництві» (м. Луцьк, 2009 р.), міжнародній конференції молодих вчених ГАС «Геодезія, архітектура та будівництво» (м. Львів, 2009 р., 2010 р., 2011 р., 2016 р.); конференції «Структурообразование, прочность и механика разрушения композиционных строительных материалов и конструкций» (м. Одеса, 2012 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Інноваційні технології в будівництві» (м. Вінниця, 2012 р.); всеукраїнській заочній науково-практичній конференції «Науково-практичні засади будівельного виробництва в Україні: плани, прогнози, аналіз та досягнення» (м. Київ, 2014 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Енергоефективні технології в міському будівництві та господарстві» (м. Одеса, 2014 р.); 60 Jubileuszowa konferencja naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB «Krynica-2014». (Lublin–Krynica, Poland, 2014); міжнародній конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (м. Одеса, 2015р., 2017р., 2019р.); Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna «Współczesne Problemy Budownictwa – Teoria i Praktyka» (Częstochowa, Poland,

2015); II міжнародній науково-практичній виставці-конференції молодих учених та студентів «Інновації у будівництві» (м. Луцьк, 2016 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво» (м. Одеса, 2016р.); міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 2017 р., 2018 р., 2019 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села» (м. Дубляни, 2018 р.), II науково-практичній конференції «Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції» (м. Київ, 2018 р.); 3rd Scientific Conference Environmental Challenges in Civil Engineering (Opole, Poland, 2018); 12th International Conference Quality Production Improvement (Zaborze - Myszków, Poland, 2018); VII міжнародній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (м. Одеса, 2020 р.), а також на семінарах кафедри «Будівельні конструкції та мости» Національного університету «Львівська політехніка» (2007–2021 рр.).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи та результати досліджень опубліковані у 51 друкованій праці, з них – 24 статті у наукових фахових виданнях України, 15 статей у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз (зокрема, 7 праць у НМБД Scopus), 1 патент на корисну модель, 11 публікацій апробаційного характеру.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, шести розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел зі 408 найменувань та 4 додатків. Робота викладена на 465 сторінках машинописного тексту, у тому числі містить 361 сторінку основного тексту, 43 сторінки списку використаних джерел, 53 таблиці, 96 рисунків та 77 сторінок додатків.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, показано її зв'язок із науковими програмами, сформульовано мету та задачі дослідження, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, а також наведено дані про їх впровадження та рівень апробації.

У **першому розділі** проведено огляд технічної літератури з проблематики досліджень, а саме: представлено існуючі методи підсилення залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних конструкцій, проведено аналіз досліджень напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій, що підсилюються, методів оцінювання та прогнозування параметрів НДС залізобетонних конструкцій, підсилених у дійсних умовах експлуатації. Крім того, виконано аналіз ймовірнісних методів розрахунку непідсилених та підсилених залізобетонних конструкцій, розглянуто стан питання розрахунку показників надійності елементів після підсилення.

Вивченню роботи залізобетонних конструкцій, зокрема підсилених класичними та сучасними матеріалами, розробці та вдосконаленню принципів розрахунку залізобетонних конструкцій, в тому числі з використанням дійсних



діаграм деформування матеріалів, однорідних та комплексних перерізів присвячено багато робіт, зокрема: Азізова Т. Н., Байкова В. Н., Баби́ча Є. М., Бамбури А. Н., Барашикова А. Я., Барабаш М. С., Бачинського В. Я., Бліхарського З. Я., Бондаренка С. В., Борисюка О. П., Боярчука Б. А., Валового О. І., Ватулі Г. Л., Вахненко П. Ф., Гнідця Б. Г., Голишева А. Б., Городецького О. С., Демчини Б. Г., Дорофєєва В. С., Журавського О. Д., Залєсова А. С., Кваші В. Г., Карпюка В. М., Клименка Є. В., Кривошеєва П. І., Лазовського Д. Н., Лапенка О. І., Мальганова А. І., Мельника І. В., Павлікова А. М., Пецольда Т. М., Савицького М. В., Стороженка Л. І., Теряника В. В., Тура В. В., Фомина С. Л., Хіло Е. Р., Чекановича М. Г., Шагіна А. Л., Шмуклера В. С., Яременка О. Ф., Andrews G., Austin Sal-Saidy A. H., Darby A. P., Julio E., Luckyram J., Reed C. E., Sun H. та інших.

На основі здійсненого аналізу робіт встановлено, що сьогодні виконано значну кількість експериментальних досліджень підсилених згинаних та стиснуто-згинаних конструкцій, проте серед них відносно невелика кількість експериментальних досліджень стосується конструкцій, підсилених за дії навантаження різних рівнів, що, безсумнівно, є недостатнім для всебічного розуміння ефективності способів підсилення в умовах експлуатації залізобетонних конструкцій. Також можна стверджувати, що найбільш економічним та ефективним методом, враховуючи конструктивно-технологічні вимоги, є метод підсилення залізобетонних конструкцій нарощуванням їх перетину бетоном, арматурою або одночасно бетоном і арматурою.

Розвиток методів оцінки надійності будівельних конструкцій різних видів, упровадження ймовірнісних підходів до їх розрахунку в практику проектування відображено у працях Болотіна В. В., Карпюка В. М., Кінаша Р. І., Кічаєвої О. В., Клименка Є. В., Кущенко В. М., Лантуха-Лященко А. І., Пашинського В. А., Перельмутера А. В., Пічугіна С. Ф., Пошивача В. Г., Райзера В. Д., Ржаніцина А. Р., Савицького М. В., Семка О. В., Усаковського С. Б., Хоціалова Н. Ф., Шимановського О. В., Шмуклера В. С., Шпете Г. та інших.

До сьогодні не розроблено єдиної методики оцінки НДС підсилених залізобетонних елементів. Існуючі методи розрахунку параметрів НДС підсилених конструкцій, що перебувають під навантаженням, не враховують або враховують лише приблизно напружений стан до підсилення, що не дає змоги визначати реальний резерв міцності підсилених залізобетонних елементів. Із введенням у дію нормативних документів з проектування залізобетонних конструкцій на базі деформаційної моделі розрахунку питання розробки та апробації деформаційної методики до розрахунку підсилених залізобетонних конструкцій, особливо підсилених під навантаженням, набуває особливої актуальності. Також в національних нормах, що регулюють принципи забезпечення надійності конструкцій, відсутні підходи до оцінки надійності елементів, які знаходяться в експлуатації та потребують підсилення, а визначення дійсних показників надійності конструкцій, підсилених за дії навантаження, можуть дати змогу спрогнозувати їхній залишковий ресурс. На основі проведеного аналізу літературних джерел було визначено мету та сформувано основні завдання досліджень.

У другому розділі наведено комплексну програму й методики проведення експериментальних досліджень згинаних та стиснуто-згинаних залізобетонних конструкцій, підсилених найпоширенішими способами, а саме нарощуванням армування та одночасно армування і бетону (обоймою) за одночасної дії навантаження (рис. 1).

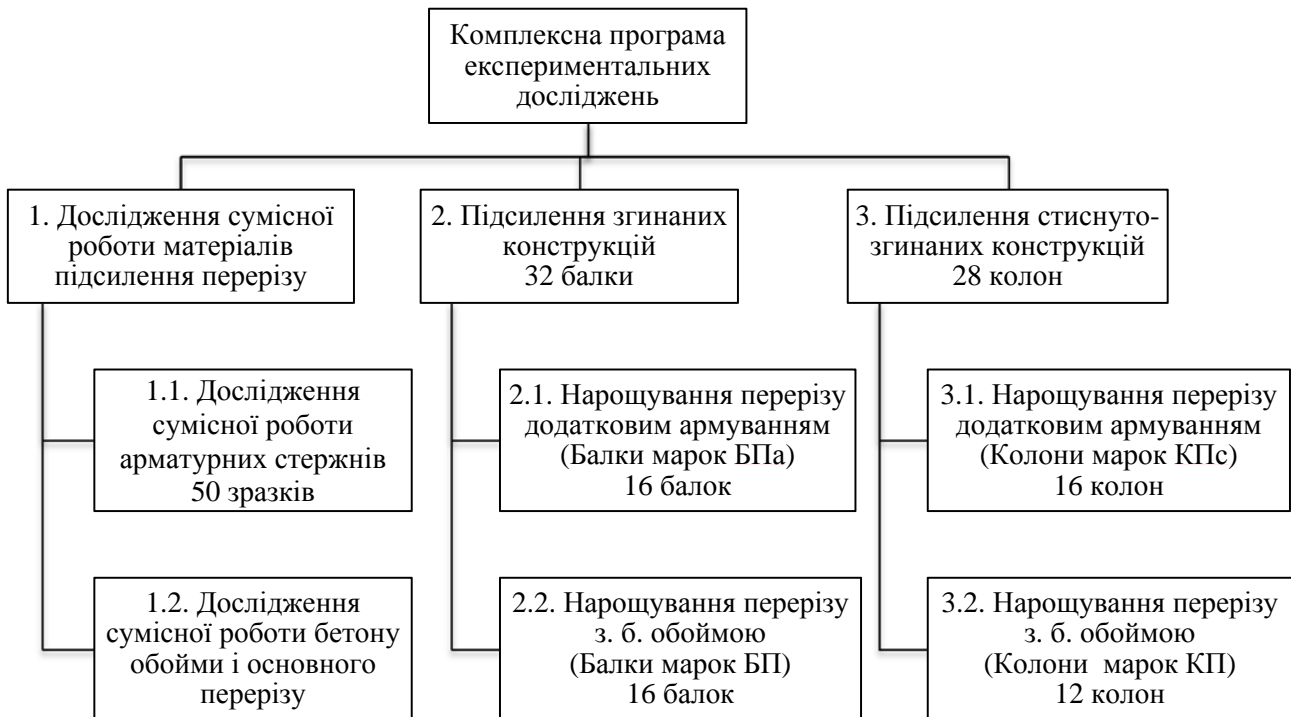


Рис. 1. Прийнята комплексна програма експериментальних досліджень залізобетонних конструкцій

Програмою передбачено експериментальні дослідження 32 великорозмірних моделей згинаних елементів з розмірами поперечного перерізу до підсилення 100×200 мм та довжиною 2100 мм і 28 великорозмірних моделей стиснуто-згинаних елементів із розмірами поперечного перерізу до підсилення 140×180 мм та довжиною 2200 мм. Загалом експериментальні випробування проведені на 60 великорозмірних моделях залізобетонних елементів, з них 44 моделі підсилені за дії навантаження, 8 референсних моделей підсилені без дії навантаження та 8 непідсилені контрольних моделей. Складовою частиною програми експериментальних досліджень було дослідження поєднаних зварюванням арматурних стержнів (50 зразків), виконаних під навантаженням та дослідження сумісної роботи бетону існуючого і додаткового перерізів підсилені залізобетонних конструкцій.

Усі випробування залізобетонних елементів у межах окремої програми (марок БП, КП, БПа, КПс на рис. 1) склалися з випробування непідсилені контрольних зразків на дію короточасного навантаження до руйнування ( $M_{u0}^{exp}$ ) та подальшого випробування елементів підсилені за дії навантаження при різних рівнях навантаження: 0,0, 0,3, 0,5, 0,7 і 0,9 від  $M_{u0}^{exp}$ .

Конструкцію експериментальних балок та загальний вигляд стенду для випробування двома зосередженими силами, прикладеними до верхньої грані в

третинах прольоту, наведено на рис. 2. У процесі навантаження фіксували прогини та деформації бетону й арматури, а також проводили контроль за моментом утворення тріщин і їхнім розвитком.

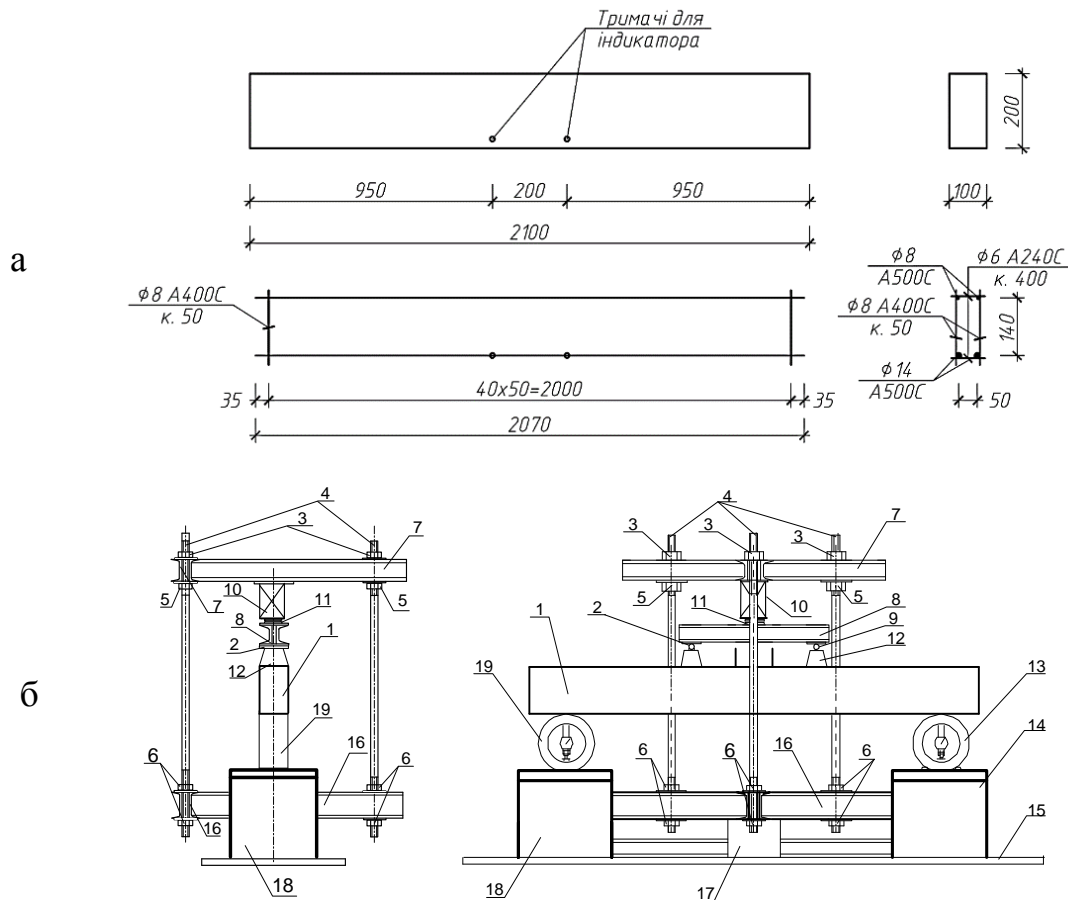


Рис. 2. Конструкція експериментальних балок (а) та загальний вигляд стану (б)

Підсилення залізобетонних балок шляхом влаштування залізобетонної обойми (підпрограма 2.2. на рис. 1). Проектні розміри обойми та загальний вигляд у процесі підсилення під навантаженням наведено на рис. 3. Довжина обойми становила 1600 мм, додатковий арматурний каркас обойми підсилення розташовували в нижній частині обойми. Змінними параметрами обойми прийнято було армування обойми в розтягненій зоні ( $2\text{Ø}8$ ,  $2\text{Ø}10$ ,  $2\text{Ø}12$ ), а також рівень діючого навантаження конструкції за підсилення ( $0,0$ ,  $0,3$ ,  $0,5$ ,  $0,7$ ,  $0,9 M_{u0}^{exp}$ ). Фізико-механічні характеристики матеріалів дослідних колон наведено у табл. 1.

Таблиця 1

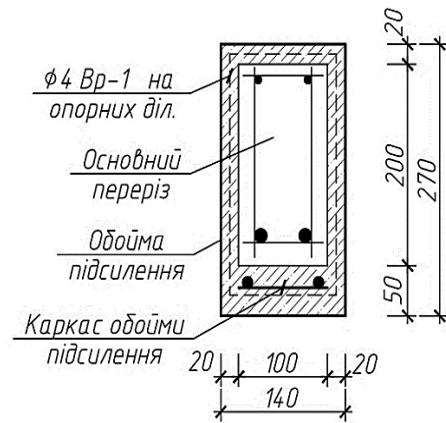
**Фізико-механічні характеристики матеріалів балок, підсилених залізобетонною обоймою**

Основний переріз					Додатковий переріз				
Арматура			Бетон		Арматура			Бетон	
$f_y$ , МПа	$f_u$ , МПа	$E_s$ , ГПа	$f_{cm}$ , МПа	$E_c$ , ГПа	$f_y^{ad}$ , МПа	$f_u^{ad}$ , МПа	$E_s^{ad}$ , ГПа	$f_{cm}^{ad}$ , МПа	$E_c^{ad}$ , ГПа
532	630	190	27,5	29,4	480	555	210	28,3-40,5	27,2-34,6

Підсилення залізобетонних балок нарощуванням армування (підпрограма 2.1. на рис. 1). Проектні розміри перерізу та загальний вигляд у процесі підсилення під навантаженням наведено на рис. 3. Ділянка підсилення становила 1200 мм. Додаткові арматурні стержні ( $2\varnothing 10$ ) приєднували за допомогою зварювання до основної арматури через коротиші (серія 2) та без них (серія 3). Додатково змінним параметром при випробуванні був рівень діючого навантаження конструкції при підсиленні ( $0,0, 0,3, 0,5, 0,75 M_{u0}^{exp}$ ). Підсилені балки випробовували короточасним навантаженням до руйнування.



