

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ТИТАРЕНКО РОМАН ЮРІЙОВИЧ

Р. Титар.

УДК 624.012.45

**НАДІЙНІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК,
ПІДСИЛЕНИХ ПРИ ДІЇ НАВАНТАЖЕННЯ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Львів – 2019

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент

Хміль Роман Євгенович,

Національний університет «Львівська політехніка»,
доцент кафедри будівельних конструкцій та мостів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Семко Олександр Володимирович,

Полтавський національний технічний університет імені
Юрія Кондратюка, професор, завідувач кафедри
архітектури та міського будівництва;

кандидат технічних наук, доцент

Борисюк Олександр Павлович,

Національний університет водного господарства та
природокористування (м. Рівне), професор кафедри
промислового, цивільного будівництва та інженерних
споруд.

Захист відбудеться «02» квітня 2019 р., о 10⁰⁰, на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.17 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Карпінського, 6, ІІ навч. корпус, ауд. 212.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий: «01» березня 2019 р.

Учений 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 прогонових згинаних елементів будівель та споруд по всьому світу. На сьогоднішній день такі елементи знаходяться в експлуатації не менше 50...60 років і, як наслідок, дуже часто стають фізично й морально застарілими. Також багато інших чинників викликають необхідність у реконструкції або підсиленні існуючих будівель: зміна норм проектування у частині навантажень і впливів, зміна функціонального призначення, технологічного обладнання та ін. Виходячи з цього, ефективність використання різних методів підсилення залізобетонних згинаних елементів є однією із актуальних задач досліджень на даний час.

У свою чергу, ймовірнісні методи розрахунку будівельних конструкцій нині набувають все більшого розповсюдження, оскільки дозволяють проводити кількісну оцінку надійності конструкції (у вигляді показника ймовірності безвідмовної роботи), а також призначати гарантований рівень її надійності на стадії проектування. На жаль, станом на сьогодні, ймовірнісні методи в практиці розрахунку майже не використовують, беручи до уваги складність їх математичних апаратів, відсутність єдиної об'єктивної методики оцінки надійності, а також достатньої нормативної бази розрахунку (більшість стохастичних параметрів резерву несучої здатності конструкцій мають великі статистичні розкиди).

Дослідження впливу стохастичних параметрів резерву несучої здатності на загальний рівень надійності конструкції є також надзвичайно актуальною задачею на даний час. І якщо вплив таких стохастичних параметрів як геометричні розміри елементів та характеристики матеріалів (міцнісні, деформаційні і т.п.) для непідсилених конструкцій є достатньо добре вивчені за останній період, то рівень навантаження на конструкцію в момент підсилення – ні. Тому врахування та дослідження впливу цього параметру було однією з головних задач дисертаційної роботи. Додатково, імплементація нових норм для розрахунку залізобетонних конструкцій в практику проектування викликає необхідність апробування деформаційної моделі в розрізі надійнісного проектування.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-технічної проблеми дослідження надійності залізобетонних балок, підсилених при дії навантаження різними методами, а саме забезпечення необхідного рівня їх безвідмовної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає науковому напряму кафедри будівельних конструкцій та мостів Національного університету «Львівська політехніка». Дисертація виконана в межах науково-дослідної роботи «Теоретичні та експериментальні дослідження звичайних та попередньо напружених залізобетонних, металевих, дерев'яних та інших конструкцій будівель, споруд, мостів і фундаментів та методів їх підсилення» (номер державної реєстрації 0117U007366).

Метою роботи є розроблення принципів методик оцінки надійності непошкоджених прямокутних залізобетонних балок, підсилені різними методами при дії навантаження, які б відображали реальні умови експлуатації досліджуваних конструкцій. Принциповою особливістю методик є пропозиція врахування як стохастичного параметру рівня навантаження балок в момент підсилення, що дасть можливість максимально точно моделювати фактичний вплив усіх випадкових параметрів на резерв несучої здатності.

Досягнення поставленої мети передбачає реалізацію наступних **основних задач дослідження**:

- розробити принципові методики оцінки надійності (в частині безвідмовності) непошкоджених прямокутних залізобетонних балок, підсилені різними методами при дії навантаження, використовуючи при цьому дві моделі розрахункового перерізу підсилені балок: силову модель згідно з інженерною методикою та деформаційну модель згідно з чинними нормами проектування;

- для перевірки придатності запропонованих методик провести їх апробування на реальних залізобетонних балках, підсилені при дії навантаження різними схемами, і здійснити аналіз отриманих показників надійності – індексу надійності β та ймовірності безвідмовної роботи $P(\beta)$;

- оцінити рівень впливу стохастичної складової прийнятих в розрахунок параметрів резерву несучої здатності балок після підсилення, а також ефективність того чи іншого методу підсилення з точки зору забезпечення надійності конструкцій;

- розробити в програмному комплексі «МІРАЖ–2015» 3D кінцево-елементну модель підсилені балок та провести порівняльний аналіз отриманих результатів розрахунку величин граничних згинальних моментів з відповідними результатами, отриманими при розрахунку за нормами проектування;

- встановити значення часткових коефіцієнтів надійності ξ для розглянутих типів підсилені балок, надати практичні рекомендації щодо вибору найбільш раціональної методики оцінки надійності (в залежності від прийнятої моделі розрахункового перерізу конструкції) та забезпечення безвідмовності балок після підсилення.

Об'єктом дослідження є підсилення непошкоджених прямокутних залізобетонних балок при дії навантаження різними методами.

Предметом дослідження є надійність непошкоджених прямокутних залізобетонних балок після підсилення різними методами при дії навантаження.

Методи дослідження: математичні методи теорії надійності, теорії ймовірностей і математичної статистики при розробленні принципів методик розрахунку кількісних показників надійності (ймовірностей безвідмовної роботи) балок після підсилення, а також аналізі й оцінюванні точності отриманих результатів, методи натурного огляду, числові та аналітичні методи будівельної механіки та механіки твердого деформованого тіла (зокрема, метод кінцевих елементів) при створенні 3D кінцево-елементної моделі балок підсилені під навантаженням.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- розроблено принципові методики оцінки надійності (в частині безвідмовності) непошкоджених прямокутних залізобетонних балок, підсилених різними методами при дії навантаження;
- вперше визначено та включено в методику розрахунку надійності значення коефіцієнтів γ , які враховують діючий в момент підсилення рівень навантаження конструкції;
- отримано нові теоретичні результати розрахунку показників надійності (безвідмовності) згинаних залізобетонних елементів, підсилених різними методами при дії навантаження – індексів надійності β та ймовірності безвідмовної роботи $P(\beta)$;
- оцінено рівень впливу стохастичної складової прийнятих в розрахунок параметрів резерву несучої здатності балок після підсилення, а також ефективність того чи іншого методу підсилення на загальний рівень надійності конструкцій;
- удосконалено кінцево-елементні нелінійні моделі розрахунку залізобетонних згинаних елементів, підсилених різними методами при дії навантаження, з отриманням теоретичних результатів дослідження на згин;
- встановлено та запропоновано значення часткових коефіцієнтів надійності ξ , які рекомендується використовувати при розрахунку згинаних залізобетонних елементів, підсилених при дії навантаження, в розрізі забезпечення їх безвідмовності.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання розроблених принципових методик оцінки надійності при проектуванні залізобетонних згинаних елементів, підсилених різними методами при дії навантаження, зокрема, при закладанні їх проектних рівнів надійності. Запропоновані методики дають можливість з достатньо високою точністю оцінювати фактичну надійність таких елементів, в т.ч. кількісно – за допомогою встановлення ймовірностей безвідмовної роботи $P(\beta)$, забезпечуючи при цьому економічність та ефективність прийнятих конструктивних рішень з підсилення. В свою чергу, приведені в роботі значення часткових коефіцієнтів надійності ξ рекомендовано використовувати при розрахунку розглянутих типів згинаних залізобетонних елементів, підсилених при дії навантаження.

