

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет “Львівська політехніка”

**КРАЇНСЬКИЙ ПАВЛО ІВАНОВИЧ**



УДК 624.012.54

**МІЦНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СТИСНУТО-  
ЗІГНУТИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ПІДСИЛЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННОЮ  
ОБОЙМОЮ ПРИ ДІЇ НАВАНТАЖЕННЯ**

05.23.01–будівельні конструкції, будівлі та споруди

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів–2016

Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Бліхарський Зіновій Ярославович,**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
директор інституту будівництва та інженерії довкілля.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Савицький Микола Васильович,**  
Придніпровська державна академія будівництва та  
архітектури, проректор із наукової роботи;

кандидат технічних наук, доцент  
**Фамуляк Юрій Євгенович,**  
Львівський національний аграрний університет, доцент  
кафедри технології та організації будівництва.

Захист відбудеться «1» квітня 2016 р. о 13:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.17 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Карпінського, 6, II навч. корпус, ауд. 212.

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

Автореферат розіслано «29» лютого 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради, к.т.н., доц.



П.Ф. Холод

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В Україні багато будівель і споруд промислового та цивільного секторів уже вичерпали свій розрахунковий термін експлуатації або наближаються до нього. Водночас, агресивне виробниче середовище багатьох підприємств, механічні пошкодження та несвоєчасне усунення набутих дефектів спричиняють гостру потребу в підсиленні окремих елементів чи конструкцій загалом. Разом з фізичним зношуванням, потребу в реконструкції або підсиленні спричиняють нові вимоги до експлуатації існуючих будівель чи споруд. Потреби у прибудові, надбудові чи просторовому переплануванні виникають у сфері як цивільного, так і промислового будівництва. Конструктивні елементи старої забудови часто не відповідають вимогам нових нормативних документів із підвищеними вимогами щодо безпечної експлуатації будівель та споруд.

Залізобетонні конструкції займають велику частку у сфері будівельної продукції впродовж останніх 50-70 років. Більшість промислових будівель в Україні, а також значна частина житлових споруджені зі збірних залізобетонних конструкцій. В наш час залізобетон теж інтенсивно використовується як конструктивний матеріал, проте акцент перемістився зі збірних елементів на монолітний залізобетон. За даними Держслужби статистики України за перші три квартали 2015 р. реалізовано 1,345 млн. м<sup>3</sup> бетону у вигляді збірних конструкцій та 7,614 млн. м<sup>3</sup> бетонної суміші для монолітних конструкцій.

Під час розробки проектів підсилення будівельних конструкцій доводиться враховувати низку додаткових факторів, котрі не виникають під час проектування нових конструкцій. До цих факторів належать: допущені відхилення від проекту під час будівництва, пошкодження та деформації, отримані впродовж експлуатації, зміна конструктивної схеми елемента, реальний напружено-деформований стан конструкції на момент підсилення, залишкова міцність матеріалів конструкцій, що підсилюються, умови сумісної роботи з елементами підсилення та ін. Точність врахування цих факторів впливає на економічність проектних рішень та забезпечить надійність відроджених конструкцій.

У практиці виконання робіт із підсилення будівельних конструкцій рідко трапляється можливість повністю зняти корисне навантаження на конструкцію, таким чином залишивши тільки постійне навантаження від власної ваги. Перед проектантом може стояти завдання підсилення як розвантаженої конструкції, так і елементів під навантаженнями. Саме тому з'являється потреба у пошуку надійних методів розрахунку та прогнозування напружено-деформованого стану підсилених конструкцій із урахуванням навантаження на елемент під час підсилення. Існуючі норми проектування підсилення конструкцій передбачають врахування діючого навантаження, якщо його величина перевищує 65% розрахункового, шляхом введення коефіцієнтів умов роботи матеріалів. Проте такий підхід не дозволяє точно визначити параметри напружено-деформованого стану елемента після підсилення.