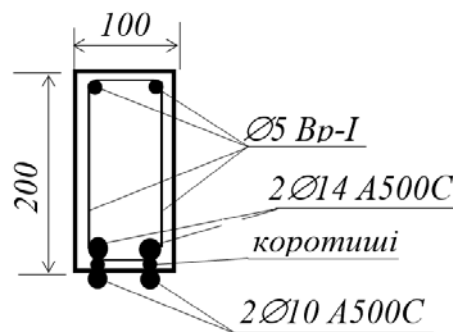
а



б



в



г

Рис. 3. Загальний вигляд балок у процесі підсилення обоймою (а) та додатковим армуванням (в); конструкція перерізу балок після підсилення обоймою (б) та додатковим армуванням (г)

Фізико-механічні характеристики матеріалів балок, підсиленних нарощуванням армування, значення:

- бетон:  $f_{cm} = 41$  МПа;  $E_c = 38,2$  ГПа;
- основне армування  $2\varnothing 14$  А500С:  $f_y = 460$  МПа;  $f_u = 602$  МПа,  $E_s = 206$  ГПа.
- додаткове армування (арматура стержнева):  $2\varnothing 10$  А500С:  $f_y = 590$  МПа;  $f_u = 705$  МПа,  $E_s = 190$  ГПа.

Як відомо, робоча арматура в балці за згину з певним наближенням приймається такою, що працює на центральний розтяг. Отже, роботу арматури за підсилення згинального елемента під навантаженням можна промоделювати,

розтягнувши робочу арматуру до певного напруження, зупинити процес розтягу, приварити до неї додаткову арматуру підсилення і продовжити розтяг до руйнування зразка.

Отже, для ширшого дослідження роботи арматурних стержнів були передбачені експериментальні випробування серії дослідних арматурних зразків у вигляді поєднання під навантаженням основної робочої арматури та арматурних стержнів підсилення (підпрограма 1.1 на рис. 1). Як робочу арматуру було прийнято арматуру  $\varnothing 14$  A500С, аналогічно, як у дослідних балках. Як додаткову арматуру підсилення використовували стержні діаметрами  $\varnothing 8$ ,  $\varnothing 10$ ,  $\varnothing 12$ ,  $\varnothing 14$  і  $\varnothing 16$  мм A500С (рис. 4).

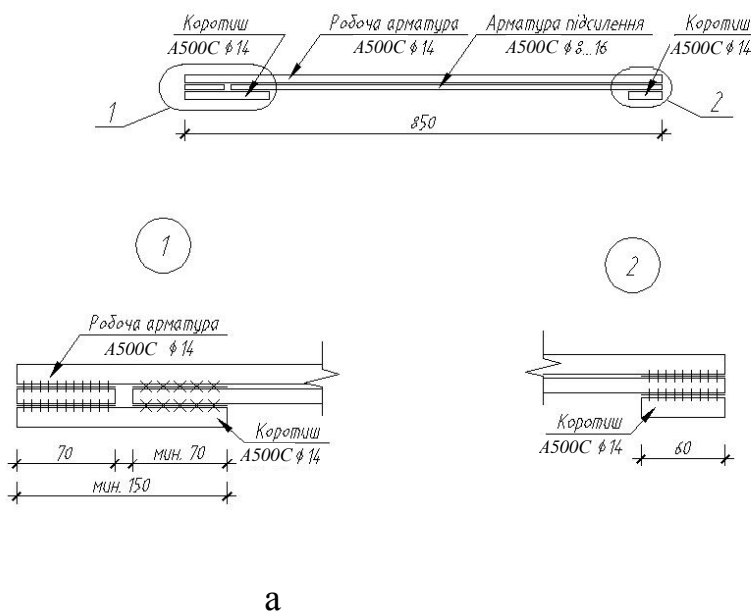


Рис. 4. Методика випробування зразків арматурних стержнів: конструкція арматурного зразка (а); зразки під час випробувань (б)

Випробовування проводили з приварюванням додаткової арматури підсилення за рівня напружень в основній арматурі відповідно 0,3; 0,5; 0,8; 0,9 від  $f_y$  (текучість основної робочої арматури  $\varnothing 14$ ). Для кожного виду випробування було виготовлено по два зразки-близнюки. В загальній кількості за цією методикою було виготовлено 50 арматурних зразків.

Фізико-механічні характеристики зразків арматури значення:

- арматура 2 $\varnothing 8$ :  $f_y = 566$  МПа;  $f_u = 670$  МПа,  $E_s = 200$  ГПа;
- арматура 2 $\varnothing 10$ :  $f_y = 695$  МПа;  $f_u = 774$  МПа,  $E_s = 200$  ГПа.
- арматура 2 $\varnothing 12$ :  $f_y = 668$  МПа;  $f_u = 737$  МПа,  $E_s = 200$  ГПа.
- арматура 2 $\varnothing 14$ :  $f_y = 535$  МПа;  $f_u = 634$  МПа,  $E_s = 200$  ГПа.
- арматура 2 $\varnothing 16$ :  $f_y = 554$  МПа;  $f_u = 668$  МПа,  $E_s = 200$  ГПа.

Підсилення залізобетонних колон нарощуванням армування (підпрограма 3.1. на рис. 1). Конструкцію експериментальних колон та загальний вигляд стенду для їх випробування у горизонтальному положенні наведено на рис. 5. Навантаження до колон прикладали зосередженою силою, прикладеною з



ексцентриситетом  $e = 150$  мм. За результатами випробування непідсиленних контрольних зразків визначали їх несучу здатність ( $N_{u(K)}$ ). Основне армування колон виконано зі стержевої арматури 4  $\varnothing 14$  A500C.

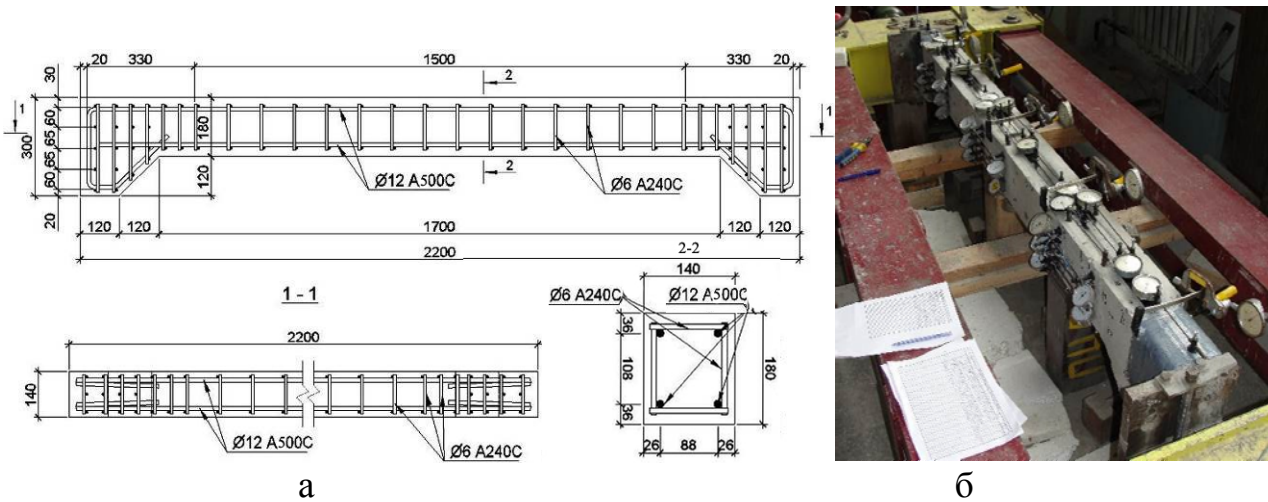


Рис. 5. Конструкція експериментальних колон (а) та загальний вигляд стану (б)

Підсилені зразки зміцнювали стрічкою Sika Carbodur S512 шириною 25 мм та 50 мм, яку наклеювали на розтягнуту грань колони (рис. 6). Для забезпечення анкерування стрічки на консолях колони використано тканину SikaWrap шириною 15 см, яку наклеювали двома шарами у такій послідовності: наносили нижній шар SikaWrap, який покривав бічні грані колони, потім поверх нього наклеювали стрічку Sika Carbodur S512 і далі наносили другий шар тканини. Колони підсилювали при рівнях навантаження 0,0, 0,3, 0,5 та 0,7 від  $N_{u(K)}$  непідсиленних зразків.

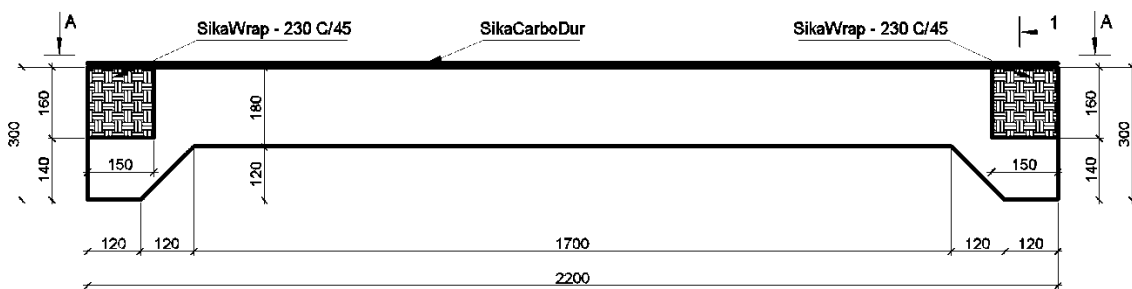


Рис. 6. Схема підсилення експериментальної колони

Фізико-механічні характеристики матеріалів отримані з лабораторних випробувань і відповідають значенням:

- бетон:  $f_{cm} = 33,8$  МПа;  $E_c = 35,1$  ГПа;
- арматура 2 $\varnothing 12$  A500C:  $f_y = 560$  МПа;  $f_u = 645$  МПа,  $E_s = 200$  ГПа.
- додаткове армування (карбонова стрічка): товщина  $t = 1,2$  мм,  $f_f = 2080$  МПа;  $E_f = 160$  ГПа.

Підсилення залізобетонних колон шляхом влаштування залізобетонної обойми (підпрограма 3.2 на рис. 1) виконували на ділянці між консолями колон довжиною 1700 мм. Геометричні розміри перерізу обойми підсилення

призначалися відповідно до конструктивних вимог забезпечення захисного шару арматури та умов бетонування. Армування обойми підсилення приймали симетричним у вигляді 4  $\text{Ø}10$  мм. Конструкція обойми підсилення та схеми випробування підсиленних колон наведені на рис. 7–8. Колони підсилювали при рівнях навантаження 0,0, 0,3, 0,5, 0,7 та 0,9 від  $N_{u(K)}$  непідсиленних зразків. Для уникнення руйнування консольних ділянок під час випробувань було застосовано металеві обойми на консолях, що дозволило не лише підсилити ці ділянки, а й забезпечити надійне включення у роботу арматури обойми підсилення. Фізико-механічні характеристики матеріалів дослідних колон наведено у табл. 2.

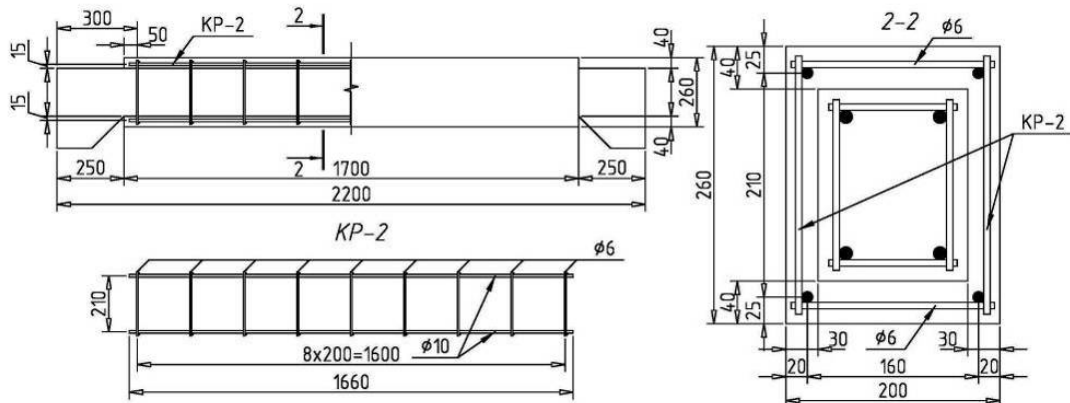


Рис. 7. Опалубне креслення та армування обойми підсилення

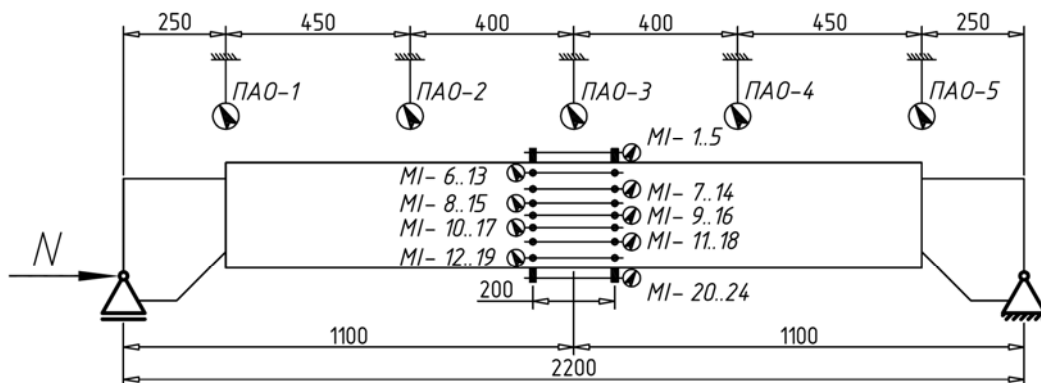


Рис. 8. Схема випробування та розташування приладів на колонах, підсиленних залізобетонною обоймою

Таблиця 2

**Фізико-механічні характеристики матеріалів дослідних колон, підсиленних залізобетонною обоймою**

Арматура колони $\text{Ø} 12$ мм			Арматура обойми $\text{Ø} 10$ мм				Бетон колони та обойми		
$f_y$ (МПа)	$\epsilon_{s0}$	$\epsilon_{ud}$	$E_s$ (ГПа)	$f_y$ (МПа)	$\epsilon_{s0}$	$\epsilon_{ud}$	$E_s$ (ГПа)	$f_{cm}$ (МПа)	Клас
636,9	0,00302	0,048	211	610,7	0,00291	0,070	210	28,3	C25/30

Розроблені методики експериментальних досліджень підсиленних залізобетонних конструкцій дозволили отримати експериментальні дані про

дійсний напружено-деформований стан елементів основного і додаткового перерізів, дослідити вплив рівня попереднього навантаження на параметри НДС підсиленої конструкції.

У **третьому розділі** наведені результати експериментальних досліджень залізобетонних конструкцій. У зв'язку з обмеженням об'єму в авторефераті наведено результати випробувань залізобетонних балок і колон, підсиленних шляхом влаштування залізобетонної обойми, як найбільш складного способу для виконання, і як загальний випадок підсилення залізобетонних конструкцій способами часткового нарощування поперечного перерізу.

*Напружено-деформований стан балок*, підсиленних залізобетонною обоймою при випробуванні на згин умовно можна розділити на три стадії. На першій стадії після влаштування залізобетонної обойми приріст деформації основної арматури значно зменшувався, оскільки в роботу включалась додаткова арматура. При цьому приріст деформацій арматури обойми на кожному етапі випробування був більший, ніж в арматурі балки. Друга стадія починається з досягненням напружень у розтягненій арматурі основного або додаткового перерізу межі текучості, що залежить від рівня діючого навантаження у момент підсилення. Третя стадія – руйнування, при цьому всі стержні розтягнутої арматури як основного, так і додаткового перерізів досягають межі текучості. На цій стадії роботи балки спостерігався стрімкий приріст деформацій стержнів робочої арматури основного і додаткового перерізів, а також значне збільшення прогинів балки, за яким настає роздроблення бетону стисненої зони обойми.

Згинальний момент, за якого відносні деформації в арматурі основного або додаткового перерізів досягали відповідних їм граничних значень  $\varepsilon_{s0}$  або  $\varepsilon_{s0}^{ad}$ , був граничним моментом за текучістю арматури основного ( $M_u^{exp}$ ) або додаткового ( $M_{u,ad}^{exp}$ ) перерізів. Роздроблення бетону стисненої зони бетону обойми експериментальних балок, відбувалося за більшого значення навантаження, що відповідало  $M_f^{exp}$ .

Випробування залізобетонних балок, підсиленних за різних рівнів попереднього навантаження 0,3, 0,5 та 0,7 і 0,9 від граничного  $M_{u0}^{exp}$  з однаковим додатковим армуванням обойми, а саме 2Ø10 А400С дали змогу оцінити вплив величини рівня навантаження на НДС підсиленої конструкції. Під час проведення експериментальних досліджень встановлено, що за підсилення за дії навантаження  $0,5 M_{u0}^{exp}$  текучість в обох шарах арматури настала практично одночасно. За дії навантаження  $0,3 M_{u0}^{exp}$  додаткова арматура обойми першою досягала напружень межі текучості, і навпаки, за більшого попереднього навантаження 0,7 і 0,9  $M_{u0}^{exp}$  першою досягала напружень межі текучості арматура основного перерізу. Усереднений максимальний ефект підсилення становив 1,87 рази і не залежав від рівня діючого при підсиленні навантаження. Вплив рівня навантаження на несучу здатність і ефект підсилення експериментальних балок наведено на рис. 9, а.

Оцінка впливу кількості додаткового поздовжнього армування обойми на несучу здатність балок, підсиленних під навантаженням, виконували під



навантаженням одного рівня ( $0,7 M_{u0}^{exp}$ ) але з різним армуванням обойми, а саме:  $2\emptyset 8$ ,  $2\emptyset 10$ ,  $2\emptyset 12$  А400С. Аналіз результатів показав, що зі збільшенням відсотка армування додаткового перерізу інтенсивність приросту деформацій арматури основного перерізу падала. У підсиленних балках з найменшим додатковим армуванням обойми ( $2\emptyset 8$ ) приріст деформацій основної арматури після включення в роботу елемента підсилення падав на  $\sim 45\%$ , у балках з армуванням обойми ( $2\emptyset 10$ ) зменшення інтенсивності приросту деформацій було зафіксовано на рівні  $\sim 60\%$ , і для балок підсиленних обоймою з найбільшим додатковим армуванням ( $2\emptyset 12$ ) приріст деформацій арматури зменшувався на  $\sim 65\%$ . Зі збільшенням відсотка додаткового армування згинальний момент за текучістю арматури основного перерізу збільшувався. Ефект підсилення при цьому змінювався від 1,28 до 1,70. Ефект підсилення, розрахований за згинальним моментом за текучістю арматури додаткового перерізу, змінювався від 1,58 до 2,07 разу. Вплив кількості додаткового поздовжнього армування обойми наведено на рис. 9, б.