Отримані результати дослідження впроваджені при обстеженні конструкцій корпусу № 902 виробництва ВХіКС ММ, залізобетонних конструкцій естакади по кварталу № 1, залізобетонної естакади від ТЕЦ до ст. 215, естакади до корпусу 745 цеху паропостачання від ТОВ «Карпатнафтохім» (м. Калуш), а також при розрахунку перекриття багатоквартирного житлового будинку з вбудовано-прибудованими приміщеннями громадського призначення та підземним паркінгом (м. Львів, вул. Очеретяна, 29, 31, 31-А, 31-В) від ДП «Містопроєкт» (м. Львів).

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. В публікаціях у співавторстві здобувачеві належить: [1] – огляд технічної літератури по тематиці досліджень, аналіз методів оцінки надійності залізобетонних

конструкцій; [2] – аналіз особливостей оцінки надійності підсилених залізобетонних елементів; [3] – розробка пропозицій щодо прийняття в розрахунок основних стохастичних параметрів до аналітичної методики оцінювання надійності залізобетонних балок, підсилених додатковим армуванням; [4] – розробка принципів розрахунку надійності залізобетонних балок, підсилених додатковою стрижневою арматурою при дії навантаження; [5] – розробка методики оцінки надійності залізобетонних балок, підсилених залізобетонною обоймою; [6] – апробування принципової методики оцінки надійності залізобетонних балок, підсилених нарощуванням розтягнутої арматури при дії навантаження, адаптованої до національних норм проектування; [7] – аналіз особливостей оцінки надійності надійності підсилених залізобетонних елементів; [8] – аналіз попередніх досліджень надійності підсилених залізобетонних елементів; [9] – розробка рекомендацій щодо оцінки прогнозованої надійності підсилених балок; [10] – розробка принципової методики оцінки надійності залізобетонних балок, підсилених нарощуванням розтягнутої арматури при дії навантаження.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи представлені та обговорені на II міжнародній науково-практичній виставці-конференції молодих учених та студентів «Інновації у будівництві» (Луцьк, 2016 р.), на VI міжнародному молодіжному науковому форумі «Litteris et Artibus», GAC conference (Львів, 2016 р.), на VI міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (Харків, 2017 р.), на міжнародній науково-технічній конференції присвяченій пам'яті д.т.н., професора Клименка Федора Єлисейовича «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села» (Дубляни, 2018 р.), на II науково-практичній конференції «Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції» (Київ, 2018 р.), на IX міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (Рівне, 2018 р.), на семінарах кафедри «Будівельні конструкції та мости» Національного університету «Львівська політехніка» (2016 – 2018 рр.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи та результати досліджень опубліковані у 10 друкованих працях, серед них: 6 статей у наукових фахових виданнях України, з яких 2 включено в наукометричні бази даних, а також 4 тези доповідей всеукраїнських та міжнародних наукових конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел із 161 найменування та 3 додатків. Робота викладена на 200 сторінках машинописного тексту, у тому числі містить 133 сторінки основного тексту, 16 сторінок списку використаних джерел, 31 таблицю, 34 рисунки та 32 сторінки додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, показано її зв'язок з 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 по тематиці досліджень, а саме: представлено існуючі методи підсилення згинаних залізобетонних елементів, розглянуто вихідні положення сучасної теорії надійності будівель і споруд, виконано аналіз досліджень надійності непідсилених й підсилених залізобетонних конструкцій, проаналізовано стан питання розрахунку фактичних показників надійності згинаних елементів після підсилення, а також виокремлено ключові невирішені задачі і причини їх виникнення. Крім того, були розглянуті фундаментальні засади ймовірнісного підходу до розрахунку та основні методи оцінки надійності будівельних конструкцій, розроблені на даний час.

Причини, способи та робота залізобетонних згинаних конструкцій до і після підсилення проаналізовано у працях Є.М. Бабича, А.Я. Барашикова, З.Я. Бліхарського, О.П. Борисюка, Б.Г. Гнідця, А.Б. Голишева, В.С. Дорофєєва, Д.І. Дубіжанського, Блалі Ель Мостафи, В.М. Карпюка, В.Г. Кваші, С. Кім, А.П. Крамарчука, Д.Н. Лазовського, І.В. Мельника, Ф. Мінеллі, Н.М. Онуфрієва, С. Рафікі, Є.Р. Хіло та інших. Узагальнюючи приведені дані в цих роботах, можна стверджувати, що найбільш економічним та ефективним методом, враховуючи виконання конструктивно-технологічних вимог, є метод підсилення залізобетонних згинаних елементів наросуванням бетону в стиснутій зоні або встановленням додаткового армування в розтягнутій.

Розвиток методів оцінки надійності будівельних конструкцій різних видів, впровадження ймовірнісних підходів до їх розрахунку в практику проектування (з врахуванням статистичної природи міцнісних характеристик і параметрів навантаження), а також удосконалення й поширення математичної теорії надійності як науки пов'язані, в першу чергу, з іменами В.В. Болотіна, Д. Вела, Ф. Дюпрата, С. Зхенга, С.Дж. Квона, Р.І. Кінаша, О.В. Кічаєва, Є.В. Клименка, К.А. Корнелла, А.П. Кудзіса, А.І. Лантуха-Лященко, Х. Лоу, М. Майера, А.В. Махінька, Г.О. Медсена, В.А. Пашинського, А.В. Перельмутера, С.Ф. Пічугіна, В.Г. Пошивача, В.Д. Райзера, А.Р. Ржаніцина, М.В. Савицького, О.В. Семка, Н.С. Стрелецького, С.Б. Усаковського, Н.Ф. Хоціалова, В.С. Шмуклера, Г. Шпете та інших.

Враховуючи фактори суб'єктивності при підборі критеріїв забезпечення надійності, складності побудови математичних апаратів її розрахунку, а також контролю стохастичних параметрів резерву несучої здатності конструкцій, надійність підсилених залізобетонних елементів стала предметом досліджень у світі відносно недавно – з кінця ХХ століття. Серед інших, відзначимо роботи Р. Аль-Махаїді, С.Г. Альсаєда, Х.А. Барроса, О.П. Воскобійник, Б.Р. Еллінгвуда, Дж.Р. Касас, Е.М. Окейла, Н. Плевріса, П.О. Сунака та Е. Фер'єра в цьому напрямку.

На основі аналізу наведених вище робіт можна констатувати, що станом на сьогоднішній день практично відсутні дослідження надійності залізобетонних балок, підсилених при дії навантаження, а також не розроблено єдиної об'єктивної методики оцінки надійності таких конструкцій. Крім того, відсутність достатньої нормативної бази, що регулює принципи забезпечення надійності (більшість стохастичних параметрів резерву несучої здатності конструкцій мають великі статистичні розкиди) зумовлює потребу в апробуванні деформаційної моделі розрахунку міцності, згідно з чинними національними нормами проектування, в розрізі оцінки надійності згинаних залізобетонних елементів, підсилених під навантаженням.

Таким чином, виходячи з вищенаведеного, виникає необхідність більш глибокого вивчення критеріїв забезпечення надійності залізобетонних балок, підсилених різними методами при дії навантаження, а також розробки методики оцінки надійності таких конструкцій.