Тому тема дисертації є актуальною і має важливе прикладне й наукове значення, оскільки орієнтована на розв'язання конкретного наукового завдання шляхом експериментальних та теоретичних досліджень залізобетонних стиснуто-зігнутих елементів, підсилених за дії навантаження різних рівнів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана згідно з тематикою наукових досліджень кафедри будівельних конструкцій та мостів Національного університету «Львівська політехніка»: «Теоретичні та експериментальні дослідження звичайних та попередньонапружених залізобетонних, металевих, дерев'яних та інших конструкцій будівель, споруд, мостів і фундаментів та методів їх підсилення з урахуванням різних видів армування, бетонування, способів та інтенсивності навантаження, дії агресивного середовища, підвищених температур», а також держбюджетної теми: «Розроблення методик визначення несучої здатності та деформативності залізобетонних конструкцій зміцнених новітніми матеріалами за дії навантаження» (номер державної реєстрації 0115U000436).

**Мета дослідження** – експериментально-теоретичні дослідження параметрів несучої здатності, деформативності та тріщиностійкості залізобетонних стиснуто-зігнутих елементів із урахуванням їхнього напружено-деформованого стану під час підсилення залізобетонною обоймою за дії навантаження.

**Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити такі завдання:**

- провести експериментальні дослідження несучої здатності, деформативності та тріщиностійкості залізобетонних колон, підсилених залізобетонними обоймами за дії навантаження різних рівнів;

- виконати розрахунок за деформаційною моделлю досліджуваних конструкцій відповідно до чинних норм проектування з пропозиціями щодо методики врахування напружено-деформованого стану колони в момент підсилення;

- виконати аналіз і порівняння отриманих експериментальних та теоретичних результатів досліджень із метою оцінки запропонованої методики розрахунку підсилених залізобетонних колон.

**Об'єкт дослідження** – стиснуто-зігнуті залізобетонні колони прямокутного поперечного перерізу, підсилені залізобетонною обоймою.

**Предмет дослідження** – напружено-деформований стан залізобетонних колон у момент підсилення та його вплив на несучу здатність і експлуатаційну придатність конструкції після підсилення.

**Методи дослідження:** передбачено експериментальні випробування зразків залізобетонних колон на позацентровий стиск у лабораторних умовах, із застосуванням обладнання, що дозволяє виконати підсилення колони залізобетонною обоймою за дії навантаження. Виконання розрахунків на основі чинних нормативних документів із застосуванням деформаційної моделі та реальних діаграм деформування матеріалів дослідних конструкцій.

**Наукова новизна отриманих результатів роботи:**

- отримано нові експериментально-теоретичні результати, які характеризують напружено-деформований стан залізобетонних колон, підсилених залізобетонними обоймами за дії навантаження різних рівнів;

- визначено характер впливу рівня діючого на колону навантаження у момент підсилення на параметри несучої здатності та експлуатаційної придатності конструкції після підсилення;

- набула подальшого розвитку методика оцінки напружено-деформованого стану залізобетонних колон прямокутного поперечного перерізу за деформаційною

моделлю, підсилених залізобетонною обіймою, із урахуванням діючого на колону навантаження в момент підсилення;

– запропоновано враховувати у розрахунку впливи другого порядку через додатковий ексцентриситет  $e_2$ , визначений через вигин колони методом номінальної кривизни.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в можливості використання результатів роботи при проектуванні залізобетонних стиснуто-зігнутих елементів конструкцій, підсилених залізобетонною обіймою при дії навантаження. Результати роботи дають змогу з достатньою точністю оцінювати параметри несучої здатності та експлуатаційної придатності елемента, тим самим забезпечивши економічність рішень з підсилення.

#### **Упровадження результатів роботи.**

Основні результати роботи впроваджено у навчальний процес Національного університету "Львівська політехніка" у вигляді розділів у лекційних курсах для студентів базових напрямків підготовки „Будівництво та цивільна інженерія” і „Пожежна безпека”.

Окремі положення дисертаційної роботи впроваджено при проведенні робіт із визначення технічного стану та розробці рекомендацій щодо реконструкції та підсилення залізобетонних конструкцій корпусу №902 ТОВ "КАРПАТНАФТОХІМ" (м. Калуш).