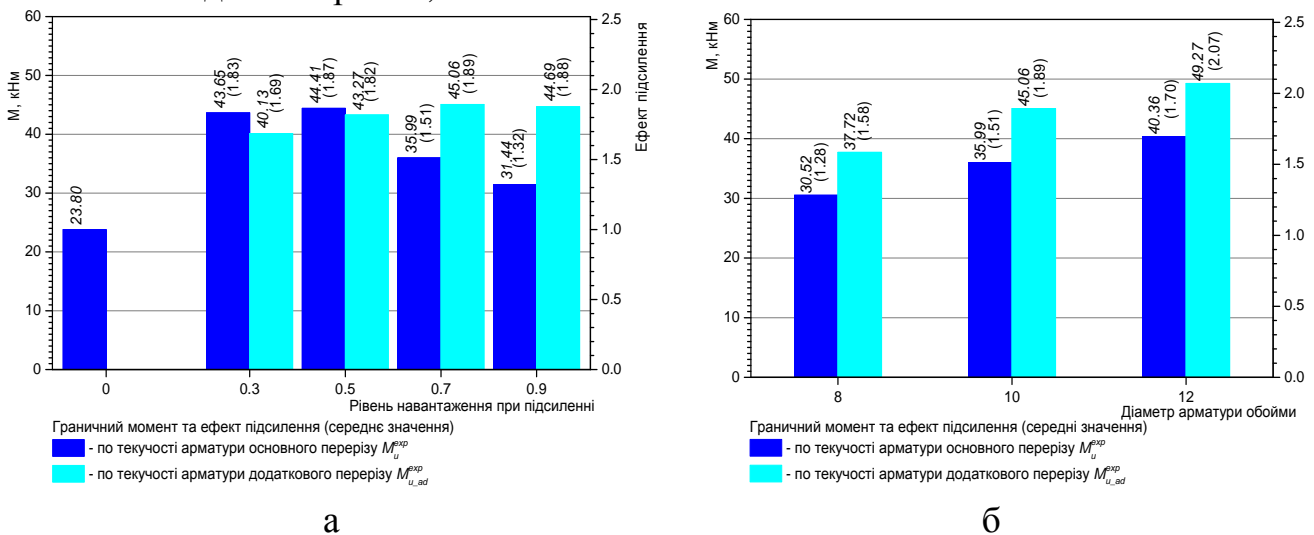


Рис. 9. Несуча здатність експериментальних балок залежно від: впливу рівня попереднього навантаження (а) та кількості додаткового поздовжнього армування обойми (б)

Варто зазначити, що за підсилення навіть при навантаженні граничного рівня цим способом вдалося збільшити згинальний момент за текучістю арматури основного перерізу в 1,32–1,36 разу. Завдяки надійному анкеруванню додаткової арматури в тілі обойми вдалося також довести її до межі текучості, тим самим повністю використати її резерв міцності. При цьому ефект підсилення становив 1,88–2,11 рази.

За результатами досліджень підсиленних балок, отримано графіки залежності деформацій арматури (основної та додаткової), стисненої грані бетону і прогинів від діючого моменту (рис. 10).

Аналіз величин прогинів балок показав, що меншому рівню навантаження за підсилення відповідають менші максимальні значення прогинів підсиленних балок, водночас розкриття тріщин відбувається інтенсивніше. За граничного навантаження  $M = \max(M_u^{exp}, M_{u,ad}^{exp})$  прогини

балок, підсилених за дії навантаження рівня 0,3, 0,5 та 0,7  $M_{u0}^{exp}$  знаходились нижче граничних значень. Зразки, підсилені за 0,9  $M_{u0}^{exp}$ , набувають граничного прогину за  $M=0,89 M_{u,ад}^{exp} = 1,67 M_{u0}^{exp}$ . Ширина розкриття тріщин при цьому в усіх зразків знаходиться у межах 0,2–0,4 мм і відповідає вимогам діючих норм.

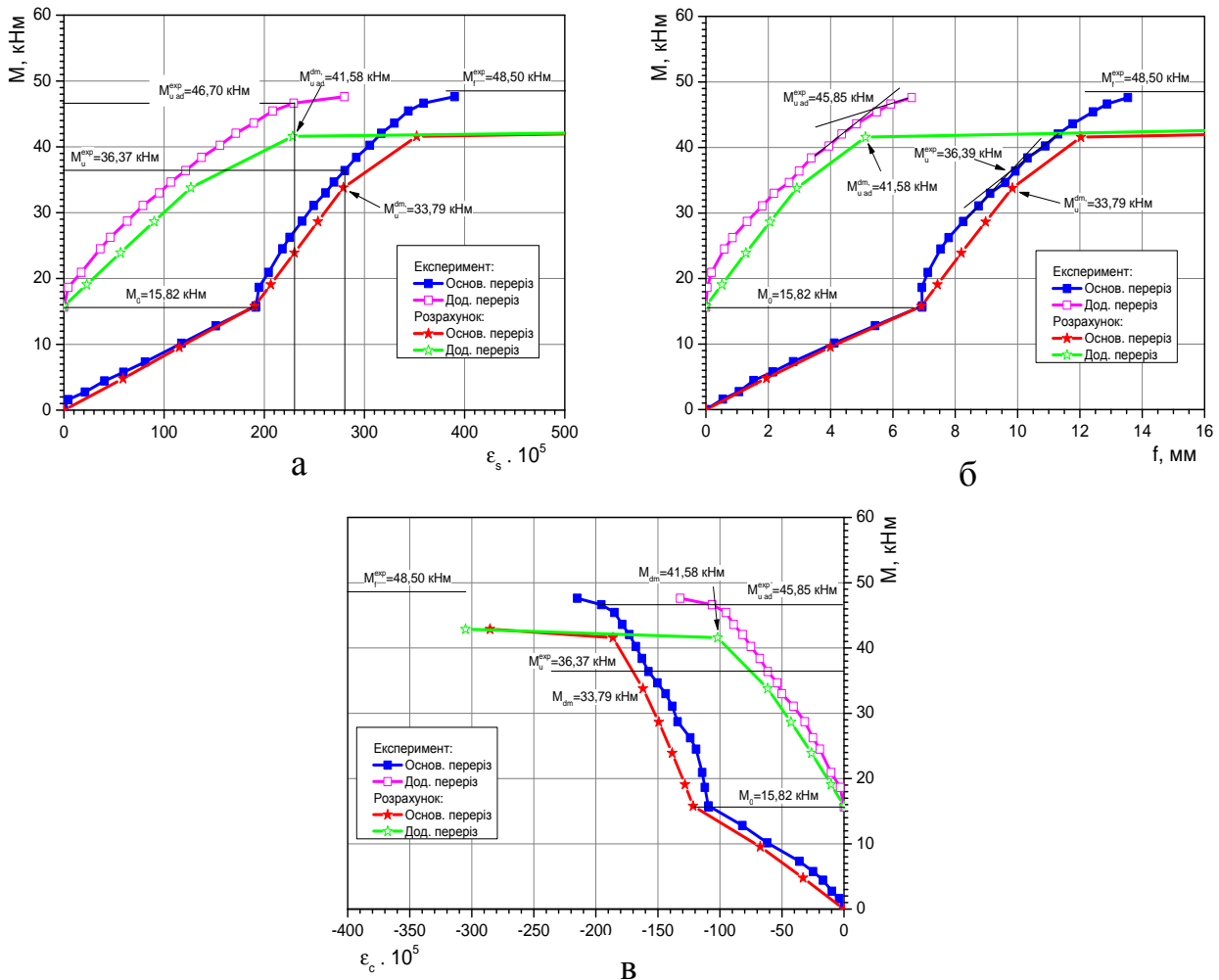


Рис. 10. Характерні графіки деформації арматури (а), прогинів (б), деформації стиснутої грані бетону (в) (на прикладі балки Бп 3,5–0,7)

Дослідження сумісної роботи бетону існуючої балки і бетону підсилення показало, що бетон існуючої балки і бетон підсилення у разі застосування конструкційних заходів деформуються сумісно, відхилення становило до 8,7 %.

*Напружено-деформований стан колон, підсилених залізобетонною обіймою* під час випробування короточасним навантаженням на позакентровий стиск умовно можна розділити теж на три стадії. На першій стадії деформації основної арматури та додаткової арматури менші від граничних значень. Друга стадія починається з досягненням деформацій межі текучості в розтягненій арматурі колони або обійми. При цьому в колонах, підсилених за дії навантаження рівнів 0,0, 0,3 та 0,5  $N_{u(K)}$  спочатку наставала текучість додаткового, а потім основного армування, а в зразків рівнів 0,7 та 0,9  $N_{u(K)}$  – навпаки. Після досягнення в обох шарах розтягнутого армування деформацій текучості наставала третя стадія роботи – руйнування, тобто втрата

рівноваги між зовнішнім навантаженням та внутрішніми зусиллями у перерізі колони. В момент втрати рівноваги колони досягали своєї несучої здатності, після чого спостерігалися значні прирости деформацій та вигину зі зниженням прикладеного навантаження, і відбувалося повне руйнування колон внаслідок роздроблення бетону стисненої зони обойми (рівні 0,0, 0,3, 0,5 та 0,7  $N_{u(K)}$ ) або внаслідок одночасного розриву обох шарів розтягнутого армування та наступного роздроблення бетону стисненої зони обойми (рівень 0,9  $N_{u(K)}$ ).

Максимальне підвищення несучої здатності отримали колони, підсилені без дії навантаження (рівень 0,0  $N_{u(K)}$ ) – ефект підсилення становив 172 %. За наявності навантаження перед підсиленням ефект від підсилення зменшувався, та найменший ефект у 128 % отримали для колони рівня 0,9  $N_{u(K)}$ . Вплив рівня попереднього навантаження на несучу здатність дослідних колон наведено на рис. 11.

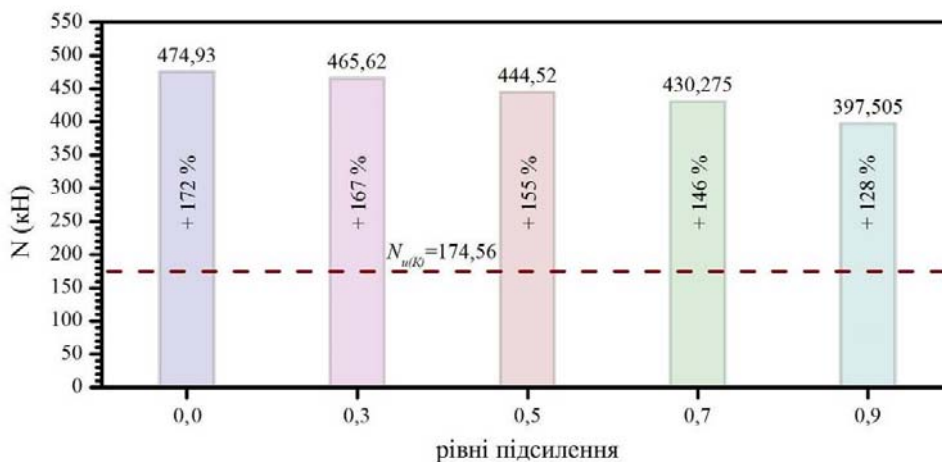


Рис. 11. Вплив рівня попереднього навантаження на несучу здатність експериментальних колон

Як зазначалось вище, вичерпання несучої здатності дослідних колон відбувалося після досягнення деформацій текучості  $\varepsilon_{s0}$  основної арматури та стержнів підсилення. За відомими значеннями відносних деформацій  $\varepsilon_{s0}$ , що відповідають досягненню арматурою напружень текучості  $f_y$ , визначали навантаження, за якого починалася текучість основного та додаткового армування дослідних колон (табл. 3).

Як видно з табл. 3, для колон, підсиленних за низьких рівнів навантаження (0,0, 0,3 та 0,5  $N_{u(K)}$ ) спочатку межі текучості досягає арматура колони, а потім арматура обойми. Для колон, підсиленних за рівнів навантаження 0,7 та 0,9  $N_{u(K)}$  залежність протилежна. Також за даними табл. 3 бачимо, що розбіжність між несучою здатністю та навантаженням за текучості усього розтягнутого армування становить менше 3,6 %. Це підтверджує доцільність досягнення межі текучості обома шарами розтягнутого армування як в колонах, так і в балках, і є допустимою умовою експлуатації підсиленої конструкції на другій стадії НДС.

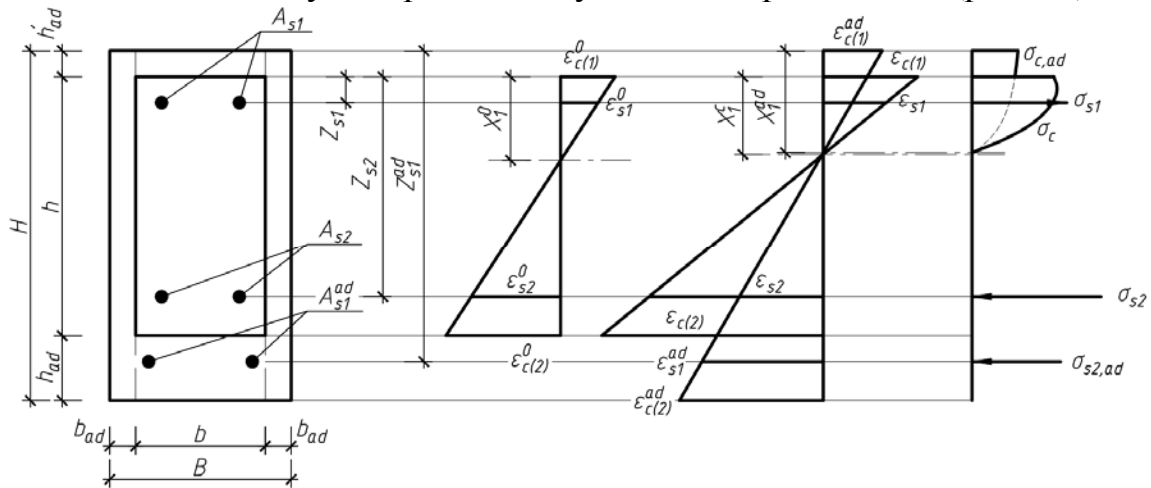
**Експериментальні результати досягнення напружень текучості  
розтягнутого армування дослідних колон**

Колона	Несуча здатність, $N_u$ (кН)	Текучість арматури колони, $N_y$ (кН)		Текучість арматури обойми, $N_{y, add}$ (кН)		$\frac{N_u - \max(N_y; N_{y, add})}{N_u}$
		зразка	середн ε	зразка	середн	
К-01	174,56	169,60	168,21	-	-	3,6 %
К-02		166,82		-		
КП-03-0,0	474,93	480,40	473,94	408,83	410,57	0,2 %
КП-04-0,0		467,47		412,30		
КП-05-0,3	465,62	459,83	458,59	453,41	454,00	1,2 %
КП-06-0,3		457,34		454,58		
КП-07-0,5	442,52	431,49	431,58	427,04	426,74	2,5 %
КП-08-0,5		431,66		426,44		
КП-09-0,7	430,28	358,93	372,28	420,94	428,22	0,5 %
КП-10-0,7		385,63		435,49		
КП-11-0,9	397,51	361,07	341,66	390,27	394,70	0,7 %
КП-12-0,9		322,24		399,13		

У четвертому розділі розроблені методики визначення залишкової несучої здатності підсилених під навантаженням залізобетонних конструкцій за деформаційною та силовою моделлю розрахунку, зважаючи на наявні переваги і недоліки в обох підходах до оцінки напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій. Перевагами силової моделі розрахунку є зрозумілі нескладні рівняння рівноваги сил у розрахунковому перерізі конструкції, а також можливість їх застосування без обчислювальної комп'ютерної техніки. Водночас, недоліком є значна кількість емпіричних залежностей та емпіричних коефіцієнтів умов роботи матеріалів, конструкції, які необхідно враховувати під час розрахунків. Важливою відмінністю розрахунку конструкцій за силовою моделлю згідно з ДСТУ Б В.3.1-2:2016 від деформаційної моделі розрахунку згідно з ДСТУ Б В.2.6-156:2010 є те, що вона дозволяє оцінювати НДС конструкції лише в граничному стані, коли напруження у стиснутому бетоні й розтягнутій арматурі досягають їхніх розрахункових опорів.

Визначення несучої здатності за деформаційною моделлю залізобетонних балок, підсилених за дії навантаження запропоновано виконувати в два етапи. На першому етапі досліджувався напружено-деформований стан нормального перерізу основного елемента від діючого за підсилення навантаження на основі методики розрахунку за ДСТУ Б В.2.6-156:2010. На другому етапі розрахунок проводиться для комплексного перерізу, що складається з основної й додаткової частин конструкції. Переріз розглядається таким, що складається з основного прямокутного обрису з початковим, визначеним на першому етапі напружено-деформованим станом і перерізу обойми коробчастого типу, який в розрахунку представляється у вигляді складеного прямокутного перерізу на

всю висоту, шириною, що дорівнює подвоєній товщині стінки обойми, і приєднаних до неї знизу і згори полиць у межах ширини балки (рис. 12).