У **другому розділі** були сформульовані мета і основні задачі дисертаційної роботи, розглянуто передумови проведення та інструменти теоретичного дослідження, а також представлено поетапну розробку принципів методик оцінки надійності (в частині безвідмовності) балок, підсилених різними методами при дії навантаження.

Вихідними умовами для розробки методик стали наступні припущення:

- досліджувані балки не мають пошкоджень на момент підсилення;
- розглядається прямокутний переріз, нормальний до поздовжньої осі балки з недостатньою міцністю на згин;
- контрольовані міцнісні, деформативні й геометричні параметри резерву несучої здатності підсилених балок, а також їх рівня навантаження в момент підсилення є випадкові змінні, підпорядковані нормальному закону розподілу і взаємозалежні;
- оскільки змінюваність навантаження на конструкцію є часто мала порівняно зі змінюваністю тих же міцнісних, деформативних чи геометричних характеристик – значення згинального моменту від зовнішнього навантаження приймається детермінованим.

Розробка методик велась на основі силової та деформаційної розрахункових моделей нормального перерізу балок (при розрахунку їх несучої здатності), а також методу статистичної лінеаризації. Крім того, було адаптовано до залізобетонних конструкцій існуючу методику оцінки надійності, розроблену під керівництвом проф. С.Ф. Пічугіна, а також використано загальновідомі положення теорії ймовірностей і математичної статистики та рекомендації їх застосування до будівельних конструкцій.

Принциповою особливістю розроблених методик була пропозиція врахування як стохастичного параметру рівня навантаження досліджуваних балок в момент підсилення. Це дало можливість максимально точно змодельовати фактичний вплив випадкової природи усіх стохастичних параметрів на резерв несучої здатності конструкцій.

Програмою теоретичного дослідження було передбачено застосування для згинаних елементів наступних методів підсилення:

- нарощування розтягнутої сталевий стрижневої арматури (схема підсилення № 1);
- нарощування розтягнутої композитної арматури – вуглепластикової стрічки CFRP (схема підсилення № 2);
- влаштування залізобетонної обойми (схема підсилення № 3).

Розроблені методики дали можливість оперувати стохастичними міцнісними (бетон, арматурна сталь, вуглепластикові стрічки) й геометричними (розміри поперечного перерізу до і після підсилення) параметрами резерву несучої здатності, а також рівня навантаження (коефіцієнти використання додаткових перерізів стрижневої арматури, стрічки та бетону) балок в момент підсилення.

Крім того, для балок, підсиленних при дії навантаження нарощуванням розтягнутої стрижневої арматури та вуглепластикової стрічки CFRP були розроблені методики оцінки надійності, базовані на оперуванні стохастичними деформативними параметрами (бетон, арматурна сталь, вуглепластикові стрічки) – відповідно до деформаційної розрахункової моделі нормального перерізу за чинними національними нормами проектування.

Коефіцієнти D_x для визначення стандарту граничного згинального моменту $\hat{M}_{ult}$ (для всіх типів підсиленних балок) знаходились у вигляді часткових похідних функції $\bar{M}_{ult} = f(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n)$ за змінними $\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n$.

Стандарт граничного згинального моменту $\hat{M}_{ult}$, у свою чергу, обчислювався за наступною формулою:

$$\hat{M}_{ult} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [(D_{x_i} \hat{x}_i)^2]}, \quad (1)$$

тут коефіцієнт $D_{x_i} = \partial \bar{M}_{ult} / \partial \bar{x}_i$ (де $\bar{M}_{ult}$ – математичне сподівання граничного згинального моменту; $\bar{x}_i$ – математичне сподівання стохастичного параметра); $\hat{x}_i$ – стандарт стохастичного параметра.

Для оцінки надійності досліджуваних конструкцій визначалася характеристика безпеки β (індекс надійності), яка після адаптації формули, запропонованої А.Р. Ржаніцином, набула тут наступного вигляду:

$$\beta = (\bar{M}_{ult} - M_{ult}) / \hat{M}_{ult}, \quad (2)$$

де M_{ult} – несуча здатність нормального перерізу балки після підсилення.

Відповідно, ймовірність відмови $Q(\beta)$, а також ймовірність безвідмовної роботи $P(\beta)$ підсиленних балок (кількісна оцінка їх надійності) знаходились згідно з наступними виразами:

$$Q(\beta) = 0,5 - \Phi(\beta); P(\beta) = 0,5 + \Phi(\beta), \quad (3)$$

де $\Phi(\beta)$ – функція помилок (функція Лапласа).

Принципова блок-схема розрахунку показників для оцінки надійності (безвідмовності) на прикладі балки, підсиленої нарощуванням розтягнутої стрижневої арматури при дії навантаження, наведена на рис. 1.