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні наукові положення, результати та висновки дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно.

У публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: проаналізовано сучасний стан досліджень підсилення залізобетонних конструкцій, зокрема конструкцій, підсилених за дії навантаження [1], запропоновано методика розрахунку залізобетонних стиснуто-зігнутих елементів прямокутного перерізу, підсилених залізобетонною обіймою при дії навантаження [2], розроблено методика уточнення показів мікроіндикаторів годинникового типу для уникнення систематичних похибок під час вимірюванні деформацій матеріалів [3], отримано дані експериментальних досліджень несучої здатності та експлуатаційної придатності підсилених залізобетонною обіймою колон за дії навантаження, що відповідає частково та повністю розвантаженим конструкціям [4, 6, 7], конструкціям під повним експлуатаційним навантаженням та конструкціям, що підсилюються перед вичерпанням несучої здатності [5, 6].

Представлені в цій роботі експериментальні й теоретичні дослідження виконані за безпосереднього сприяння й участі к.т.н., доцента Р.Є. Хміля.

**Апробація результатів дисертації.** Результати та основні положення дисертаційної роботи були озвучували й обговорювали на наукових семінарах кафедри будівельних конструкцій та мостів Національного університету "Львівська політехніка" упродовж 2013-2015 рокаів.

Основні результати дисертації були були представлені й обговорювалися на таких конференціях: XIV Міжнародна наукова конференція Львів-КошицеЖешув «Актуальні проблеми будівництва та інженерії довкілля» (м. Львів, 03-05.09.13), VIII міжнародна науково-технічна конференція «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (м. Рівне, 13-16.10.14), Scientific Conference

«Current Issues of Civil and Environmental Engineering and Architecture» RzeszówLviv-Kosice (Rzeszow, 9-10.09.15), Міжнародна конференція «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (м. Одеса, 13-15.10.15).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 7 статей, зокрема 5 наукових публікацій у спеціалізованих фахових виданнях України та 2 публікації у закордонних періодичних виданнях.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 132 найменувань, одного додатка. Повний обсяг дисертації становить: 152 сторінки, 81 ілюстрація, 16 таблиць, один додаток на 4 сторінках, 132 використаних літературних джерел на 15 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано її актуальність, показано зв'язок із науковими програмами, сформульовано мету й завдання дослідження, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, впровадження та апробацію результатів роботи, її загальну характеристику.

У **першому розділі** виконано огляд методів підсилення залізобетонних стиснуто-зігнутих елементів, проведено аналіз результатів експериментальних досліджень несучої здатності підсилених залізобетонних колон, зокрема підсилених за дії навантаження, розглянуто методи розрахунку стиснуто-зігнутих елементів.

Питанням обстеження й підсилення будівельних конструкцій, дослідженню залізобетонних елементів при різноманітних силових впливах присвячені роботи багатьох дослідників: Т.Н. Азізова, Є.М. Бабича, А.М. Бамбури, А.Я. Барашикова, З.Я. Бліхарського, С.В. Бондаренка, А.А. Гвоздьова, Б.Г. Гнідця, А.Б. Голишева, В.С. Дорофєєва, В.Г. Кваші, Ф.Є. Клименка, О.А. Коковина, Д.В. Кочкарьова, Г.Х. Масюка, Я.М. Немировського, А.М. Павлікова, І.Є. Прокоповича, М.В. Савицького, Ю.Є. Фамуляка, П.Ф. Холода, Р.Є. Хміля, Шмуклера В.С. та ін.

Методи підсилення залізобетонних конструкцій широко описані в літературних джерелах і успішно застосовуються на практиці. Аналіз сучасного стану досліджень підсилення стиснуто-зігнутих залізобетонних елементів засвідчує, що залізобетонні обойми, як варіант підсилення у вигляді нарощування перерізу, застосовуються в разі потреби суттєвого підвищення несучої здатності елемента. При цьому залізобетонні обойми є ефективними як за переважаючої дії стискуючих зусиль, так і за переважаючої дії згинальних моментів.