а – поперечний переріз      б – епюри деформацій      в – епюра напружень

Рис. 12. Напружено-деформований стан згинального елемента прямокутного перерізу, підсиленого залізобетонною обоймою за дії навантаження

Під час розрахунку параметрів напружено-деформованого стану згинального елемента прямокутного перерізу, підсиленого залізобетонною обоймою під навантаженням можлива реалізація п'яти форм рівнянь рівноваги перерізу, залежно від положення нейтральних осей основного і додаткового елемента після підсилення. Рівняння рівноваги внутрішніх та зовнішніх зусиль у нормальному перерізі згинального залізобетонного елемента, підсиленого залізобетонною обоймою за дії навантаження приймаються у вигляді:

$$\begin{cases} \sum N_c + \sum N_s = 0; \\ \sum M_c + \sum M_s = M_0 + \Delta M; \end{cases} \quad (1)$$

де  $N_c = N_{c,0} + N_{c,ad}$  і  $N_s = N_{s,0} + N_{s,ad}$  – зусилля, що виникають у стисненому бетоні і розтягненій арматурі відповідно в основному і додатковому перерізах;

$M_c = M_{c,0} + M_{c,ad}$  і  $M_s = M_{s,0} + M_{s,ad}$  – моменти від зусиль, що виникають відповідно у стисненому бетоні і розтягненій арматурі відносно осі, що пролягає через нейтральну вісь перерізу в основному і додатковому перерізах;

$\Delta M$  – момент зовнішніх сил від додаткового навантаження після влаштування підсилення.

У блок-схемі на рис. 13 наведено алгоритм визначення несучої здатності залізобетонних балок, підсиленних залізобетонною обоймою за дії навантаження. Цей алгоритм можна застосувати і для окремих випадків підсилення за допомогою нарощування перетину лише арматури чи лише бетону. В такому разі окремі доданки формули (1) будуть рівні нулю.

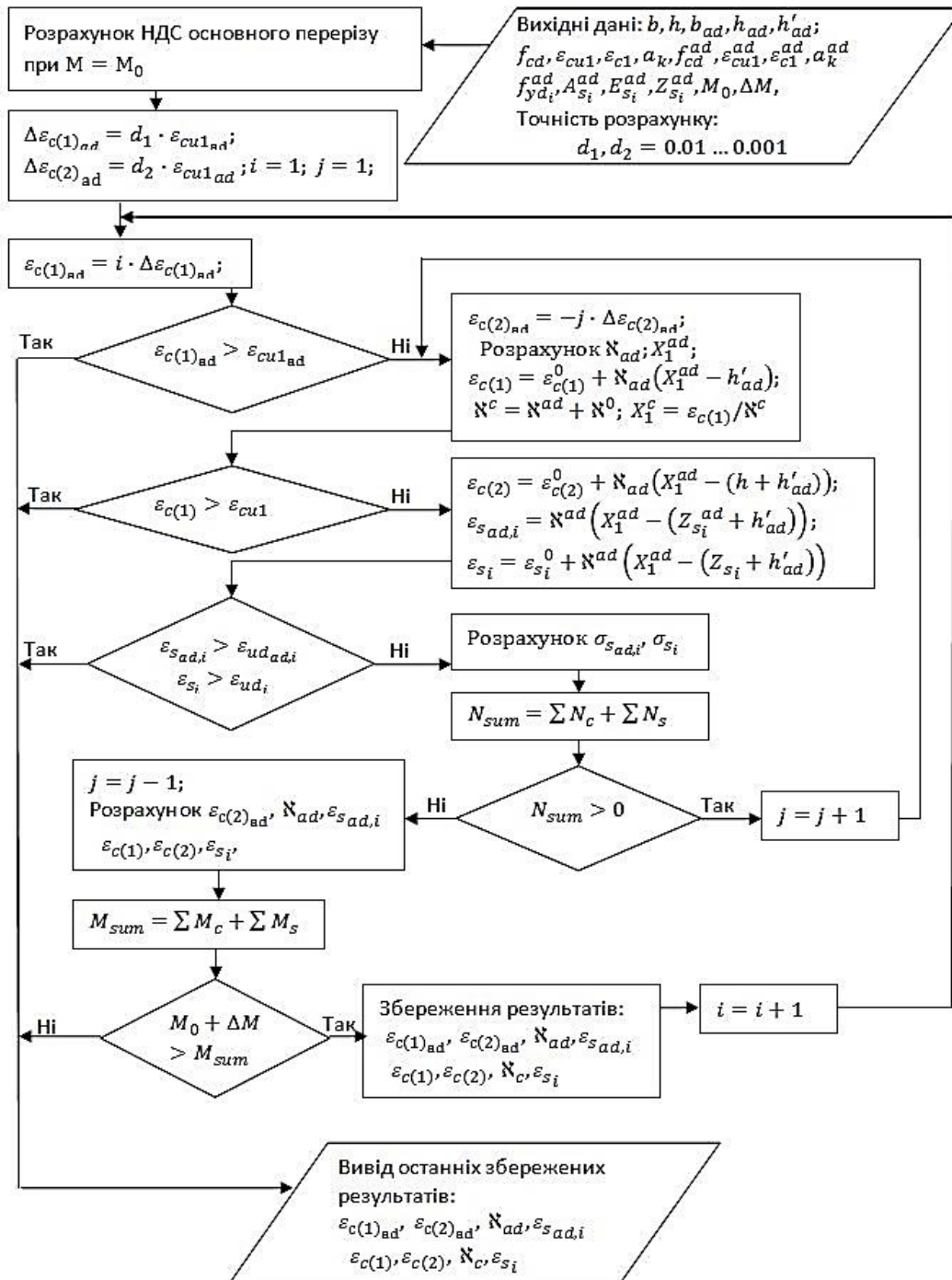


Рис. 13. Блок-схема визначення несучої здатності за деформаційною моделлю балок, підсиленних залізобетонною обоймою за дії навантаження

Визначення несучої здатності за силовою моделлю залізобетонних балок, підсиленних за дії навантаження виконуємо згідно з вимогами ДСТУ Б В.3.1-2:2016 та методикою, наведеною у колишніх нормах проектування залізобетонних конструкцій, що діяли до 2011 р. Ця методика зручна у застосуванні та не потребує ітераційних процесів для розрахунку. Варто зауважити, що згідно з ДСТУ Б В.3.1-2:2016, у разі виконання підсилення під навантаженням, вищим від  $0,65 M_{u0}^{exp}$ , треба вводити додаткові коефіцієнти умов роботи елемента підсилення: на бетон  $\gamma_{br1} = 0,8$  і на арматуру  $\gamma_{sr1} = 0,8$ .

Проте розрахунки із застосуванням цих вказівок показали, що несуча здатність підсилених балок суттєво відрізнялася від експериментальних результатів. Так за низьких рівнів попереднього навантаження 0,3 і 0,5  $M_{u0}^{exp}$  розходження між теоретичними і фактичними величинами становило до 8,6 % у бік заниження теоретичних величин над експериментальними, проте за вищих рівнів навантаження при підсиленні, а саме 0,7 і 0,9  $M_{u0}^{exp}$  розходження між величинами згинальних моментів становило до 35,4 % у бік завищення теоретичних величин над експериментальними, що неприпустимо. Це підтвердило необхідність в уточненні величин коефіцієнтів  $\gamma_{br1}$  і  $\gamma_{sr1}$ .

З цією метою розроблено універсальні аналітичні залежності для визначення теоретичних коефіцієнтів умов роботи  $\gamma_{s,dis}^{ad}$  і  $\gamma_{c,dis}^{ad}$ , яку детально наведено в рукописі дисертації. Для досліджених експериментальних балок вони становили  $\gamma_{c,dis}^{ad}=0,07-0,445$  для бетону та  $\gamma_{s,dis}^{ad}=0,156-1,0$  для армування. Для проведення аналізу запропонованих методик розрахунку досліджені підсилені залізобетонні балки були розраховані згідно із запропонованими алгоритмами, які детальніше описані у дисертації, та проведено їх порівняння з експериментальними даними (табл. 4).

Таблиця 4

**Аналіз запропонованих методик розрахунку експериментальних балок, підсилених залізобетонною обіймою**

Шифр балки	Величина згинальних моментів, кН·м									
	Експеримент		Розрахунок							
	Гранич. по текучості		Силова модель				Деф. модель			
	Основ. арм. $M_u^{exp}$	Додат. арм. $M_{u,ad}^{exp}$	$\gamma_{s,dis}^{ad}$	$\gamma_{c,dis}^{ad}$	Несуча здатність $M_u^2$	Гранич. по текучості	Осн. арм. $M_u^{dm}$	Дод. арм. $M_{u,ad}^{dm}$	$\frac{M_u^2}{M_u^{exp}}$	$\frac{M_u^{dm}}{M_u^{exp}}$
Бп 2.1-0,7	30.81	37.78	0.524	0.209	28.47	29.37	34.54	0.924	0.953	0.914
Бп 2.2-0,7	30.23	37.66	0.542	0.215	29.10	29.66	34.55	0.963	0.981	0.917
Бп 3.1-0,3	44.18	40.17	1.0	0.441	40.07	42.34	39.14	0.907	0.958	0.974
Бп 3.2-0,3	43.11	40.08	1.0	0.445	39.91	42.37	39.09	0.926	0.983	0.975
Бп 3.3-0,5	45.0	43.44	0.836	0.349	36.86	39.27	41.49	0.819	0.873	0.955
Бп 3.4-0,5	43.83	43.11	0.840	0.359	36.53	39.58	41.79	0.834	0.903	0.969
Бп 3.5-0,7	36.37	45.85	0.546	0.248	32.39	33.79	41.58	0.891	0.929	0.907
Бп 3.6-0,7	35.62	44.26	0.495	0.228	31.55	32.93	41.59	0.886	0.924	0.940
Бп 3.7-0,9	31.43	43.66	0.169	0.073	26.44	25.62	40.88	0.841	0.815	0.936
Бп 3.8-0,9	31.45	45.71	0.171	0.077	26.39	25.47	41.10	0.839	0.810	0.899
Бп 4.1-0,7	40.32	49.53	0.503	0.245	34.96	36.89	48.78	0.867	0.915	0.985
Бп 4.2-0,7	40.40	49.01	0.550	0.263	35.78	37.89	48.26	0.886	0.938	0.985
Бп 4.3-0,9	32.56	49.20	0.167	0.077	27.45	26.27	48.13	0.843	0.807	0.978
Бп 4.4-0,9	32.34	51.30	0.156	0.070	27.20	26.21	48.19	0.841	0.810	0.939



Методика розрахунку на основі деформаційної моделі дозволяє за будь-якого значення згинального моменту розрахувати напружено-деформований стан згинального елемента, підсиленого за дії навантаження. Деформації, отримані за цією методикою, дозволяють задовільно визначати моменти текучості обох шарів армування (основного та додаткового), відхилення становить 1,9–19,3 % в бік перевищення експериментальних величин.

Виконані розрахунки за силовою моделлю з урахуванням уточнених коефіцієнтів використання перерізу показують, що теоретичні величини несучої здатності підсиленних балок задовільно узгоджуються з експериментальними даними. Розбіжність за величиною згинального моменту за текучістю арматури основного перерізу становила 3,7–18,1 %.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що запропоновані методики розрахунку дозволяють оцінити НДС підсиленних згинальних елементів із задовільною точністю. Проте важливою перевагою деформаційної моделі розрахунку є те, що вона дає змогу оцінити НДС конструкції за висотою перерізу на всіх стадіях роботи.

*Визначення несучої здатності підсиленних залізобетонних колон* пропонується виконувати за деформаційною моделлю норм проектування ДСТУ Б В.2.6-156:2010, відповідно до яких прийнято і розрахункові передумови. Додатково пропонується такі розрахункові передумови:

- коробчастий переріз обойми підсилення, приводиться до еквівалентного двотаврового перерізу (рис. 14);
- зчеплення між бетоном колони (основний переріз) та бетоном обойми підсилення (додатковий переріз) вважається абсолютно жорстким.

Відповідно до розрахункових передумов можлива реалізація чотирьох форм рівноваги розрахункового перерізу. На рис. 14 наведено розрахункову модель згідно з третьою формою рівноваги, яка відповідала роботі дослідних колон.

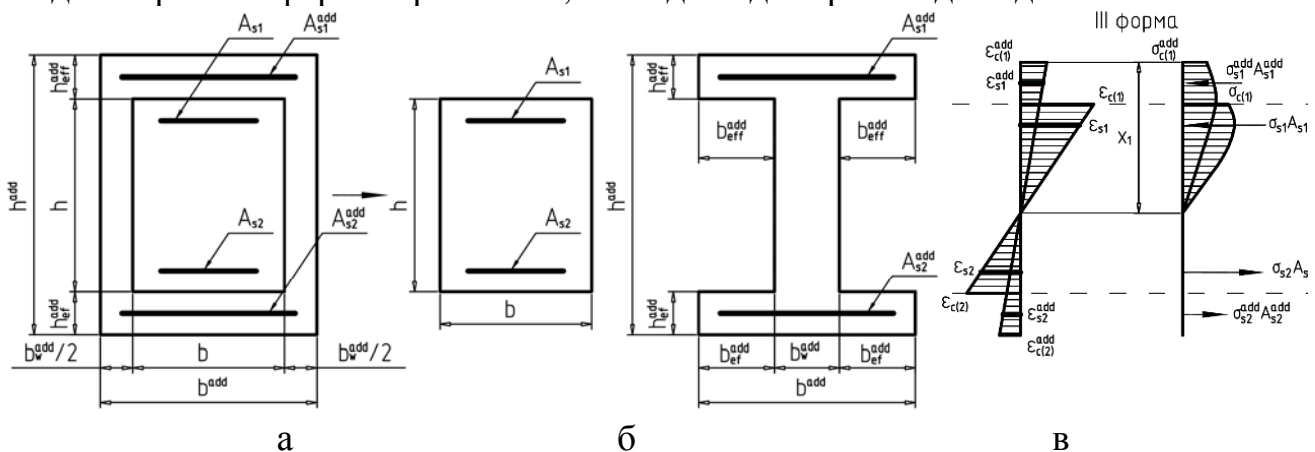


Рис. 14. Прийнята модель поперечного перерізу підсиленої колони: дійсний переріз після підсилення (а); еквівалентний переріз після підсилення (б); розподіл деформацій за висотою перерізу (в)

Алгоритм розрахунку залізобетонних колон, підсиленних залізобетонною обоймою представлено на рис. 15.



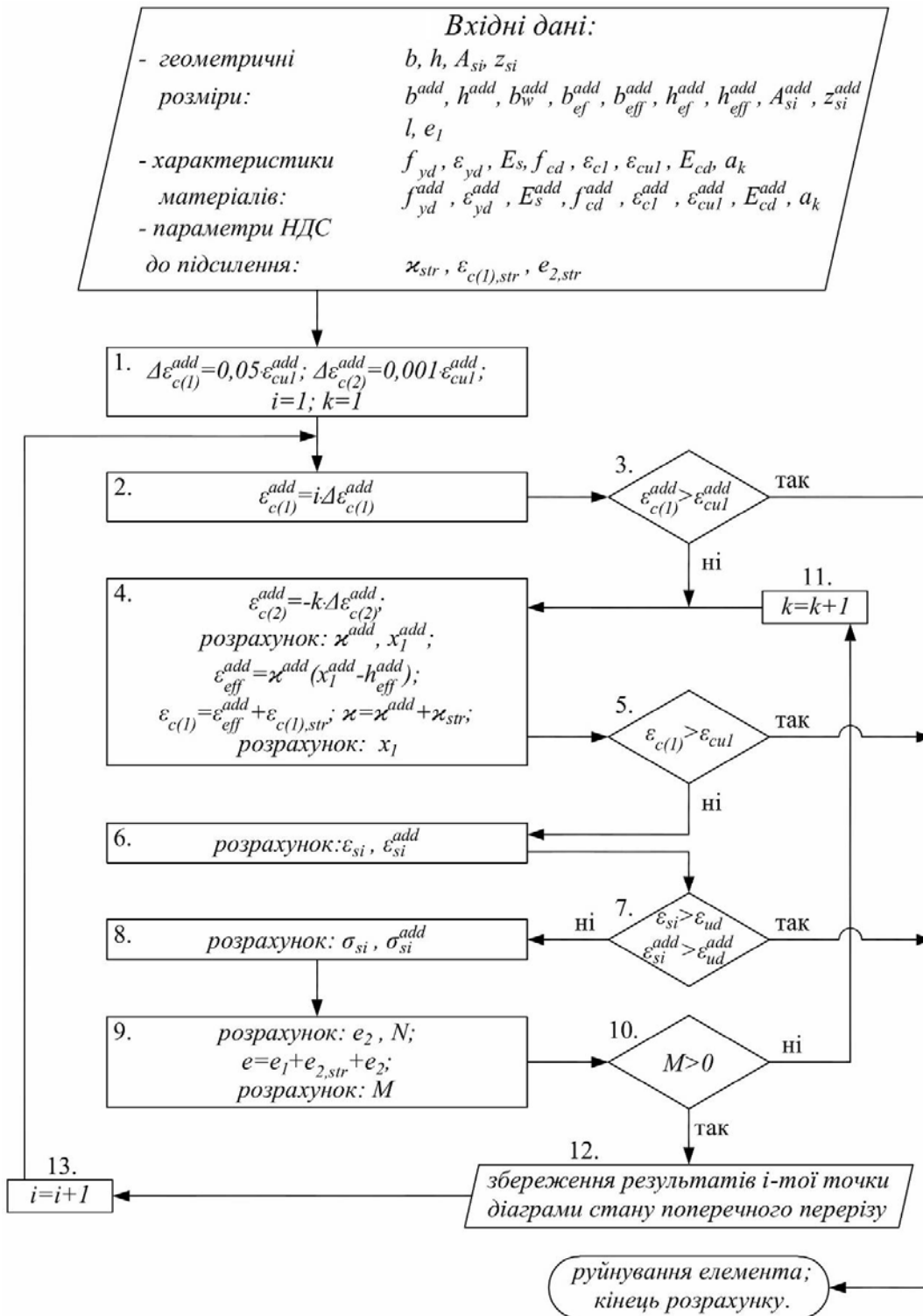


Рис. 15. Алгоритм розрахунку параметрів НДС стиснуто-зігнутих залізобетонних колон, підсилені залізобетонною обіймою

Для того, щоб урахувати напружено-деформований стан колони до моменту підсилення, пропонується у розрахунок підсиленого елемента включити певні додаткові параметри. Цими параметрами є проміжні результати розрахунку непідсиленіх колон, котрі відповідають обраним рівням навантаження перед підсиленням, а саме НДС колони в момент підсилення характеризують такі величини:  $\varkappa_{str}$  – кривизна вигнутої осі елемента в перерізі

на момент підсилення;  $\varepsilon_{c(1),str}$  – деформація крайньої стиснутої фібри бетону колони на момент підсилення;  $e_{2,str}$  – додатковий ексцентриситет прикладання стискувального зусилля від впливів другого порядку.