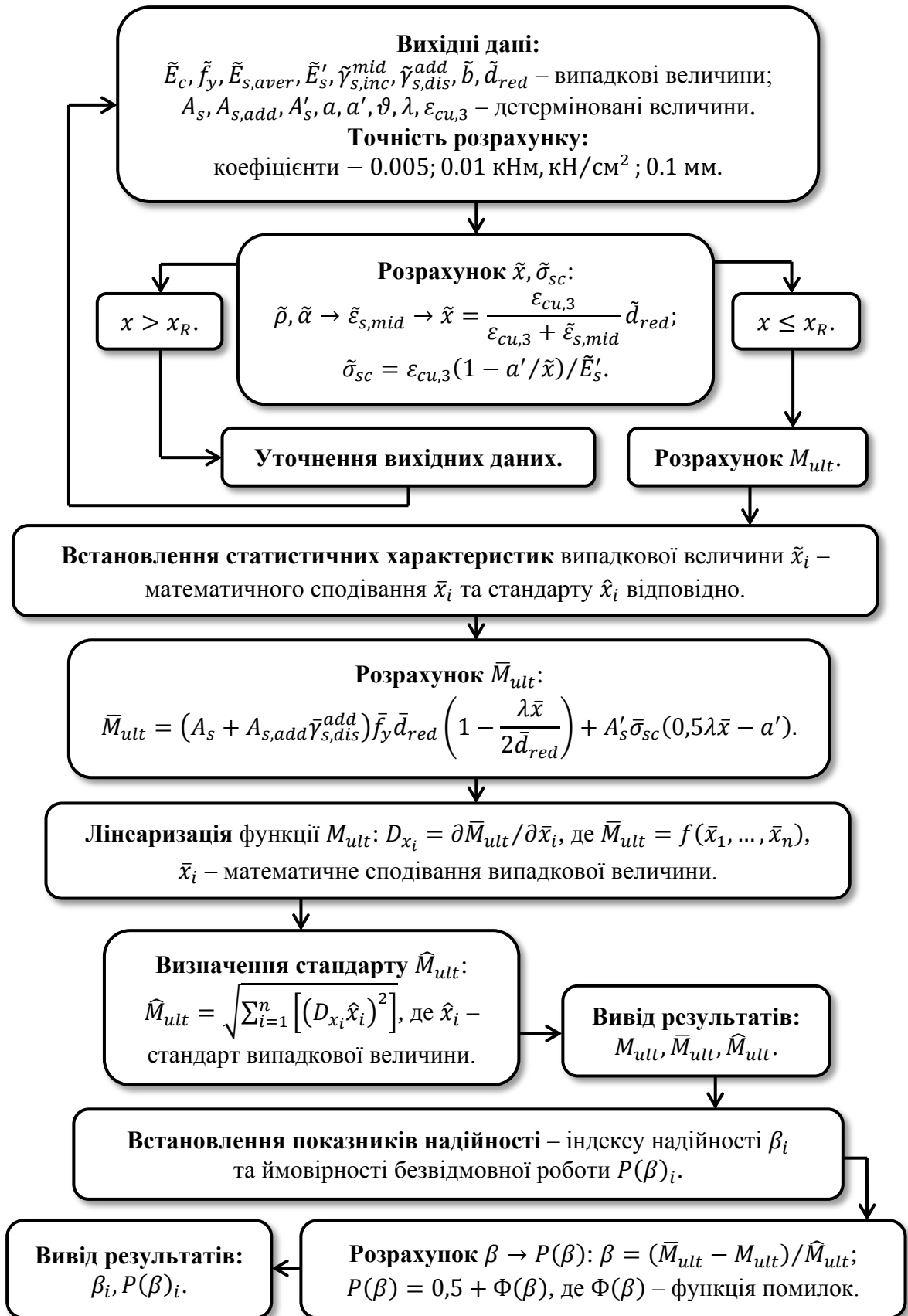


Рис. 1. Принципова блок-схема розрахунку показників для оцінки надійності (безвідмовності) нормального перерізу непошкодженого прямокутного залізобетонного згинаючого елемента, підсиленого наросуванням розтягнутої стрижневої арматури при дії навантаження.

У третьому розділі було наведено результати апробування запропонованих методик на реальних залізобетонних балках, підсилені різними методами при дії навантаження, а також виконано аналіз отриманих значень показників надійності – індексів надійності β та ймовірностей безвідмовної роботи $P(\beta)$ відповідно.

Розрахунок несучої здатності нормальних перерізів підсиленіх балок було проведено на основі даних експериментально-теоретичних досліджень, здійснених у лабораторіях Національного університету «Львівська політехніка».

Для оцінки надійності балки, підсиленої нарощуванням розтягнутої стрижневої арматури (схема підсилення № 1) було прийнято наступні випадкові параметри системи:

- міцність й деформативність бетону – $\tilde{f}_c, \tilde{E}_c$ відповідно;
- міцність й деформативність арматурної сталі – $\tilde{f}_y, \tilde{E}_s$ відповідно;
- рівень навантаження на балку при підсиленні – коефіцієнти $\tilde{\gamma}_{s,dis}^{add}$ та $\tilde{\gamma}_{s,inc}^{mid}$;
- ширину перерізу $\tilde{b}$;
- приведену корисну висоту перерізу після підсилення $\tilde{d}_{red}$.

Отримані значення показників надійності балок після підсилення – індексів надійності β і ймовірностей безвідмовної роботи $P(\beta)$ – зведено в табл. 1 та 2 відповідно ($M_{ult,0}$ – несуча здатність нормального перерізу непідсиленої балки).

Табл. 1.

Індекс надійності β_i

№	Арматура підсилення	Рівень навантаження на момент підсилення			
		$0,0M_{ult,0}$	$0,3M_{ult,0}$	$0,5M_{ult,0}$	$0,75M_{ult,0}$
1	Ø10 мм	3,70/3,41	3,71/3,41	3,68/3,39	3,65/3,37
2	Ø12 мм	3,73/3,46	3,72/3,43	3,69/3,41	3,67/3,38
3	Ø14 мм	3,77/3,49	3,74/3,46	3,73/3,44	3,70/3,41

Табл. 2.

Ймовірність безвідмовної роботи $P(\beta)_i$

№	Арматура підсилення	Рівень навантаження на момент підсилення			
		$0,0M_{ult,0}$	$0,3M_{ult,0}$	$0,5M_{ult,0}$	$0,75M_{ult,0}$
1	Ø10 мм	0,999892/ 0,999675	0,999896/ 0,999675	0,999883/ 0,999651	0,999869/ 0,999624
2	Ø12 мм	0,999904/ 0,999730	0,999900/ 0,999698	0,999888/ 0,999675	0,999879/ 0,999638
3	Ø14 мм	0,999918/ 0,999758	0,999908/ 0,999730	0,999904/ 0,999709	0,999892/ 0,999675

Примітка до табл. 1 та 2: перед похилою ризикою вказана величина, обчислена відповідно до силової моделі нормального перерізу, після ризику – деформаційної моделі нормального перерізу.

Значення коефіцієнтів $\bar{\gamma}_{s,dis}^{add}$ та $\bar{\gamma}_{s,inc}^{mid}$ (див. табл. 3) були знайдені для розрахунку за силовою та деформаційною моделями нормального перерізу підсиленої балки відповідно.

Табл. 3.

Математичні сподівання коефіцієнтів $\bar{\gamma}_{s,dis}^{add}$ та $\bar{\gamma}_{s,inc}^{mid}$

№	Арматура підсилення	Рівень навантаження на момент підсилення			
		$0,0M_{ult,0}$	$0,3M_{ult,0}$	$0,5M_{ult,0}$	$0,75M_{ult,0}$
1	Ø10 мм	1,000/1,000	0,905/1,035	0,835/1,060	0,760/1,090
2	Ø12 мм	1,000/1,000	0,870/1,060	0,790/1,100	0,685/1,155
3	Ø14 мм	1,000/1,000	0,850/1,080	0,760/1,135	0,645/1,215

Примітки: 1) перед похилою рискою наведена величина $\bar{\gamma}_{s,dis}^{add}$, після риски – $\bar{\gamma}_{s,inc}^{mid}$; 2) приведені значення заокруглені з точністю 0,005.

Для оцінки надійності балки, підсиленої вуглепластиковою стрічкою CFRP (схема підсилення № 2) було прийнято наступні випадкові параметри системи:

- міцність й деформативність бетону – $\tilde{f}_c$, $\tilde{E}_c$ відповідно;
- міцність й деформативність арматурної сталі – $\tilde{f}_y$, $\tilde{E}_s$ відповідно;
- міцність й деформативність композитної стрічки – $\tilde{\sigma}_f$, $\tilde{E}_f$ відповідно;
- рівень навантаження на балку при підсиленні – коефіцієнти $\tilde{\gamma}_{f,dis}$ та $\tilde{\gamma}_{f,inc}^{mid}$;
- ширину перерізу $\tilde{b}$;
- приведену корисну висоту перерізу після підсилення $\tilde{d}_{red}$.

Отримані значення показників надійності балок після підсилення – індексів надійності β і ймовірностей безвідмовної роботи $P(\beta)$ – зведено в табл. 4 та 5 відповідно ($M_{ult,0}$ тут – несуча здатність нормального перерізу непідсиленої балки).

Табл. 4.

Індекс надійності β_i

№	Стрічка CFRP	Рівень навантаження на момент підсилення			
		$0,0M_{ult,0}$	$0,25M_{ult,0}$	$0,5M_{ult,0}$	$0,75M_{ult,0}$
1	1,2x25 мм	3,52/3,27	3,44/3,19	3,38/3,14	3,30/3,06

Табл. 5.

Ймовірність безвідмовної роботи $P(\beta)_i$

№	Стрічка CFRP	Рівень навантаження на момент підсилення			
		$0,0M_{ult,0}$	$0,25M_{ult,0}$	$0,5M_{ult,0}$	$0,75M_{ult,0}$
1	1,2x25 мм	0,999784/ 0,999462	0,999709/ 0,999289	0,999638/ 0,999155	0,999517/ 0,998893

Примітка до табл. 4 та 5: перед похилою рискою вказана величина, обчислена відповідно до силової моделі нормального перерізу, після риски – деформаційної моделі нормального перерізу.