Відповідно до пункту 4.1.2 ДСТУ Б В.2.6-156:2010, під час розрахунку стиснуто-зігнутих елементів необхідно враховувати впливи другого порядку, тобто вигин конструкції. У представленому алгоритмі розрахунку підсилених стиснуто-зігнутих елементів впливи другого порядку враховано через додаткові ексцентриситети прикладання стискувального зусилля  $e_2$  та  $e_{2,str}$ . Ці ексцентриситети приймаються чисельно рівними значенням вигину колони в момент підсиленням ( $e_{2,str}$ ) та вигину підсиленого елемента ( $e_2$ ).

У ДСТУ Б В.2.6-156:2010 вигин стиснуто-зігнутого елемента визначено за залежністю  $f = \frac{1}{r} k_m l^2$  (де  $\frac{1}{r}$  – кривизна вигнутої осі в перерізі колони,  $k_m$  – коефіцієнт, що залежить від характеру завантаження елемента,  $l$  – приведена довжина колони), при цьому зазначено, що її застосовують у розрахунку статично визначених елементів постійного перерізу, що працюють за балковою схемою. Проте в нормах з проєктування залізобетонних конструкцій Eurocode 2 вказано, що аналогічна формула підходить для визначення вигину стиснуто-зігнутих елементів постійного перерізу (метод номінальної кривизни для врахування впливів другого порядку), при цьому, коефіцієнт  $k_m$  приймається рівним 1/8 у випадку постійної епюри моментів від впливів першого порядку. Отже, залежність у нашому випадку набуде вигляду:

$$f = \frac{1}{8} \kappa l^2 \text{ або } f = \frac{1}{8} \kappa^{add} l^2. \quad (2)$$

Результати визначення несучої здатності дослідних зразків розрахунковим шляхом та порівняння їх з експериментальними величинами наведені у табл. 5.

Таблиця 5

### Розрахункова несуча здатність дослідних колон

Колони	Навантаження перед підсиленням, (кН)		Вичерпання несучої здатності, (кН)		Приріст несучої здатності		$\frac{N_u - N_u^{teor}}{N_u} \times 100\%$
	$N_{str}$	$N_{str}^{teor}$	$N_u$	$N_u^{teor}$	експ.	теор.	
Контрольні	-	-	174,56	161,05			7,7%
Рівень 0,0· $N_u$	0	0	474,93	419,77	172%	152%	11,6%
Рівень 0,3· $N_u$	52,78	48,31	465,62	414,39	167%	149%	11,0%
Рівень 0,5· $N_u$	84,05	80,52	442,52	402,62	154%	142%	9,0%
Рівень 0,7· $N_u$	124,52	112,73	430,28	384,36	146%	130%	10,7%
Рівень 0,9· $N_u$	149,18	144,94	397,51	362,23	128%	117%	8,9%

Так само, як і результати експериментальних досліджень, результати теоретичного розрахунку показують, що максимальне збільшення несучої здатності отримують колони, підсилені без навантаження. Розрахунковий приріст несучої здатності колон рівня 0,0  $N_u$  становить 152 %. Зі збільшенням

рівня навантаження перед підсиленням розрахунковий ефект підсилення зменшується відповідно до 117 % за дії навантаження  $0,9 N_u$ .

Розбіжність між розрахунковою та експериментально визначеною несучою здатністю контрольних колон становить 7,7 %. У випадку підсилених зразків розбіжність між розрахунковою та експериментальною несучою здатністю знаходиться в межах 8,9–11,6 %. Отримана збіжність результатів свідчить про те, що запропонована методика розрахунку дозволяє з достатньою точністю оцінити напружено-деформований стан підсилених стиснуто-зігнутих елементів.

За результатами теоретичних досліджень запропоновано та експериментально підтверджено, що при забезпеченні надійного анкерування арматури додаткового каркасу, сумісної роботи арматури та бетону основного і додаткового перерізів як критерій вичерпання несучої здатності комплексного перерізу доцільно прийняти граничний стан, що відповідає досягненню напружень межі текучості арматури основного і додаткового перерізів.

У **п'ятому розділі** описано моделювання роботи підсилених залізобетонних балок у прикладних програмних комплексах, які розроблені з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Для цього запропоновано алгоритм побудови геометричної, фізичної моделі та моделі прикладання навантаження до підсилених залізобетонних конструкцій, які б відображали дійсні умови їх експлуатації й підсилення.

Метод скінченних елементів є універсальним та найбільш ефективним числовим методом розрахунку. Реалізовані у ньому числові алгоритми дозволяють врахувати всі закономірності поведінки конструкцій під час розрахунку, вони забезпечують задовільну точність під час проектування нових конструкцій. Проте для оцінки параметрів НДС підсилених конструкцій, в нашому випадку залізобетонних елементів, підсилених за дії навантаження, ці алгоритми ще не застосовувалися, і рекомендацій від розробників ПК у літературі чи технічній документації прикладних програмних комплексів не зустрічається.

Саме тому, нами виконано апробацію МСЕ, який реалізований у програмних комплексах «Femap with NX Nastran» та «Міраж 2015» для аналізу НДС досліджених залізобетонних балок, підсилених залізобетонною обіймою під навантаженням. Цей спосіб підсилення, вибраний як найбільш складний у виконанні та як загальний випадок підсилення залізобетонних конструкцій способами нарощування перерізу.

Детальніше наведемо процес моделювання за допомогою ПК Femap with NX Nastran. Важливим етапом для виконання розрахунку за МСЕ є побудова геометрії моделі основного та додаткового перерізів. Оскільки експериментальні зразки мають явно виражені площини симетрії, доцільним є виконати попередньо оптимізаційну задачу: розглядаємо  $\frac{1}{4}$  частину експериментальних зразків, що дозволить зменшити розмір глобальної матриці жорсткості та зменшити кількість скінченних елементів (рис. 16, а). Для моделювання прикладання зосередженої сили до умов, близьких до реальних, було застосовано геометричний об'єкт – поверхню (Surface) яка перерозподіляє

навантаження одразу на декілька вузлів скінченно-елементної моделі (рис. 16, б). Для моделювання підсилення основного перерізу необхідно у певний момент часу під час навантаження моделі включити додатковий переріз у роботу. Для цього використано формульний зв'язок (рис. 16, в), який за своєю фізичною суттю можна розуміти як додатковий безрозмірний елемент, що виникає на певному етапі аналізу моделі. Для розрахунку моделі підсиленої конструкції використаний нелінійний тип аналізу із врахуванням поетапності.

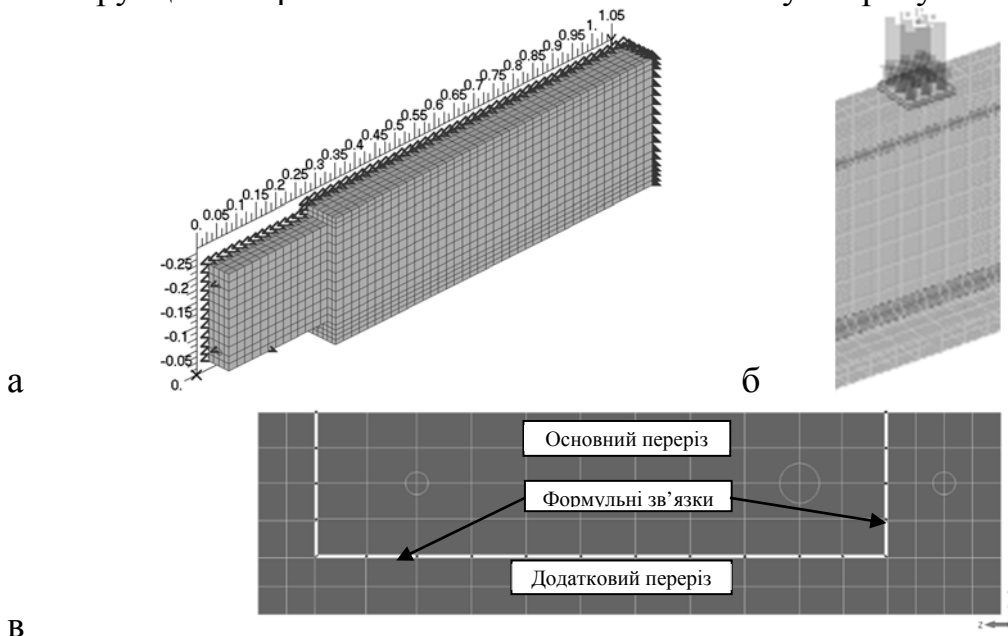


Рис. 16. До розрахунку у Femap with NX Nastran: розрахункова скінченно-елементна модель (а); прикладання до моделі зосередженої сили (б); формульні зв'язки між елементами основного та додаткового перерізів (в)

На рис. 17 представлені результати моделювання залізобетонної балки, на прикладі балки Бп 2.1-0.7, підсиленої за експлуатаційного рівня навантаження  $0,7 M_{u}^{exp}$ . За результатами моделювання балки побудовано графіки залежності деформацій робочої арматури, стисненої грані бетону і прогинів від діючого згинального моменту та виконано їх порівняння з експериментальними даними.

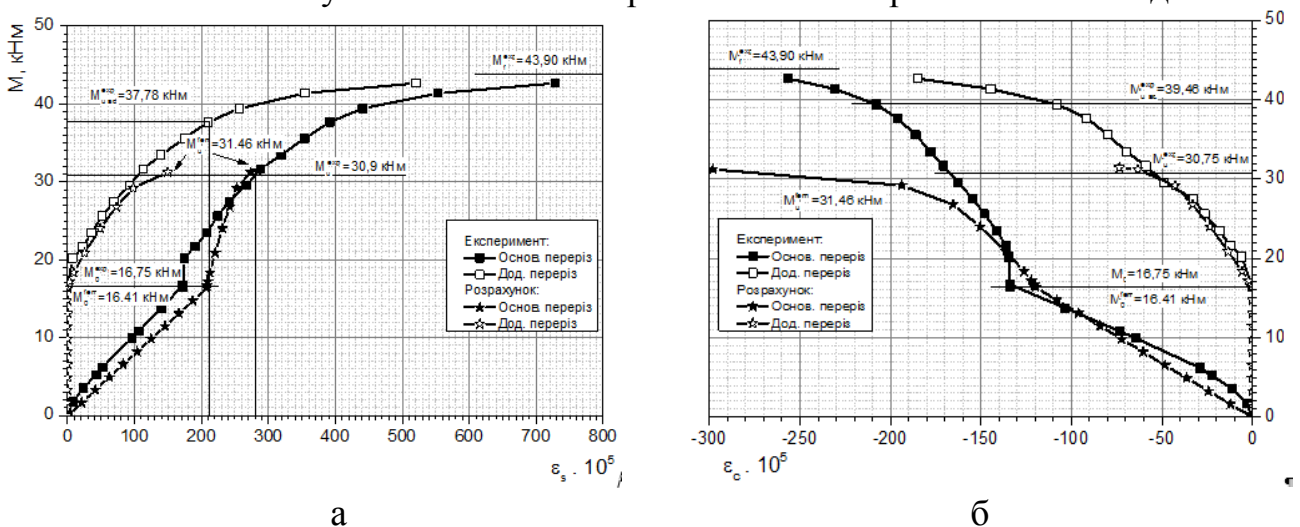


Рис. 17. Характерні графіки деформації арматури (а), деформації стиснутої грані бетону (б) на прикладі балки Бп 2.1-0,7

За результатами аналізу даних встановлено, що теоретичне значення несучої здатності моделей із підсиленням залізобетонною обіймою за дії навантаження відрізняється від експериментальної величини на величину до 3,4 %. Аналіз величин прогинів підсилених моделей виявив відхилення в межах 7–10 % у сторону їх перевищення над експериментальними величинами.

На графіках під час етапу розрахунку моделей після моменту підсилення отримано стрімкішу ділянку, яка характеризується меншим приростом деформацій за однакового приросту величини діючого моменту. Це пояснюється включенням у роботу жорстких зв'язків, відповідно, і додаткового перерізу, що свідчить про допустимість застосування цього принципу моделювання підсиленого перерізу. Отримані результати за МСЕ моделей повторюють характер руйнування експериментальних зразків, отже такий метод моделювання задовільно описує роботу реальної конструкції.

Моделювання аналогічної залізобетонної моделі за допомогою ПК «МІРАЖ–2015» теж показало задовільну збіжність, а саме: теоретичне значення несучої здатності усіх досліджених моделей балок, підсилених за дії навантаження менше від експериментальної величини на величину до 3,3 %. Це дозволяє зробити висновок про адекватність пропонуваніх підходів до моделювання дії навантаження у момент підсилення конструкції. Порівняльний аналіз несучої здатності підсилених балок, отриманих МСЕ з результатами, отриманими згідно запропонованої методики розрахунку показав задовільну збіжність, яка становила 1,3–6,8 %.

У шостому розділі наведено результати розробки та апробації запропонованої методики оцінки надійності – індексів надійності (дальності відмови)  $\beta$  та коефіцієнтів імовірності безвідмовної роботи  $P(\beta)$  для згинаних та стиснуто-згинаних конструкцій, що підсилюються способом нарощуванням перетину арматури, а також виконано аналіз отриманих значень якісних і кількісних показників. При цьому рівень діючого на час підсилення навантаження розглядається як додаткова, до загальноприйнятих у теорії оцінювання надійності залізобетону, випадкова величина

Передумови оцінки ймовірності безвідмовної роботи:

- конструкція (балка/колона) є прямокутного перерізу та не має пошкоджень на момент підсилення;
- контрольовані параметри резерву несучої здатності конструкції до і після підсилення (міцнісні / деформативні / геометричні) та рівень її навантаження в момент підсилення є стохастичними змінними, які підпорядковуються нормальному закону розподілу і є взаємонезалежні;
- значення згинального моменту від навантаження приймається детермінованим;

Для оцінки ймовірності безвідмовної роботи конструкції, підсиленої за дії навантаження, обчислюємо індекс надійності/дальність відмови згідно з ДБН В.12-14:2018 за формулою:

$$\beta = (\bar{M}_u - M_u) \hat{M}_u^{-1}, \quad (3)$$

де  $\bar{M}_u$ ,  $M_u$ ,  $\hat{M}_{ult}$  – математичне сподівання, детерміноване значення та стандарт несучої здатності конструкції.

Своєю чергою, на основі отриманого вище індексу надійності  $\beta$ , кількісну оцінку надійності конструкції, підсиленої за дії навантаження у вигляді ймовірності її безвідмовної роботи  $P(\beta)$  встановлюємо за допомогою відомої функції Лапласа  $\Phi(\beta)$ :

$$P(\beta) = 0,5 + \Phi(\beta). \quad (4)$$

Виходячи з передумов оцінки ймовірності безвідмовної роботи, формула для знаходження стохастичного значення несучої здатності балки, підсиленої на прикладі сталевую стрижневою арматурою за дії навантаження (як функції стохастичних величин  $\tilde{x}_i$ ), набула такого вигляду:

$$\begin{aligned} \tilde{M}_u &= f(\tilde{\sigma}_c, \tilde{\sigma}_s, \tilde{\sigma}_{s,ad}, \tilde{\sigma}_{sc}, \tilde{E}_c, \tilde{E}_s, \tilde{E}_{s,ad}, \tilde{b}, \tilde{d}_{red}, \tilde{\gamma}_{s,ad,inc}) = \\ &= (\tilde{\sigma}_s A_s + \tilde{\sigma}_{s,ad} A_{s,ad} \tilde{\gamma}_{s,ad,inc})(\tilde{d}_{red} - 0.5\tilde{x}_m) + \tilde{\sigma}_{sc} A'_s (0.5\tilde{x}_m - a'_s), \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\tilde{\sigma}_c$ ,  $\tilde{\sigma}_s$ ,  $\tilde{\sigma}_{s,ad}$ ,  $\tilde{\sigma}_{sc}$  – стохастичні міцнісні параметри (опір бетону стиску, міцність армування (основного/додаткового та стиснутого));  $\tilde{E}_c$ ,  $\tilde{E}_s$ ,  $\tilde{E}_{s,ad}$  – стохастичні деформативні параметри (модулі пружності бетону і армування (основного/додаткового));  $\tilde{b}$ ,  $\tilde{d}_{red}$  – стохастичні геометричні параметри (ширина і приведена корисна висота перерізу);  $\tilde{\gamma}_{s,ad,inc}$  – стохастичний параметр рівня навантаження в момент підсилення (коефіцієнт використання перерізу розтягнутої додаткової арматури);  $A_s$ ,  $A_{s,ad}$ ,  $A'_s$  – детерміновані значення площі перерізу армування (основного/додаткового та стиснутого);  $a_s$ ,  $a'_s$  – детерміновані значення відстані від центру ваги армування до нижньої / верхньої грані перерізу;  $\tilde{x}_m$  – стохастичне значення середньої висоти стиснутої зони перерізу.