Значення коефіцієнтів $\bar{\gamma}_{f,dis}$ та $\bar{\gamma}_{f,inc}^{mid}$ (див. табл. 6) були знайдені для розрахунку за силовою та деформаційною моделями нормального перерізу балки після підсилення відповідно.

Табл. 6.

Математичні сподівання коефіцієнтів $\bar{\gamma}_{f,dis}$ та $\bar{\gamma}_{f,inc}^{mid}$

№	Стрічка CFRP	Рівень навантаження на момент підсилення			
		$0,0M_{ult,0}$	$0,25M_{ult,0}$	$0,5M_{ult,0}$	$0,75M_{ult,0}$
1	1,2x25 мм	1,000/1,000	0,780/1,140	0,650/1,240	0,490/1,395

Примітки: 1) перед похилою рискою наведена величина $\bar{\gamma}_{f,dis}$, після риски – $\bar{\gamma}_{f,inc}^{mid}$; 2) приведені значення заокруглені з точністю 0,005.

Для оцінки надійності балки, підсиленої залізобетонною обоймою (схема підсилення № 3) було прийнято наступні випадкові параметри системи:

- міцність бетону існуючої балки та обойми підсилення $\tilde{f}_c$;
- міцність арматурної сталі $\tilde{f}_y$;
- рівень навантаження на балку при підсиленні – коефіцієнти використання додаткового перерізу бетону $\tilde{\gamma}_{c,dis}^{add}$ та арматури $\tilde{\gamma}_{s,dis}^{add}$ відповідно;
- ширину перерізу до і після підсилення – $\tilde{b}$ та $(\tilde{b} + 2\tilde{b}_{add})$ відповідно;
- приведену корисну висоту перерізу після підсилення $\tilde{d}_{red}$.

Отримані значення показників надійності балок після підсилення – індексів надійності β , ймовірностей безвідмовної роботи $P(\beta)$, а також, для даної схеми підсилення, ймовірностей відмови $Q(\beta)$ – зведено в табл. 7, 8 та 9 відповідно ($M_{ult,0}$ тут – несуча здатність нормального перерізу непідсиленої балки).

Табл. 7.

Індекс надійності β_i

№	Арматура в обоймі	Рівень навантаження на момент підсилення				
		$0,0M_{ult,0}$	$0,3M_{ult,0}$	$0,5M_{ult,0}$	$0,7M_{ult,0}$	$0,9M_{ult,0}$
1	Ø8 мм	5,81	-	-	5,64	-
2	Ø10 мм	5,83	5,76	5,71	5,67	5,59
3	Ø12 мм	5,86	-	-	5,71	5,62

Табл. 8.

Ймовірність безвідмовної роботи $P(\beta)_i$

№	Арматура в обоймі	Рівень навантаження на момент підсилення				
		$0,0M_{ult,0}$	$0,3M_{ult,0}$	$0,5M_{ult,0}$	$0,7M_{ult,0}$	$0,9M_{ult,0}$
1	Ø8 мм	0,999999997	-	-	0,999999991	-
2	Ø10 мм	0,999999997	0,999999996	0,999999994	0,999999993	0,999999989
3	Ø12 мм	0,999999998	-	-	0,999999994	0,999999990

Табл. 9.

Ймовірність відмови $Q(\beta)_i$

№	Арматура в обіймі	Рівень навантаження на момент підсилення				
		$0,0M_{ult,0}$	$0,3M_{ult,0}$	$0,5M_{ult,0}$	$0,7M_{ult,0}$	$0,9M_{ult,0}$
1	Ø8 мм	$3,12 \times 10^{-9}$	-	-	$8,50 \times 10^{-9}$	-
2	Ø10 мм	$2,77 \times 10^{-9}$	$4,21 \times 10^{-9}$	$5,65 \times 10^{-9}$	$7,14 \times 10^{-9}$	$1,14 \times 10^{-8}$
3	Ø12 мм	$2,31 \times 10^{-9}$	-	-	$5,65 \times 10^{-9}$	$9,55 \times 10^{-9}$

Значення коефіцієнтів $\bar{\gamma}_{c,dis}^{add}$ та арматури $\bar{\gamma}_{s,dis}^{add}$ (див. табл. 10) були знайдені для розрахунку за силовою моделлю нормального перерізу балки після підсилення.

Табл. 10.

Математичні сподівання коефіцієнтів $\bar{\gamma}_{c,dis}^{add}$ та $\bar{\gamma}_{s,dis}^{add}$

№	Арматура в обіймі	Рівень навантаження на момент підсилення				
		$0,0M_{ult,0}$	$0,3M_{ult,0}$	$0,5M_{ult,0}$	$0,7M_{ult,0}$	$0,9M_{ult,0}$
1	Ø8 мм	1,000/1,000	-/-	-/-	0,210/0,535	-/-
2	Ø10 мм	1,000/1,000	0,445/1,16	0,355/0,84	0,240/0,520	0,075/0,17
3	Ø12 мм	1,000/1,000	-/-	-/-	0,255/0,525	0,075/0,16

Примітки: 1) перед похилою рискою наведена величина $\bar{\gamma}_{c,dis}^{add}$, після риски – $\bar{\gamma}_{s,dis}^{add}$; 2) приведені значення заокруглені з точністю 0,005.

На основі опрацювання цих результатів можна констатувати наступну закономірність: рівень надійності більшості балок зростав зі зменшенням рівня навантаження на момент підсилення, а також зі збільшенням відсотка розтягнутого армування перерізу після підсилення, що в свою чергу, пояснюється відносно незначними коефіцієнтами варіації V_s , V_f – для стрижневої арматури та композитної стрічки відповідно. Крім того, тут помітна ще одна закономірність: для балок, підсилених нарощуванням розтягнутої стрижневої арматури значення індексів надійності β знайдені на основі методики базованої на силовій розрахунковій моделі перерізу є завищені над результатами отриманими на основі методики базованої на деформаційній моделі на величину до 7,8 %; а для балок, підсилених композитною стрічкою – до 7,3 %. Тобто для оцінки надійності балок, підсилених нарощуванням розтягнутого армування при дії навантаження рекомендовано використовувати методику базовану на розрахунковій моделі нормального перерізу, що наведена у чинних національних нормах проектування залізобетонних конструкцій. Дана методика хоч і дає менше значення індексу надійності β_i , проте призводить до необхідності проектування більш надійної конструкції підсилення і, відповідно, досягнення вищого рівня надійності балки.

Під час апробування розроблених методик оцінки надійності було також досліджено рівень впливу випадкової природи проектних стохастичних параметрів резерву несучої здатності, які мають місце в реальних умовах

підсилення, на загальну оцінку надійності балок, а саме: міцність й деформативність матеріалів, параметри геометрії поперечного перерізу до і після підсилення, а також, що важливо, рівень навантаження в момент підсилення. Більше того, аналізуючи залежності (1) для знаходження стандартів $\hat{M}_{ult}$ стало очевидним те, що найменший вплив на рівень надійності підсилених балок мають такі параметри резерву їх несучої здатності як міцність і деформативність стиснутої арматури, а також ширина поперечного перерізу. Тому при подальших дослідженнях надійності підсилених залізобетонних згинаних елементів даними параметрами (за достатньої точності розрахунку) рекомендовано знехтувати.