Аналогічно формула для знаходження стохастичного значення несучої здатності колони, на прикладі колони, підсиленої карбоною стрічкою за дії навантаження (як функції стохастичних величин  $\tilde{x}_i$ ), набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \tilde{M}_u &= \tilde{N}_u \tilde{e} = f(\tilde{\sigma}_c, \tilde{\sigma}_s, \tilde{\sigma}_{sc}, \tilde{\sigma}_f, \tilde{\sigma}_{fc}, \tilde{E}_c, \tilde{E}_s, \tilde{E}_f, \tilde{b}, \tilde{d}_{red}, \tilde{\gamma}_{f,inc}, \tilde{\gamma}_{fc,inc}) = \\ &= (\tilde{\sigma}_s A_s + \tilde{\sigma}_f A_f \tilde{\gamma}_{f,inc})(\tilde{d}_{red} - 0.5\tilde{x}_m) + \tilde{\sigma}_{sc} A'_s (0.5\tilde{x}_m - a'_s) + \\ &\quad + \tilde{\sigma}_{fc} A'_f \tilde{\gamma}_{fc,inc} (0.5\tilde{x}_m + 0.5t'_f), \end{aligned} \quad (6)$$

де  $\tilde{N}_u$ ,  $\tilde{e}$  – стохастичні значення поздовжньої сили у стадії, близькій до руйнування, та її ексцентриситету;  $\tilde{\sigma}_f$ ,  $\tilde{\sigma}_{fc}$  – стохастичні міцнісні параметри резерву несучої здатності – опір бетону стиску, міцність композитної арматури в розтягнутій/стиснутій зоні перерізу;  $\tilde{E}_f$  – стохастичні деформативні параметри резерву несучої здатності – модулі пружності бетону, композитної арматури;  $\tilde{\gamma}_{f,inc}$ ,  $\tilde{\gamma}_{fc,inc}$  – стохастичні параметри рівня навантаження в момент підсилення – коефіцієнти використання перерізу розтягнутої і стиснутої композитної арматури;  $A_f$ ,  $A'_f$  – детерміновані значення площі перерізу розтягнутої та стиснутої композитної арматури;  $b_f$ ,  $t_f$ ,  $b'_f$ ,  $t'_f$  – детерміновані значення ширини і товщини перерізу розтягнутої/стиснутої карбоною стрічки; інші позначення аналогічні до позначень у формулі (5).

Принципова блок-схема розрахунку показників для оцінки надійності (безвідмовності) на прикладі колони, підсиленої карбоновою стрічкою за дії навантаження, наведена на рис. 18.

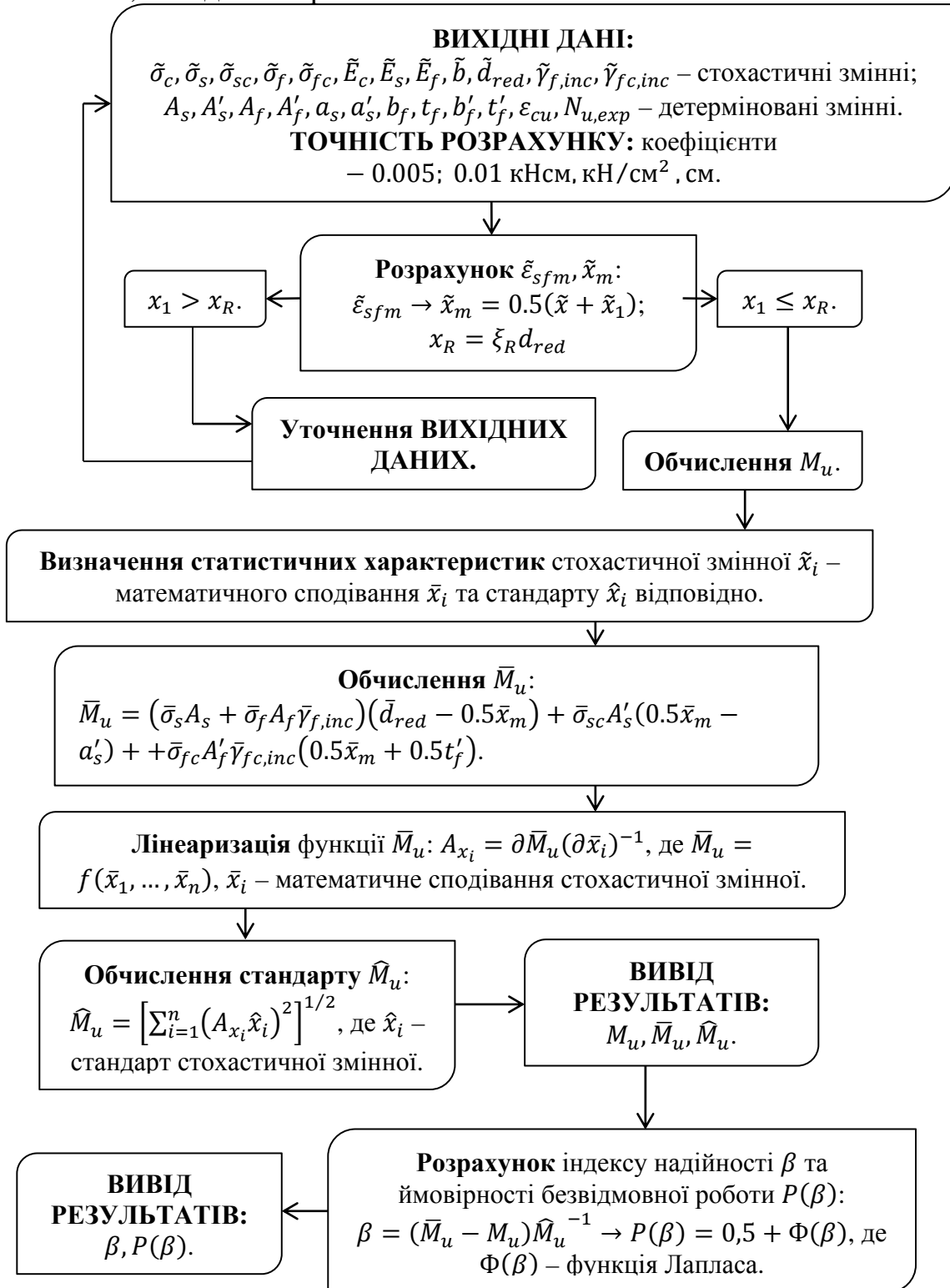


Рис. 18. Принципова блок-схема оцінки ймовірності безвідмовної роботи колони, підсиленої карбоновою стрічкою за дії навантаження (модель V)

Отримані результати оцінки ймовірності безвідмовної роботи колони, підсиленої карбоновою стрічкою (за дії різних рівнів навантаження в момент підсилення й використання різних розмірів перерізу стрічки), – відповідно

індекси надійності / дальності відмови  $\beta$  та ймовірності безвідмовної роботи  $P(\beta)$ , зведено в поданих нижче табл. 6, 7 ( $M_{u,0}$  – несуча здатність залізобетонної конструкції без підсилення).

Таблиця 6

**Індекс надійності / дальність відмови  $\beta$** 

№ з/п	Карбонова стрічка (CFRP)	Рівень навантаження в момент підсилення			
		$0.0 \times M_{u,0}$	$0.3 \times M_{u,0}$	$0.5 \times M_{u,0}$	$0.7 \times M_{u,0}$
1	1.2×25 мм	4.58	4.56	4.53	4.49
2	1.2×50 мм	4.68	-	4.61	4.55

Таблиця 7

**Ймовірність безвідмовної роботи  $P(\beta)$** 

№ з/п	Карбонова стрічка (CFRP)	Рівень навантаження в момент підсилення			
		$0.0 \times M_{u,0}$	$0.3 \times M_{u,0}$	$0.5 \times M_{u,0}$	$0.7 \times M_{u,0}$
1	1.2×25 мм	0.999998	0.999997	0.999997	0.999996
2	1.2×50 мм	0.999999	-	0.999998	0.999997

Аналогічно отримані результати оцінки ймовірності безвідмовної роботи балки, підсиленої на прикладі сталеву стрижневою арматурою (за дії різних рівнів навантаження в момент підсилення й використання різних діаметрів нарощеної арматури), – відповідно індекси надійності / дальності відмови  $\beta$  та ймовірності безвідмовної роботи  $P(\beta)$ , зведено в поданих нижче табл. 8–9.

Таблиця 8

**Індекс надійності / дальність відмови  $\beta$** 

№ з/п	Нарощена арматура	Рівень навантаження в момент підсилення			
		$0.0 \times M_{u,0}$	$0.3 \times M_{u,0}$	$0.5 \times M_{u,0}$	$0.75 \times M_{u,0}$
1	Ø8 мм	3.39	3.38	3.38	3.35
2	Ø10 мм	3.41	3.41	3.39	3.37
3	Ø12 мм	3.46	3.43	3.41	3.38
4	Ø14 мм	3.49	3.46	3.44	3.41
5	Ø16 мм	3.53	3.50	3.43	3.41

Таблиця 9

**Ймовірність безвідмовної роботи  $P(\beta)$** 

№ з/п	Нарощена арматура	Рівень навантаження в момент підсилення			
		$0.0 \times M_{u,0}$	$0.3 \times M_{u,0}$	$0.5 \times M_{u,0}$	$0.75 \times M_{u,0}$
1	Ø8 мм	0.999650	0.999635	0.999630	0.999600
2	Ø10 мм	0.999675	0.999675	0.999650	0.999625
3	Ø12 мм	0.999730	0.999700	0.999675	0.999640
4	Ø14 мм	0.999760	0.999730	0.999710	0.999675
5	Ø16 мм	0.999795	0.999765	0.999700	0.999670

Графіки залежності ймовірності безвідмовної роботи  $P(\beta)$  від рівня навантаження в момент підсилення для колон, підсилених стрічкою та для балок, підсилених нарощенням перерізу арматури, наведені на рис. 19.



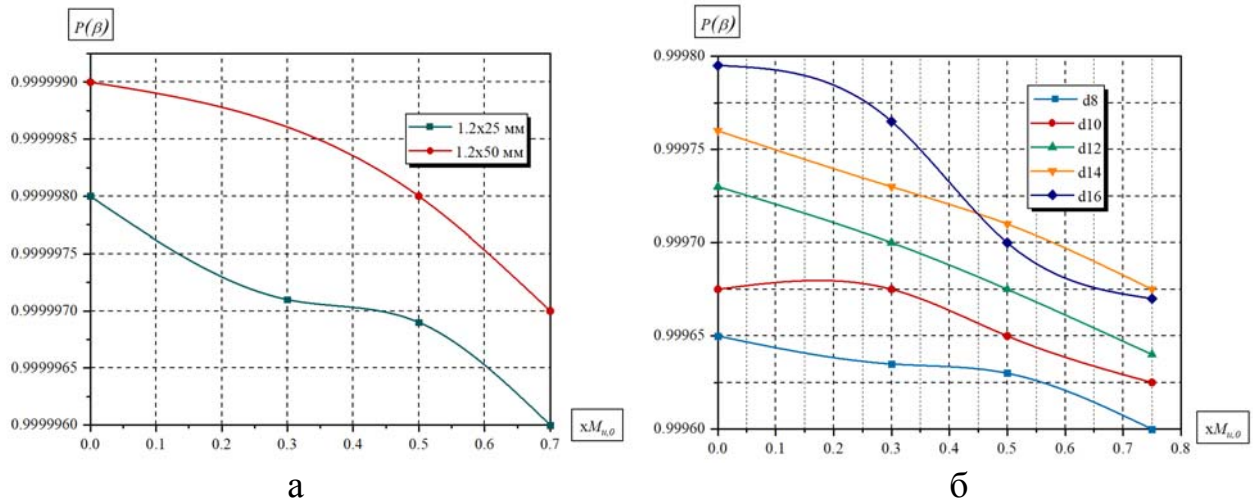


Рис. 19. Залежність «рівень навантаження в момент підсилення  $\times M_{u,0}$  – ймовірність безвідмовної роботи  $P(\beta)$ » для колони, підсиленої карбоновою стрічкою (а) та для балки, підсиленої сталевую стрижневою арматурою (б)

Аналізуючи отримані залежності, можна констатувати закономірність: для балок, підсиленних сталевую стрижневою арматурою, як і для колон, підсиленних карбоновою стрічкою, ймовірність безвідмовної роботи колон  $P(\beta)$  знижувалася зі збільшенням рівня навантаження в момент підсилення.

Запропоновано визначати залишковий ресурс підсиленних конструкцій на основі співставлення отриманих показників надійності з нормованими значеннями ДБН В.12-14, як для нових конструкцій. Виходячи з передумов оцінки ймовірності безвідмовної роботи, залишковий ресурс залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних елементів, підсиленних за дії навантаження та досліджених у цій роботі, відповідає терміну  $T_{ef} = 60$  років.

Також залишковий ресурс підсиленої конструкції  $T$  пропонуємо оцінювати, використовуючи запроповану А. І. Лантух-Лященком аналітичну модель життєвого циклу залізобетонних конструкцій та відповідну формулу:

$$T = [(\beta_d - \beta_{lim})T_d^2(\beta_c - \beta_{lim})^{-1}]^{1/2}, \quad (7)$$

де  $T_d$  – нормативний термін служби конструкції;  $\beta_d = \beta$ ,  $\beta_c$  – дійсне початкове відразу після підсилення (проектне) та мінімальне початкове (нормативне) значення характеристики безпеки (індексу надійності) відповідно;  $\beta_{lim}$  – граничне значення індексу надійності конструкції в експлуатації, яке можна визначити з рівності:

$$\Phi'(\beta_{lim}) = [\Phi'(\beta_c)]^n, \quad (8)$$

де  $n = T_d$ ;  $\Phi'(\beta_i) = P(\beta_i)$  – функція стандартного нормального розподілу, значення якої тотожне ймовірності безвідмовної роботи елемента.

Використовуючи підхід, наведений А. І. Лантух-Лященком, спрогнозовано залишковий ресурс конструкцій після підсилення  $T_i$  (для встановлених нормативних термінів служби  $T_d$ ), який для наочності визначено для проектних значень індексу надійності в таких діапазонах:  $\beta_d = \beta = 3,1 - 3,5$  (для моделей підсиленої балки – див. табл. 6, 7);  $\beta_d = \beta = 4,4 - 4,8$ . Отримані результати зведено в табл. 10.

Прогноз залишкового ресурсу конструкції  $T$ 

Проектне значення $\beta_d$	Прогноз ресурсу $T$ , років								
	при $T_d = 100$			при $T_d = 80$			при $T_d = 60$		
	КЛАС НАСЛІДКІВ								
	CC1	CC2	CC3	CC1	CC2	CC3	CC1	CC2	CC3
Для моделей підсиленої БАЛКИ									
3.10	100	69	-	80	54	-	60	38	-
3.20	103	75	19	82	58	-	62	42	-
3.30	105	79	35	85	62	22	64	45	0
3.40	108	84	46	87	66	33	66	49	19
3.50	111	88	55	89	70	41	67	52	27
Для моделі підсиленої КОЛОНИ									
4.40	132	120	104	107	97	84	82	74	63
4.50	134	123	108	109	100	87	83	76	66
4.60	136	126	112	110	102	90	85	78	68
4.70	138	129	116	112	105	94	86	80	71
4.80	140	132	120	114	107	97	87	82	73

Насамкінець, із формули (7) можемо вивести вираз для задання стохастичної функції надійності (моделі життєвого циклу конструкції після підсилення) – залежності зміни значення індексу надійності  $\beta(t)$  від часу експлуатації  $t$ , прийнявши тут  $T = t$ :

$$\beta(t) = \beta_d - (\beta_c - \beta_{lim})t^2(T_d^2)^{-1}. \quad (9)$$

Графіки залежностей значення індексу надійності  $\beta(t)$  від часу подальшої експлуатації  $t$  ( $\beta_d = 3,17, 3,42, 4,57$  – див. середній рівень безвідмовності, табл. 9), відповідно до виразу (9) та даних табл. 11, наведені на рис. 20, а (для моделей підсиленої балки) і рис. 20, б (для моделі підсиленої колони).

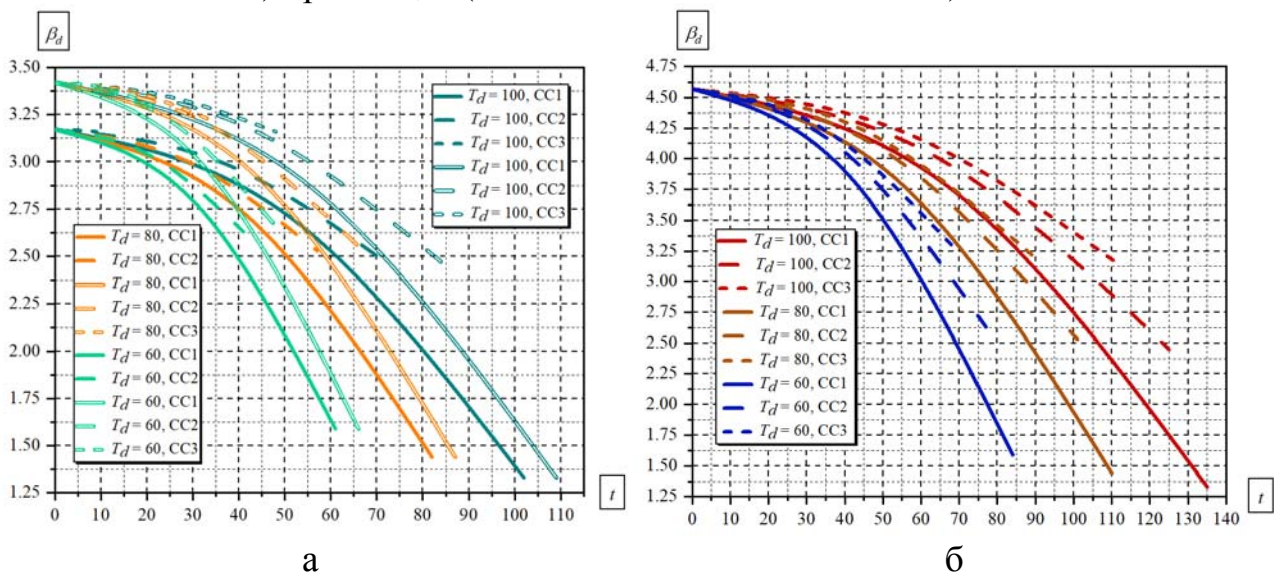


Рис. 20. Залежності проектного значення індексу надійності  $\beta_d$  від часу експлуатації  $t$  для моделей: підсиленої балки ( $\beta_d = 3,17, 3,42$ ) (а); підсиленої колони ( $\beta_d = 4,57$ ) (б)

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

За результатами виконання комплексу експериментально-теоретичних досліджень залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних конструкцій, підсилених за дії навантаження найпоширенішими способами: способом нарощуванням перетину арматури, одночасно арматури і бетону під навантаженням можна зробити наведені нижче висновки.

1. Сьогодні розроблені та досліджені різноманітні методи і способи підсилення залізобетонних конструкцій, виконано значну кількість досліджень підсилених згинаних та стиснуто-згинаних конструкцій, проте серед них відносно невелика кількість експериментальних досліджень конструкцій, виконаних під дією навантаження. Існуючі методи розрахунку підсилення конструкцій не враховують, або враховують лише приблизно напружений стан до підсилення, що не дає змоги визначати реальний резерв несучої здатності підсилених залізобетонних елементів. Майже всі проведені дослідження надійності стосуються нових проєктних конструкцій, а ті, що є, не оцінюють надійності конструктивних елементів, які підсилені за дії навантаження.

2. Розроблена і реалізована методологія та комплексна програма експериментально-теоретичних досліджень арматурних стержнів, залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних елементів, підсилення яких виконано під дією навантаження різного рівня.

3. Виконані експериментальні випробування арматурних стержнів та залізобетонних балок, підсилених залізобетонною обіймою, дозволили отримати експериментальні значення коефіцієнтів умов роботи додаткової арматури  $\gamma_s^{ad,exp}$  і бетону  $\gamma_c^{ad,exp}$ , які значно відрізняються від величин, рекомендованих нормами проєктування ДСТУ Б В.3.1-2:2016. Після застосування уточнених коефіцієнтів умов роботи додаткових арматури  $\gamma_{s,dis}^{ad}$  і бетону  $\gamma_{c,dis}^{ad}$ , розбіжність для балок підсилених залізобетонною обіймою становила 3,7...18,1 % в бік перевищення експериментальних величин і 5,2...-2,9 % для балок, підсилених нарощуванням перерізу армування, на відміну від розбіжності у -35 % в бік перевищення теоретичних величин за використання коефіцієнтів умов роботи, рекомендованих у діючих нормах.

4. Експериментальні дослідження сумісної роботи бетону існуючого перерізу і бетону підсилення показали, що бетон існуючого перерізу і бетон підсилення у разі застосування конструкційних заходів деформуються сумісно. Відхилення між співставними деформаціями становило до 8,7 %.

5. Досліджено вплив рівня попереднього навантаження на зміну несучої здатності і характер деформативності підсиленої конструкції. Максимальний ефект підвищення несучої здатності отримали зразки, підсилені залізобетонною обіймою без попереднього навантаження, а саме 172 % у колонах та 183 % – для балок, який змінювався залежно від рівня діючого на час підсилення навантаження. При цьому ефект для зразків, підсилених нарощуванням армування, становив до 31,8 % для залізобетонних колон та до 45 % – для залізобетонних балок.

6. Напружено-деформований стан залізобетонних конструкцій, підсилених за дії навантаження, можна розділити на три стадії, а саме: перша – до досягнення напружень у розтягненій арматурі основного або додаткового перерізу межі текучості; друга – до досягнення напружень межі текучості в арматурі як в основному, так і додатковому перерізі, третя – стадія руйнування, яка завершується розривом арматурних стержнів та/або роздробленням стисненого бетону. За результатами досліджень запропоновано, що у разі забезпечення надійного анкерування, сумісної роботи бетону і арматури основного і додаткового перерізів як критерій вичерпання несучої здатності підсиленого нормального перерізу доцільно приймати граничний стан, що відповідає досягненню межі текучості в армуванні основного і додаткового перерізів.

7. Запропоновано на основі деформаційної моделі методику розрахунку та алгоритм визначення несучої здатності та параметрів напружено-деформованого стану залізобетонних балок, підсилених за дії навантаження. Встановлено, що ця методика розрахунку з необхідною точністю визначає несучу здатність комплексного підсиленого елемента. Розбіжність з експериментальними даними балок, підсилених залізобетонною обіймою, не перевищувала 12,7 % та 9,9 % для балок, підсилених лише нарощуванням перерізу армування. При цьому для всіх балок експериментальні величини були вищими за теоретичні.

8. Запропоновано на основі деформаційної моделі методику розрахунку та алгоритм визначення несучої здатності залізобетонних колон, підсилених за дії навантаження, яка дозволяє враховувати напружено-деформований стан основного перерізу елемента під час підсилення та моменти від впливів другого порядку. Результати розрахунку згідно з запропонованою методикою дають задовільну збіжність із експериментальними результатами. Розбіжність між результатами визначення несучої здатності колон, підсилених залізобетонною обіймою, знаходиться в межах 8,9–11,6 % та 4,5–12,5 % для колон, підсилених зовнішнім армуванням. При цьому експериментальні величини були вищими за теоретичні.

9. Розроблено універсальну методику для визначення теоретичних коефіцієнтів використання перерізу додаткової арматури  $\gamma_{s,dis}^{ad}$  і бетону  $\gamma_{c,dis}^{ad}$  для силової моделі розрахунку підсилених залізобетонних балок, яка враховує рівень діючого на час підсилення навантаження та співвідношення площ перерізів елементів до та після підсилення. Так величина коефіцієнтів умов роботи для досліджених експериментальних балок становила  $\gamma_{c,dis}^{ad} = 0,07–0,445$  для бетону та  $\gamma_{s,dis}^{ad} = 0,156–1,0$  для армування на відміну коефіцієнтів умов роботи бетону  $\gamma_{br} = 0,8$  і арматури  $\gamma_{sr} = 0,8$  рекомендованих у діючих нормах ДСТУ Б В.3.1-2:2016.

10. Проведено верифікацію методом скінченних елементів (МСЕ) запропонованих підходів до розрахунку, запропоновано алгоритм побудови геометричної, фізичної моделі та моделі прикладання навантаження до підсилених залізобетонних конструкцій, які відображають дійсні умови їхньої

експлуатації та підсилення. Порівняльний аналіз несучої здатності підсилених балок, отриманих МСЕ з результатами, отриманими згідно з пропонованою методикою розрахунку, показав задовільну збіжність, яка становила 1,3–6,8 %.

11. Розроблено принципові моделі оцінки ймовірності безвідмовної роботи залізобетонних балок та колон, підсилених за дії навантаження, адаптовані до чинних норм проектування та існуючої методики оцінки надійності нових проектних конструкцій. Принциповими особливостями розроблених моделей є пропозиція врахування стохастичного параметра рівня навантаження конструкції в момент підсилення, а також використання адаптованої деформаційної моделі її розрахунку. Проведено апробацію розроблених моделей, якою встановлено, що зі збільшенням рівня діючого навантаження зменшується величина індексу надійності/дальності відмови  $\beta$  залізобетонної конструкції, підсиленої під навантаженням. У разі застосування сучасних композитних матеріалів для підсилення рівень надійності підсилених залізобетонних конструкцій суттєво зростає.

12. Виходячи з передумов оцінки ймовірності безвідмовної роботи, розроблено пропозиції для визначення залишкового ресурсу підсилених конструкцій: на основі співставлення отриманих показників надійності з нормованими значеннями, наведеними в ДБН В.12-14, як для нових конструкцій, або застосовуючи аналітичну модель життєвого циклу конструкції. Використовуючи аналітичну модель, спрогнозовано залишковий ресурс досліджуваних конструкцій після підсилення  $T_i$  залежно від встановлених нормативних термінів служби  $T_d$ , дійсних у момент підсилення значень індексу надійності та класу наслідків будівлі.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

*Статті у наукових періодичних виданнях іноземних держав та України, які включені до міжнародних наукометричних баз*

1. Khmil R. Development of the procedure for the estimation of reliability of reinforced concrete beams, strengthened by building up the stretched reinforcing bars under load / R. Khmil, R. Tytarenko, Y. Blikharskyu, P. Vejera. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 5, No. 7 (95). – P. 32–42. (SCOPUS) (сформульовано загальні принципи оцінки надійності, проведено аналіз результатів та сформовані висновки).

2. Yaroslav Blikharskyu, Roman Khmil and Zinovi Blikharskyu. Research of RC columns strengthened by carbon FRP under loading // [Електронний ресурс] // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 174, 04017. (SCOPUS) (поставлено мету досліджень, проведено компонування статті, сформовані висновки).

3. Krainskyu Pavlo, Blikharskyu Yaroslav, Khmil Roman, Blikharskyu Zinovi. Experimental study of the strengthening effect of reinforced concrete columns jacketed under service load level [Електронний ресурс] // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 183 (SCOPUS) (сформовано завдання досліджень, проведено компонування статті, сформовані висновки).

4. Krainskyy P., Blikharskyu Y., Khmil R., Vegera P. Influence of loading level on the bearing capacity of RC columns strengthened by jacketing [Електронний ресурс] // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 230 (SCOPUS) (поставлені мету та завдання досліджень, аналіз впливу рівня навантаження та сформовані висновки).

5. Khmil R., Tytarenko R., Blikharskyu Y., Vashkevych R. Influence of load level during strengthening of reinforced concrete beams on their reliability [Електронний ресурс] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 708, iss. 1 (SCOPUS) (сформовано мету досліджень, запропоновані підходи до оцінки впливу рівня навантаження, сформовані висновки).

6. Selej dak Jacek, Blikharskyu Yaroslav, Khmil Roman, Blikharskyu Zinovi y. Calculation of reinforced concrete columns strengthened by CFRP // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2020. – Vol. 47: P. 400-410. (SCOPUS) (сформовано завдання досліджень, проведено аналіз теоретичних результатів).

7. Khmil R., Tytarenko R., Blikharskyu Y., Vegera P. The probabilistic calculation model of RC beams, strengthened by RC jacket // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2020. – Vol. 100: P. 182–192. (SCOPUS) (сформовано мету досліджень, базові принципи ймовірнісного розрахунку, сформовані висновки).

8. Yaroslav Blikharskyu, Roman Khmil, Oleg Yovchuk. Research of strengthening effect reinforced concrete elements subjected to combined axial load and bending with different percent of additional reinforcement // Zeszyty naukowe Politechniki Czestochowskiej №167 – seria Budownictwo 20, Czestochowa, 2014 – p.16-28. (Index Copernicus) (сформовано мету досліджень, виконано компонування статті, сформовані висновки).

9. Krayskiy P. The strength of reinforced concrete columns, strengthened by reinforced concrete jacketing under loading / P. Krainskiy, R. Khmil, Z. Blikharskiy // Czasopismo inzynierii ladowej, srodowiska i architektury (JCEEA) . – t. XXXII, z. 62 (3/II/15), lipiec-wrzesien 2015. – P.209-220. (Index Copernicus) (поставлено мету досліджень, виконано аналіз результатів досліджень).

10. Roman Khmil, Yaroslav Blikharskyu, Igor Vasiliev. Influence of construction's loading level on strength and deformability of RC columns strengthened by CFRP // Zeszyty naukowe PRZ: Czasopismo inzynierii ladowej, srodowiska i architektury / Scientific papers of RUT: Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture JCEEA, T. XXXI, z. 61 (4/14), Rzeszow, 2014 - p.125-134. (Index Copernicus) (сформовано мету досліджень, виконано аналіз результатів, сформовано висновки).

11. Zinovi y Blikharskyu, Dmytro Dubizhanskyu, Roman Khmil. Badania nośności belek żelbetowych wzmocnionych pod obciążeniem przez obetonowanie // Budownictwo I architektura. Vol. 13(3) 2014 / Politechnika Lubelska. – Lublin, 2014. - P.65-70. (Index Copernicus) (поставлено мету досліджень, виконано аналіз отриманих результатів).

12. Pavlo Krainskiy, Zinovi y Blikharskyu, Roman Khmil. Serviceability of reinforced concrete columns strengthened by reinforced concrete jacketing // Zeszyty naukowe Politechniki Czestochowskiej №171 – seria Budownictwo 21,



Częstochowa, 2015 – p.139-143. (Index Copernicus) (сформовано мету досліджень, запропоновано критерії для оцінки експлуатаційної придатності, сформовано висновки).

13. Zinoviyy Blikharskyuy, Evgen Tsariiov, Roman Khmil. The load-carrying capacity of the eccentrically-compressed reinforced-concrete columns strengthened with loading // SSP-Journal of civil engineering. Selected Scientific Papers) ISSN: 1336-9024. Vol.6. Issue 2. / Technical University of Kosice, 2011. – P. 57-62 (сформовано завдання досліджень, проведено аналіз результатів).

14. Блихарский Я.З. Увеличение жёсткости внецентренно-сжатых железобетонных колон, усиленных углеродной лентой / Я.З. Блихарський, Р.Е. Хміль // Вестник Белорусско-Российского университета №2 (43) – Могилев, 2014. С.114-122 (сформовано мету досліджень, виконано аналіз результатів, сформовано висновки).

15. Krayinskyi P. Experimental investigation of reinforced concrete columns strengthened by jacketing / P. Krainskyi, Z. Blikharskiy, R. Khmil // Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST) ISSN: 3159-0040 (online) Vol. 2 Issue 7, July – 2015. – P.1959-1963 (поставлені завдання досліджень, виконано аналіз результатів, сформовано висновки).

***Статті у наукових фахових виданнях України:***

16. Бліхарський З.Я. Залізобетонні балки, підсилені нарощуванням арматури під навантаженням / З.Я. Бліхарський, Я.В. Римар, Р.Є. Хміль // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Теорія та практика будівництва». – Львів: Видавництво НУ»ЛП», 2005. – №545. – С. 15-19. (виконано аналіз отриманих результатів досліджень, сформовано висновки).

17. Бліхарський З.Я. Методика виконання та експериментальні дослідження залізобетонних балок підсиленних обоймою під навантаженням / З.Я. Бліхарський, Р.Є. Хміль, І.В. Васильєв // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2007. – Вип. 15. – С. 358-363. (запропонована методика досліджень, виконано аналіз отриманих результатів, сформовано висновки).

18. Бліхарський З.Я. Деформативність залізобетонних балок підсиленних бетоною обоймою за дії навантаження / З.Я. Бліхарський, Р.Є. Хміль, І.В. Васильєв, Р.В. Вашкевич // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Теорія та практика будівництва». – Львів: Видавництво НУ»ЛП», 2007. – №600. – С. 28-32. (запропонована методика досліджень, проведений аналіз результатів).

19. Бліхарський З.Я. Дослідження з'єднуючих сумішей для нарощування поперечного перерізу підсиленних залізобетонних балок / З.Я. Бліхарський, Р.Є. Хміль, І.В. Васильєв, Р.В. Вашкевич // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Теорія та практика будівництва». – Львів: Видавництво НУ»ЛП», 2007. – №602. – С. 7-10 (запропонована методика досліджень, виконано аналіз результатів, сформовано висновки).

20. Бліхарський З.Я. Дослідження напруженого стану робочої арматури залізобетонних балок при нарощуванні її перерізу під навантаженням / З.Я. Бліхарський, Р.Є. Хміль, Я.В. Римар, І.В. Васильєв // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2008. – Вип. 16., ч. 1. – С. 311-317. (поставлено мету досліджень, запропонована методика досліджень, проведено аналіз результатів експериментальних досліджень).

21. Бліхарський З.Я., Царьов Є.С., Хміль Р.Є., Попович В.І. Методика експериментальних досліджень стиснутих залізобетонних елементів на дію короткотривалого навантаження, прикладеного з ексцентриситетом. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Теорія і практика будівництва. – Львів, 2010. - №662. С.50-54 (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз літератури для розроблення методики досліджень стиснутих елементів).

22. Бліхарський З.Я., Хміль Р.Є., Царьов Є.С. Міцність позацентрово-стиснутих залізобетонних елементів підсилених за дії навантаження // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць. - Випуск 74, книга 2 – Київ, НДІБК, 2011. – С. 36-43. (поставлені мета та завдання досліджень, запропонована програма досліджень).

23. Дубіжанський, Д. І. Методика експериментальних досліджень міцності і деформативності залізобетонних балок, підсилених залізобетонною обоймою під навантаженням [Текст] / Д. І. Дубіжанський, З. Я. Бліхарський, Р. Є. Хміль // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне, 2011. – Вип. 22. – С.795–801. (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз літератури для розроблення методики досліджень згинаних елементів, сформульовані висновки).

24. Бліхарський, З. Я. Дослідження впливу додаткового армування на міцність балок, підсилених обоймою за дії навантаження [Текст] / Бліхарський З. Я., Р. Є. Хміль, Дубіжанський Д. І. // Науково-технічний збірник «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві.» Вінниця: УНІВЕРСУМ - Вінниця – №2(13). С. 12–15. (поставлено мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень згинаних елементів).

25. Дубіжанський, Д. І. Теоретичне визначення міцності залізобетонних балок, підсилених залізобетонною обоймою за дії навантаження за інженерною методикою [Текст] / Д. І. Дубіжанський, Р. Є. Хміль, З. Я. Бліхарський // Теорія і практика будівництва : збірник наукових праць / відповідальний редактор З. Я. Бліхарський. – Львів : Видавництво НУ «Львівська політехніка». – 2012. – Вип. №742. – С. 70–74. (сформульовано завдання досліджень, запропоновано основні принципи методики теоретичного визначення міцності підсилених згинаних елементів, сформульовані висновки).