У **четвертому розділі** описано чисельне моделювання роботи підсилених балок у програмному комплексі «МІРАЖ–2015», виконано порівняльний аналіз отриманих результатів з результатами, знайденими на основі розрахунку за нормами проектування, здійснено оцінку ефективності методів підсилення (в розрізі очікуваних рівнів надійності), запропоновано часткові коефіцієнти надійності для балок, підсилених різними схемами при дії навантаження, а також подано ряд рекомендацій щодо забезпечення безвідмовності (експлуатаційної надійності) таких конструкцій.

Використання нелінійного процесора ПК «МІРАЖ–2015», призначеного для розв’язання та аналізу фізично й геометрично нелінійних задач покроковим шляхом, дало можливість вирішити ряд наступних завдань, а саме:

- створення теоретичних моделей прямокутних залізобетонних балок, підсилених різними методами при дії навантаження;
- порівняння значень параметрів напружено-деформованого стану балки на кожному етапі завантаження (отриманих на основі розрахунку за нормами проектування та в програмному комплексі відповідно).

Для дослідження напруженого стану підсилених балок на кожному етапі завантаження в ПК «МІРАЖ–2015» було розроблено їх кінцево-елементні моделі. Розрахунок, у свою чергу, проводився із урахуванням фізичної нелінійності матеріалів, а також їх розрахункових фізико-механічних властивостей, які вводилися в прийняті закони деформування.

За результатами розрахунку отримано деформовані схеми, мозаїки переміщень та епюри згинальних моментів для всіх схем підсилення і рівнів навантаження досліджуваних балок. Аналіз отриманих результатів підтвердив, що руйнування конструкцій проходило внаслідок текучості розтягнутого армування (за першою групою граничних станів) – відповідно до результатів теоретичних розрахунків у розділі 3.

Виконано порівняльний аналіз одержаних значень граничних згинальних моментів M_{ult} із відповідними теоретичними значеннями, отриманими на основі розрахунку за нормами проектування, на основі якого було зафіксовано задовільну збіжність між значеннями граничних згинальних моментів – розбіжність склала 1,4...14,1 % за критичним навантаженням (в сторону завищення результатів, отриманих на основі розрахунку в ПК «МІРАЖ–2015»).

На основі аналізу рекомендацій норм ДБН В.1.2-14-2009, які регулюють принципи забезпечення надійності нових проектних конструкцій, а також

результатів попередніх досліджень, які пропонують діапазони значень для індексів надійності β від 4,27 до 4,75 (клас наслідків СС2) та від 3,7 до 4,4 (нормальна вартість супровідних заходів безпеки) відповідно – отримані в дисертаційній роботі значення індексів надійності β і ймовірності безвідмовної роботи $P(\beta)$, для всіх методів підсилення балок, можна вважати такими, що носять рекомендаційний характер, оскільки вони наближаються до значень, що відповідають середньому та високому рівням надійності згідно з розглянутими класифікаціями.

Графіки залежностей індексу надійності β_i від рівня навантаження на момент підсилення та відсотка розтягнутого армування в перерізі після підсилення зображено на рис. 2, 3.

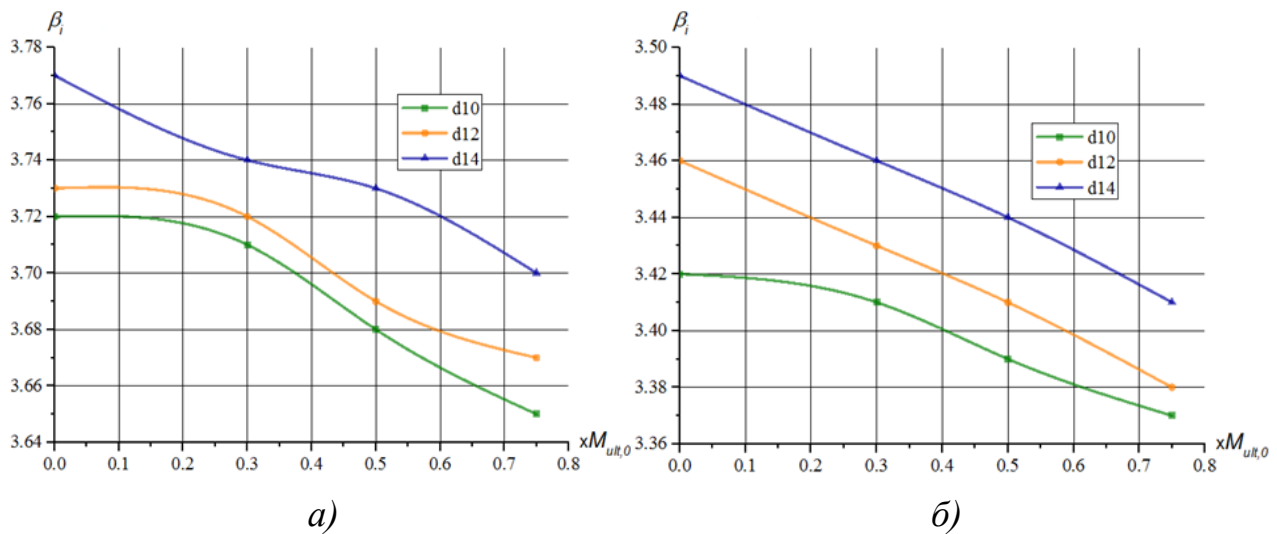


Рис. 2. Залежність «рівень навантаження в момент підсилення ($\times M_{ult,0}$) – індекс надійності (β_i)» для балки, підсиленої нарощуванням розтягнутої стрижневої арматури:
а) силова модель перерізу; б) деформаційна модель перерізу

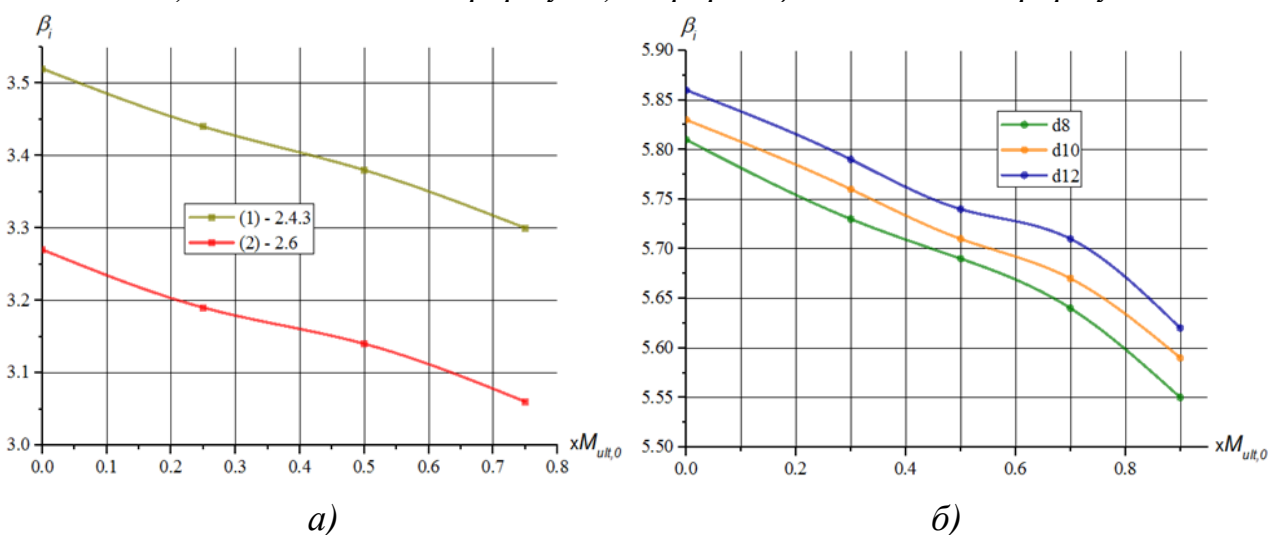


Рис. 3. Залежність «рівень навантаження в момент підсилення ($\times M_{ult,0}$) – індекс надійності (β_i)» для балки, підсиленої вуглепластиковою стрічкою (а) (крива (1) – силова модель перерізу, крива (2) – деформаційна) та залізобетонною обоймою (б)

Встановивши математичні сподівання $\bar{M}_{ult}$ й стандарти $\hat{M}_{ult}$ граничних згинальних моментів, а також індекси надійності β для всіх схем підсилення відповідно, було також обчислено та запропоновано значення часткових коефіцієнтів надійності ξ (див. табл. 11–13), які рекомендується використовувати при розрахунку розглянутих типів підсилених балок в розрізі забезпечення їх гарантованого експлуатаційного терміну служби.