26. Бліхарський, З. Я. Розрахунок міцності нормальних перерізів залізобетонних балок, підсилених за дії навантаження, з врахуванням вимог нових норм проектування [Текст] / З. Я. Бліхарський., Р. Є. Хміль, Д. І. Дубіжанський // Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону». – Вип. 78: В 2-х кн.: Книга 1. –



Київ: ДП НДІБК, 2013. – С. 307–314. (поставлені мета і завдання досліджень, проведено аналіз результатів теоретичного розрахунку).

27. Бліхарський Я.З. Міцність та деформативність залізобетонних колон підсилених вуглецевою стрічкою / Я.З. Бліхарський, Р.Є. Хміль // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Теорія і практика будівництва. – Львів, 2013. - №755. С.15-20. (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки).

28. Бліхарський Я.З. Експериментальні дослідження залізобетонних колон підсилених вуглецевою стрічкою за дії навантаження низького рівня / Я.З. Бліхарський, Р.Є. Хміль, Ю.М. Собко // Зб. наук. праць: Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2013. – вип. 27. – С.440-447. (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки).

29. Бліхарський Я.З. Ефективність додаткового армування позацентрово стиснутих залізобетонних колон, підсилених за дії експлуатаційного рівня навантаження / Я.З. Бліхарський, Р.Є. Хміль // Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер: Архітектура і сільськогосподарське будівництво, Львів, 2013 - № 14.-С.127-134. (поставлені завдання досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки).

30. Вегера П.І. Дослідження ширини розкриття нормальних тріщин в стиснуто-зігнутих залізобетонних колонах підсилених зовнішньою композитною арматурою / П.І. Вегера, Я.З. Бліхарський, Р.Є. Хміль // Зб. наук. праць: Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2014. – вип. 28. – С.440-447. (сформульовано мету досліджень, проаналізовано ефективність застосування стрічки, сформульовані висновки).

31. Країнський П.І. Дослідження експериментальної міцності залізобетонних позацентрово-стиснутих колон підсилених залізобетонною обіймою / П.І. Країнський, Р.Є. Хміль, З.Я. Бліхарський // Зб. наук. праць: Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2014. – вип. 29. – С.607-613. (поставлена мета досліджень, запропоновано програму досліджень, проведе, сформульовані висновки).

32. Хміль Р.Є. Дослідження залізобетонних колон підсилених при експлуатаційному рівні навантаження системою CFRP / Р.Є. Хміль, Я.З. Бліхарський // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Будівельне виробництво» ДП«НДІБВ». Випуск №56 – Київ, 2014. С.116-118. (сформульовано мету досліджень, сформульовані висновки).

33. P.I. Krayinskyi Features of experimental strain determination of compressed-bending elements considering their deflection curve / P.I. Krayinskyi, Ya.Z. Blikharskyi, R.Ye. Khmil // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. - 2014. - № 781. - С. 89-95. (сформульовано мету досліджень, запропоновано підхід для визначення деформацій, сформульовані висновки).

34. Бліхарський Я. З., Хміль Р. Є., Холод П. Ф. Розрахунок за деформаційною моделлю залізобетонних колон підсилених вуглецевою

стрічкою // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Теорія і практика будівництва. – Львів, 2016. - №844. С.3-12 (поставлена мета досліджень, запропоновано підходи до визначення НДС підсилених стиснутих елементів).

35. Хміль Р.Є. Аналіз методів оцінки надійності залізобетонних конструкцій / Р.Є. Хміль, Р.Ю. Титаренко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2016. – Вип. 32. – С. 282–289. (сформульовано мету досліджень, висновки).

36. Хміль Р.Є. Особливості оцінювання надійності підсилених залізобетонних елементів / Р.Є. Хміль, Р.Ю. Титаренко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2016. – Вип. 63. – С. 91–97. (постановка проблеми досліджень, сформульовані висновки).

37. Титаренко Р.Ю. Основні стохастичні параметри при оцінюванні надійності залізобетонних балок, підсилених додатковим армуванням / Р.Ю. Титаренко, Р.Є. Хміль // Вісник Національного університету «Львівська політехніка», серія «Теорія і практика будівництва». – 2017. – № 877. – С. 206–211. (постановка проблеми, сформульовані висновки).

38. Титаренко Р.Ю. Принципи оцінки надійності залізобетонних балок, підсилених додатковою стрижневою арматурою за дії навантаження / Р.Ю. Титаренко, Р.Є. Хміль // Вісник Львівського національного аграрного університету, серія «Архітектура і сільськогосподарське будівництво». – 2018. – № 19. – С. 94–97(постановка проблеми, запропоновано врахування рівня навантаження як стохастичного параметру, сформульовані висновки).

39. Титаренко Р.Ю. Методика оцінки надійності залізобетонних балок, підсилених залізобетонною обоймою / Р.Ю. Титаренко, Р.Є. Хміль // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2018. – Вип. 36. – С. 406–412. (сформульовано мету і задачі досліджень, проведено аналіз результатів, сформульовані висновки).

### ***Патент***

40. Патент на корисну модель №59692 Україна. Пристрій для випробування залізобетонних балок на згин / Бліхарський З.Я., Хміль Р.Є., Вашкевич Р.В., Царьов Є.С.; заявник і власник НУ «Львівська політехніка». - № u201013311, заявл. 09.11.2010; опубл. 25.05.2011; Бюл. №10, 2011 р. - 4 с.

### ***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

41. Хміль Р.Є., Царьов Є.С. Експериментально-теоретичні дослідження впливу одночасної дії навантаження при підсиленні на міцність залізобетонних балок / Матеріали II Міжнародної конференції молодих вчених GAC-2009 «Геодезія, архітектура та будівництво», 14-16 травня 2009р.– Львів, Видавництво НУ«ЛП», 2009 - С.106-108. (*Особистий внесок: сформульовано мету досліджень, проаналізовано дослідження впливу дії навантаження*).

42. Дубіжанський, Д. І. Експериментальні дослідження міцності залізобетонних балок, підсилених залізобетонною обоймою під навантаженням.

[Текст] / Д. І. Дубіжанський, Р. Є. Хміль // «Геодезія, архітектура та будівництво». Матеріали III міжнар. конф. молодих вчених GAC-2010. – Львів, 2010 – С. 78–79. (*Особистий внесок: поставлена мета досліджень, проведено аналіз результатів, сформульовані висновки*).

43. Бліхарський Я.З., Хміль Р.Є. Вплив експлуатаційного рівня навантаження залізобетонних колон на ефект підсилення системою CFRP // Матеріали всеукраїнської заочної науково-практичної конференції «Науково-практичні засади будівельного виробництва в Україні: плани, прогнози, аналіз та досягнення. 14 березня 2014р, НДІБВ, Київ., 2014 – С.15-17. (*Особистий внесок: поставлена мета досліджень, виконано аналіз результатів*).

44. Бліхарський Я.З., Хміль Р.Є. Міцність позацентрово-стиснутих залізобетонних елементів підсиленних вуглецевою стрічкою // Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції «Енергоефективні технології в міському будівництві та господарстві.» 20-21 березня 2014р, ОДАБА, Одеса, 2014 – С.39-43 (*Особистий внесок: поставлені задачі досліджень, проведено аналіз результатів, сформульовані висновки*).

45. Khmil R., Tytarenko R. Reliability evaluation of strengthened reinforced concrete members // Litteris et Artibus : proceedings of 6th International youth science forum, November 24-26, 2016, Lviv - Lviv : Lviv Polytechnic Publishing House. – С. 136-137 (*Особистий внесок: поставлено мету досліджень, проведено аналіз літератури*).

46. Y. Blikharskyu, R. Khmil Z.Blikharskyu. Research of RC columns strengthened by carbon FRP under loading // Environmental challenges in Civil Engineering (ECCE): 3RD scientific conference: Book of Abstracts, April 23rd-25th, 2018 - Opole, Poland: Polish Association of Civil Engineers and Technicians, Branch in Opole. – p.127 - ISBN: 978-83-937864-2-8 (*Особистий внесок: поставлено мету досліджень, проведено аналіз результатів, виведені висновки*).

47. Країнський П. І., Бліхарський Я. З., Хміль Р. Є., Вегера П. І. Вплив рівня навантаження на несучу здатність залізобетонних колон підсиленних обоймою // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті : тези доповідей 7-ої Міжнародної науково-технічної конференції, 14-16 листопада 2018 р., Харків, Україна. – 2018. – С. 117–119. (*Особистий внесок: поставлені задачі досліджень, проведено аналіз впливу рівня навантаження, сформульовані висновки*).

48. Хміль Р. Є., Титаренко Р. Ю. Надійність залізобетонних балок, підсиленних нарощуванням розтягнутої арматури за дії навантаження // Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції : робоча програма та тези доповідей II Науково-практичної конференції, 24-25 травня 2018 р., Київ. – 2018. – С. 49–52. (*Особистий внесок: сформовано мету роботи, висновки досліджень*).

49. Країнський П. І., Вегера П. І., Хміль Р. Є., Бліхарський З. Я. Методика розрахунку тріщиностійкості залізобетонних колон підсиленних залізобетонною обоймою // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті: тези доповідей 8-ої Міжнародної науково-технічної конференції, 20-22 листопада 2019 р., Харків, Україна. –

2019. – С. 82–83 (*Особистий внесок: поставлені задачі досліджень, запропоновані базові принципи для розроблення методики дослідження*).

50. Хміль Р. Є., Титаренко Р. Ю., Бліхарський Я. З., Вашкевич Р. В. Надійність залізобетонних балок підсилених при різних рівнях навантаження // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті: тези доповідей 8-ої Міжнародної науково-технічної конференції, 20-22 листопада 2019 р., Харків, Україна. – 2019. – С. 120–121. (*Особистий внесок: сформовано мету досліджень, аналіз та висновки*).

51. Хміль Р.Є., Титаренко Р.Ю., Бліхарський Я.З., Вегера П.І. Вдосконалення методики оцінки ймовірності безвідмовної роботи залізобетонних балок, підсилених за дії навантаження // Енергоефективність на транспорті : тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції, 18-20 листопада 2020 р., Харків, Україна. – 2020. – С. 112–113. (*Особистий внесок: поставлені мета і задачі досліджень, запропоновані підходи для вдосконалення методики оцінки ймовірності безвідмовної роботи*).

## АНОТАЦІЯ

**Хміль Р. Є. Напружено-деформований стан та залишковий ресурс залізобетонних конструкцій, підсилених за дії навантаження. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню наукової проблеми встановлення дійсного напружено-деформованого стану залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних конструкцій, підсилених за дії навантаження і створенню розрахункових методик для проектування та оцінювання надійності та залишкового ресурсу таких конструкцій.

Проведено експериментальні дослідження арматурних стержнів, залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних елементів, підсилених за одночасної дії навантаження диференційованого рівня. На основі силової та деформаційної розрахункових моделей нормального перерізу розроблені методики розрахунку залізобетонних згинаних та стиснуто-згинаних елементів, підсилених за дії навантаження. Розроблено принципіві моделі оцінки ймовірності безвідмовної роботи залізобетонних конструкцій, підсилених за дії навантаження, адаптовані до чинних норм проектування та існуючої методики оцінки надійності нових проектних конструкцій. Принциповими особливостями розроблених моделей є пропозиція врахування стохастичного параметра рівня навантаження конструкції в момент підсилення, а також використання деформаційної моделі її розрахункового перерізу. Виходячи з передумов оцінки ймовірності безвідмовної роботи, запропоновано підходи до визначення залишкового ресурсу підсилених конструкцій.

**Ключові слова:** залізобетонна балка, колона, підсилення, рівень навантаження, стрижнева арматура, композитна стрічка, обойма, методика розрахунку, оцінка надійності, ймовірність безвідмовної роботи.

## АННОТАЦИЯ

**Хмил Р. Е. Напряженно-деформированное состояние и остаточный ресурс железобетонных конструкций, усиленных за действия нагрузки – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» - Львов: Национальный университет «Львовская политехника», 2021.

Диссертация посвящена решению научной проблемы установления действительного напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых и сжато-изгибаемых конструкций, усиленных за действия нагрузки и создание расчетных методик для проектирования и оценки надежности и остаточного ресурса таких конструкций.

Проведены экспериментальные исследования арматурных стержней, железобетонных изгибаемых и сжато-изгибаемых элементов, усиленных при одновременном действии нагрузки дифференцированного уровня. На основе силовой и деформационной расчетных моделей нормального сечения разработаны методики расчета железобетонных изгибаемых и сжато-изгибаемых элементов, усиленных за действия нагрузки. Разработаны принципиальные модели оценки вероятности безотказной работы железобетонных конструкций, усиленных за действия нагрузки, адаптированные с действующими нормами проектирования и существующей методики оценки надежности новых проектных конструкций. Принципиальными особенностями разработанных моделей является предложение учета как стохастического параметра уровня нагрузки конструкции в момент усиления, а также использование деформационной модели ее расчетного сечения. Исходя из предпосылок оценки вероятности безотказной работы предложены подходы к определению остаточного ресурса усиленных конструкций

**Ключевые слова:** железобетонная балка, колонна, усиление, уровень нагрузки, стержневая арматура, композитная лента, обойма, методика расчета, оценка надежности, вероятность безотказной работы.

## ABSTRACT

**Khmil R. Ye. Stress-strain state and remaining resource of reinforced concrete structures reinforced under load. – On the manuscript's rights.**

The thesis for earning the scientific Doctor's degree in Technical Sciences in specialty 05.23.01 «Building Constructions, Buildings and Structures» – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2021.

The dissertation is devoted to the research of reinforced concrete bending and compressed-bending structures, which are strengthened by increasing the cross section of reinforcement or reinforcement and concrete at one time under loading.

**The introduction** substantiates the relevance, purpose and objectives of research, general characteristics and scientific novelty as well as the practical value of research.

**The first section** reviews the technical literature on research issues, namely: the existing methods of reinforcing reinforced concrete bending and compressed-bending elements, The analysis of stress-strain state of reinforced concrete structures, methods of forecasting (estimating) remaining resource of strengthened structures in operating conditions are presented. In addition, the reliability analysis of strengthened reinforced concrete structures, the state of the calculation of the actual reliability of the elements after reinforcement.

**The second section** is devoted to the development of methods and programs for experimental research of reinforced concrete bending and compressed-bending elements, reinforcement of which is performed by the most common methods, namely increasing the cross section of reinforcement, reinforcement and concrete (clamp). The presence of the load on the structure allows us to simulate the operation of the strengthened structure in accordance with the actual operating conditions and the device of the reinforcement. An integral part of the program of experimental research is the study of reinforcing bars (50 samples) and the common action of concrete of the existing and additional cross section of reinforced concrete structures; performed under load.

**The third section** presents the results of experimental research of bending and compressed-bending reinforced concrete elements: not strengthened and strengthened with additional reinforcement and additional reinforcement and concrete both (reinforced concrete jacket) with and without preloading during strengthening. On the example the strengthening method by making of reinforced concrete jacket, as the most difficult to perform and as a general case of strengthening of reinforced concrete structures by increasing the cross section, some results were presented. The stress-strain state of the strengthened reinforced concrete beams and columns can be divided into three stages. At the first stage, after the installation of the reinforced concrete jacket, the increase in the deformation of the main reinforcement was significantly reduced, as on additional reinforcement and concrete. The second stage starts with the achievement of yield strength in the stretched reinforcement of the main or additional bars. This was accompanied by an increase in the deformation of the main reinforcement and deflections. The third stage is failure.

**The fourth section** presents calculation methods of remaining strengthened reinforced concrete structures bearing capacity. An important difference between the calculation of the force model from code of DSTU B V.3.1-2: 2016 from the deformation model of calculation by DSTU B V.2.6-156: 2010 is that it does not allow to estimate the stress-strain state of the structure at any cross section layer and any stages but only in the limit state. According to the results of theoretical researches it is offered and experimentally confirmed that at maintenance of reliable anchoring of additional bars, common action of bars and concrete of the main and additional part of cross sections, we can recommend using as criterion of exhaustion of bearing capacity of complex cross section yield achievement of all reinforcing bars.

**The fifth section** describes the computer modeling of strengthened r/c beams in the application software, which were developed by the finite element method (FEM). Algorithms for creating a geometrical and physical model, a loading model of strengthened structure, which would reflect the real conditions of their operation and

reinforcement, are proposed. The beam finite-element model were developed in two software packages. The calculation was performed taking into account the physical nonlinearity of materials and their calculated physical and mechanical properties, which were introduced into the adopted of deformation relationship. A comparative analysis of the research results with the calculated values of the ultimate bending moments obtained in accordance with the calculations according to the design codes is performed. Satisfactory convergence of adjacent values was recorded.

**The sixth section** presents the results of development and testing of the proposed methods, as well as analysis of the obtained values of qualitative and quantitative indicators of reliability – reliability index  $\beta$  of bending and compressed-bending structures, strengthened by increasing the cross section of reinforcement, both reinforcement and concrete under load. The level of load acting at the time of strengthening is considered as an additional random value. Based on the analysis of the obtained values of reliability indexes  $\beta$  and probability of failure-free operation  $P(\beta)$  the approaches to determining the remaining resource of reinforced structures are proposed.

**Keywords:** reinforced concrete beam, column, strengthening, level of loading, reinforcing bars, composite strip, jacket, design method, reliability assessment, probability of failure-free operation, remaining resource.

Підписано до друку 06.04.2021 р.  
Формат 60×90 1/16. Папір офсетний.  
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 2,2. Обл.-видав. арк. 1,7.  
Тираж 100 прим. Зам. 210433.

Поліграфічний центр  
Видавництва Національного університету “Львівська політехніка”  
вул. Ф.Колесси, 4, 79013, Львів  
*Реєстраційне свідоцтво серії ДК № 4459 від 27.12.2012 р.*