Табл. 11.

Частковий коефіцієнт надійності ξ_i для балок,
підсилених нарощуванням розтягнутої стрижневої арматури

№	Арматура підсилення	Рівень навантаження на момент підсилення			
		$0,0M_{ult,0}$	$0,3M_{ult,0}$	$0,5M_{ult,0}$	$0,75M_{ult,0}$
1	Ø10 мм	1,18/1,17	1,18/1,18	1,19/1,18	1,20/1,19
2	Ø12 мм	1,17/1,16	1,18/1,17	1,18/1,18	1,19/1,18
3	Ø14 мм	1,16/1,16	1,17/1,16	1,18/1,17	1,18/1,18

Табл. 12.

Частковий коефіцієнт надійності ξ_i для балок,
підсилених вуглепластиковою стрічкою

№	Стрічка CFRP	Рівень навантаження на момент підсилення			
		$0,0M_{ult,0}$	$0,25M_{ult,0}$	$0,5M_{ult,0}$	$0,75M_{ult,0}$
1	1,2x25 мм	1,18/1,17	1,18/1,18	1,19/1,18	1,20/1,19

Табл. 13.

Частковий коефіцієнт надійності ξ_i для балок,
підсилених залізобетонною обоймою

№	Арматура в обоймі	Рівень навантаження на момент підсилення				
		$0,0M_{ult,0}$	$0,3M_{ult,0}$	$0,5M_{ult,0}$	$0,7M_{ult,0}$	$0,9M_{ult,0}$
1	Ø8 мм	1,25	-	-	1,28	-
2	Ø10 мм	1,25	1,26	1,26	1,27	1,28
3	Ø12 мм	1,24	-	-	1,27	1,28

Примітка до табл. 11 та 12: перед похилою ризикою вказана величина, обчислена відповідно до силової моделі нормального перерізу, після ризику – деформаційної моделі нормального перерізу.

Виходячи із запропонованих значень індексів надійності β та отриманих на їх основі часткових коефіцієнтів надійності $\xi = 1,16...1,28$ для всіх схем підсилення (на основі двох розрахункових моделей нормального перерізу), а також беручи до уваги рекомендації норм ДБН В.1.2-14-2009, які регулюють принципи забезпечення надійності будівельних конструкцій щодо орієнтовного терміну експлуатації нових проектних конструкцій будівель і споруд різного призначення, гарантований експлуатаційний термін служби згинаних залізобетонних елементів, підсилених при дії навантаження (моделювання реальних умов роботи), можна забезпечити на рівні $T_{ef} = 60$ років (як для нових конструкцій виробничих споруд).

Наприкінці розділу, на основі апробування та аналізу розроблених принципових методик оцінки надійності, було також розроблено рекомендації щодо забезпечення безвідмовності (експлуатаційної надійності) непошкоджених прямокутних залізобетонних балок, підсилені різними методами при дії навантаження.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено методики оцінки надійності (в частині безвідмовності) непошкоджених прямокутних залізобетонних балок, підсилені за допомогою нарощування розтягнутої стрижневої арматури, композитної стрічки, а також влаштування залізобетонної обойми при дії навантаження, принциповою особливістю яких є пропозиція врахування як стохастичного параметру рівня навантаження балок в момент підсилення.

2. Запропоновані методики дали можливість оперувати стохастичними міцнісними (бетон, арматурна сталь, композитна стрічка), деформативними (бетон, арматурна сталь), геометричними (розміри поперечного перерізу до і після підсилення) параметрами резерву несучої здатності, а також рівнем навантаження балок на момент підсилення.

3. При апробуванні розроблених методик були отримані якісні та кількісні показники надійності балок після підсилення – індекси надійності β та ймовірності безвідмовної роботи $P(\beta)$ відповідно. Так, для індексів надійності β діапазон усіх одержаних значень склав 3,06...5,86, а для ймовірностей безвідмовної роботи $P(\beta)$ – 0,998893...0,999999998. На основі рекомендацій національних норм, які регулюють принципи забезпечення надійності нових проектних конструкцій, а також результатів попередніх досліджень було встановлено рекомендативний характер отриманих результатів показників надійності для розглянутих типів підсилених балок.

4. Метод підсилення за допомогою влаштування залізобетонної обойми з розтягнутою стрижневою арматурою – найбільш ефективний метод підсилення балок при дії навантаження. При використанні даного методу забезпечуються найвищі показники надійності $\beta = 5,59...5,86$ балок після підсилення, за рахунок збільшення висоти стиснутої зони бетону над верхньою гранню перерізу існуючої балки.

5. Для оцінки надійності балок, підсилені різними методами при дії навантаження рекомендовано використовувати методику базовану на деформаційній розрахунковій моделі нормального перерізу, що наведена у чинних нормах проектування залізобетонних конструкцій. Варто відмітити, що хоч дана методика і дає менше значення індексу надійності β_i (для підсилень нарощуванням стрижневою арматурою та композитною стрічкою – в середньому до 8 % при порівнянні з інженерною методикою), проте призводить до необхідності проектування більш надійної конструкції підсилення і, відповідно, досягнення вищого загального рівня надійності балки.

6. Порівняльний аналіз результатів дослідження несучої здатності та напруженого стану балок після підсилення, отриманих при розрахунку в ПК

«МІРАЖ–2015», з результатами розрахунку граничних згинальних моментів ідентичних конструкцій, отриманих за нормами проектування, показав задовільну збіжність між значеннями – розбіжність склала 1,4...14,1 % за критичним навантаженням. Таким чином, сформовані в програмному комплексі 3D фізично нелінійні кінцево-елементні моделі балок, підсилені різними методами при дії навантаження, придатні для застосування в реальній практиці моделювання розглянутих у роботі типів згинаних залізобетонних конструкцій.

7. Розроблено рекомендації щодо забезпечення параметрів гарантованої експлуатаційної надійності (в тому числі безвідмовності) непошкоджених прямокутних залізобетонних згинаних елементів, підсилені різними методами при дії навантаження, а також запропоновано значення часткових коефіцієнтів надійності $\xi = 1,16...1,28$, які рекомендується використовувати при інженерному розрахунку таких конструкцій (в розрізі забезпечення їх гарантованого експлуатаційного терміну служби відповідно до ДБН В.1.2-14-2009, що регулюють принципи забезпечення надійності нових конструкцій).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. 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. *(Особистий внесок автора: огляд технічної літератури по тематиці досліджень, аналіз методів оцінки надійності залізобетонних конструкцій).*

2. Хміль Р. Є. Особливості оцінювання надійності підсилені залізобетонних елементів / Р. Є. Хміль, Р. Ю. Титаренко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2016. – Вип. 63. – С. 91–97. *(Особистий внесок автора: аналіз особливостей оцінки надійності підсилені залізобетонних елементів), (НМБД Index Copernicus).*

3. Титаренко Р. Ю. Основні стохастичні параметри при оцінюванні надійності залізобетонних балок, підсилені додатковим армуванням / Р. Ю. Титаренко, Р. Є. Хміль // Вісник Національного університету «Львівська політехніка», серія «Теорія і практика будівництва». – 2017. – № 877. – С. 206–211. *(Особистий внесок автора: розробка пропозицій щодо прийняття в розрахунок основних стохастичних параметрів до аналітичної методики оцінювання надійності залізобетонних балок, підсилені додатковим армуванням).*

4. Титаренко Р. Ю. Принципи оцінки надійності залізобетонних балок, підсилені 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. *(Особистий внесок автора: розробка принципів розрахунку надійності залізобетонних балок, підсилені додатковою стрижневою арматурою при дії навантаження).*

5. 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. *(Особистий внесок автора: розробка методики оцінки надійності залізобетонних балок, підсилених залізобетонною обоймою).*

6. 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. Vegera. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 5, No. 7 (95). – P. 32–42. *(Особистий внесок автора: апробування принципової методики оцінки надійності залізобетонних балок, підсилених нарощуванням розтягнутої арматури при дії навантаження, адаптованої до національних норм проектування), (НМБД Scopus).*

Тези доповідей всеукраїнських та міжнародних наукових конференцій:

7. Хміль Р.Є. Надійність підсилених залізобетонних елементів / Р.Є. Хміль, Р.Ю. Титаренко // II міжнародна науково-практична виставка-конференція молодих учених та студентів «Інновації у будівництві», Луцьк, 20–22 жовтня 2016 р.: Тези доповідей. – Луцьк: ЛНТУ, 2016. (посилання на ел. джерело: <https://sites.google.com/site/innovations2016conf/tezy-dopovidej>). *(Особистий внесок автора: аналіз особливостей оцінки надійності підсилених залізобетонних елементів).*

8. Khmil R. Reliability Evaluation of Strengthened Reinforced Concrete Members / R. Khmil, R. Tytarenko // VI Міжнародний молодіжний науковий форум «Litteris et Artibus», Львів, 24–26 листопада 2016 р.: Матеріали. – Львів, 2016. – С. 136–137. *(Особистий внесок автора: аналіз попередніх досліджень надійності підсилених залізобетонних елементів).*

9. Титаренко Р. Ю. Проектування підсилених залізобетонних балок із заданим рівнем надійності / Р.Ю. Титаренко, Р.Є. Хміль // 6-а Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті», Харків, 19–21 квітня 2017 р.: Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ, 2017. – С. 166–168. *(Особистий внесок автора: розробка рекомендацій щодо оцінки прогнозованої надійності підсилених залізобетонних балок).*

10. Хміль Р. Є. Надійність залізобетонних балок, підсилених нарощуванням розтягнутої арматури при дії навантаження / Р.Є. Хміль, Р.Ю. Титаренко // 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 автора: розробка принципової методики оцінки надійності залізобетонних балок, підсилених нарощуванням розтягнутої арматури при дії навантаження).*

АНОТАЦІЯ

Титаренко Р. Ю. Надійність залізобетонних балок, підсиленних при дії навантаження. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди». – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, 2018. – 200 с.

Дисертаційна робота присвячена розробленню принципів методик оцінки надійності непошкоджених прямокутних залізобетонних балок, підсиленних за допомогою нарощування розтягнутої стрижневої арматури та композитної стрічки, а також влаштування залізобетонної обойми при дії навантаження, принциповою особливістю яких є пропозиція врахування як стохастичного параметру рівня навантаження балок в момент підсилення.

На основі силової та деформаційної розрахункових моделей нормального перерізу розроблені методики апробовані на реальних залізобетонних балках, підсиленних при дії навантаження. Отримано рекомендаційні значення показників надійності досліджуваних конструкцій – індексу надійності та ймовірності безвідмовної роботи. Запропоновано значення часткових коефіцієнтів надійності для інженерного розрахунку розглянутих типів підсилених балок.

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

АННОТАЦИЯ

Титаренко Р. Ю. Надежность железобетонных балок, усиленных при воздействии нагрузки. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения». – Львов: Национальный университет «Львовська політехніка», Министерство науки и образования Украины, 2018. – 200 с.

Диссертационная работа посвящена разработке принципиальных методик оценки надежности неповрежденных прямоугольных железобетонных балок, усиленных наращиванием растянутой стержневой арматуры и композитной ленты, а также устройством железобетонной обоймы при воздействии нагрузки, принципиальной особенностью которых является предложение учета как стохастического параметра уровня нагрузки балок в момент усиления.

На основе силовой и деформационной расчетных моделей нормального сечения разработанные методики были апробированы на реальных балках, усиленных при воздействии нагрузки. Получены рекомендательные значения показателей надежности исследуемых конструкций – индекса надежности и вероятности безотказной работы. Предложено значение частных коэффициентов надежности для инженерного расчета рассмотренных типов усиленных балок.

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

ABSTRACT

Tytarenko R. Yu. Reliability of reinforced concrete beams, strengthened under load. – On the rights of manuscript.

The thesis for earning the scientific Candidate's degree in Technical Sciences (PhD) on specialty 05.23.01 «Building Constructions, Buildings and Structures». – Lviv: Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, 2018. – 200 p.

The thesis is devoted to developing of the principle methods for reliability assessment of intact rectangular reinforced concrete beams, strengthened by adding of stretched reinforcing bars and composite tape, as well as of reinforced concrete jacket under the action of load, the principal feature of which is the proposal to consider as a stochastic parameter of the level of loading of beams at the moment of strengthening.

The calculation of the bearing capacity of the normal sections of reinforced beams was performed on the basis of experimental and theoretical studies, that performed at the laboratory of the Department of Building Structures and Bridges at the Lviv Polytechnic National University.

On the basis of power and deformation calculation models of the normal section, the developed methods have been tested on real reinforced concrete beams, strengthened under the action of load. The recommended values of the reliability indicators of the investigated constructions are obtained – reliability indexes and probabilities of failure-free operation, respectively. Thus, for reliability indexes, the range of values was from 3.06 to 5.86, and for the probability of failure-free operation $P(\beta)$ from 0.998893 to 0.999999998 (towards increasing the reliability level at the larger percent of reinforcement and decreasing at the increment of load level at the moment of strengthening). The discrepancy between identical values of indexes found in accordance with engineering and deformation models of calculation was about 8 %.

The values of partial reliability coefficients – from 1,16 to 1,28 for all methods of strengthening – for the engineering calculation of the considered types of reinforced beams is proposed, in terms of providing their guaranteed service life in accordance with national norms governing the principles of ensuring the reliability of new design constructions.

In addition, the obtained results of reliability study make it possible to operate with those variable parameters that have the maximum influence on variance of the limiting bending moment of beams studied with sufficient accuracy of calculation.

The developed principal methods for assessing reliability make it possible to design strengthened reinforced concrete bending elements with the assigned level of reliability (efficiency of solutions) β probability of failure-free operation. Finally, the obtained results allow to choice the most effective strengthening method.

Keywords: reinforced concrete beam, strengthening, level of loading, reinforcing bars, composite tape, jacket, stochasticity, reliability assessment, probability of failure-free operation, method.