Сьогодні широко досліджуються методи підсилення залізобетонних конструкцій з використанням сучасних композитних матеріалів. Мала вага та високі характеристики міцності сучасних композитів сприяють їх широкому впровадженню у будівельну практику. Проте, спосіб підсилення залізобетонних конструкцій за допомогою залізобетонних обойм має ряд суттєвих переваг. По-перше, застосування залізобетонних обойм можливе при підсиленні як пошкоджених конструкцій, так і конструкцій без наявного пошкодження матеріалів. По-друге, залізобетонні обойми не вимагають додаткових робіт із вогнезахисту чи корозійного захисту. По-третє, методи влаштування залізобетонних обойм та

включення елементів підсилення в сумісну роботу з конструкцією добре відомі. Крім цього, внаслідок підсилення стиснуто-зігнутих елементів залізобетонними обоймами можна досягнути значного підвищення несучої здатності та експлуатаційної придатності конструкції за різних комбінацій силових впливів.

Необхідно зауважити, що проектування підсилених залізобетонних конструкцій відрізняється від проектування нових конструкцій. Складений переріз елемента після підсилення матиме різні фізико-механічні властивості матеріалів, а також різний напружено-деформований стан, оскільки в момент включення в роботу елементів підсилення в основному перерізі конструкції можуть виникати напруження та деформації, величина яких залежить від силових впливів, що діяли на конструкцію в момент підсилення.

Із набуттям чинності нових норм проектування залізобетонних конструкцій ДСТУ Б В.2.6-156:2010 розрахунок виконується з урахуванням реальних діаграм деформування бетону й арматурної сталі. Основні принципи розрахунку залізобетонних конструкцій на основі деформаційної моделі з використанням реальних діаграм деформування матеріалів сформульовані в роботах Є.М. Бабича, В.Н. Байкова, А.М. Бамбури, А.Я. Барашикова, А.Б. Голишева, В.С. Дорофєєва, М.І. Карпенка, А.М. Павлікова, С.І. Рогового, О.В. Семка, В.С. Шмуклера, О.Ф. Яременка та ін. Алгоритм розрахунку НДС залізобетонних конструкцій на основі деформаційної моделі має достатнє обґрунтування, проте рекомендацій щодо його застосування для підсилених конструкцій є мало, тому подальше вивчення напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних конструкцій є актуальним.

**У другому розділі** наведено програму та методику експериментальних досліджень залізобетонних стиснуто-зігнутих елементів, підсилених залізобетонною обоймою за дії навантаження різних рівнів.

Програма експериментальних досліджень включає випробування 12 залізобетонних колон. Перші два зразки залізобетонних колон були контрольними, тобто випробовувались без підсилення. Випробування виконували на позacentровий стиск короткочасним навантаженням до руйнування. За результатами випробування контрольних зразків визначено фактичні параметри несучої здатності та експлуатаційної придатності дослідних колон. Відповідно до визначеної несучої здатності контрольних зразків ( $N_{u(K)}$ ) визначено рівні навантаження перед підсиленням наступних 10 зразків. Обрані рівні навантаження відповідали 0.0, 0.3, 0.5, 0.7 та  $0.9N_{u(K)}$ . Дослідні колони було виготовлено у заводських умовах із одного замісу бетону. Геометричні розміри та фізико-механічні характеристики матеріалів усіх колон однакові. Для визначення фізико-механічних характеристик матеріалів під час виготовлення колон було відібрано зразки арматурної сталі та заформовано бетонні куби й призми. Армуння колон симетричне, у вигляді 4 арматурних стержнів  $\varnothing 12$  мм, використано клас бетону C25/30.

Параметри залізобетонних обійм підсилення всіх зразків однакові. Єдиним змінним параметром у цьому експериментальному дослідженні є рівень навантаження, за якого виконано підсилення дослідного зразка. Конструкцію експериментальних колон наведено на рис. 1.

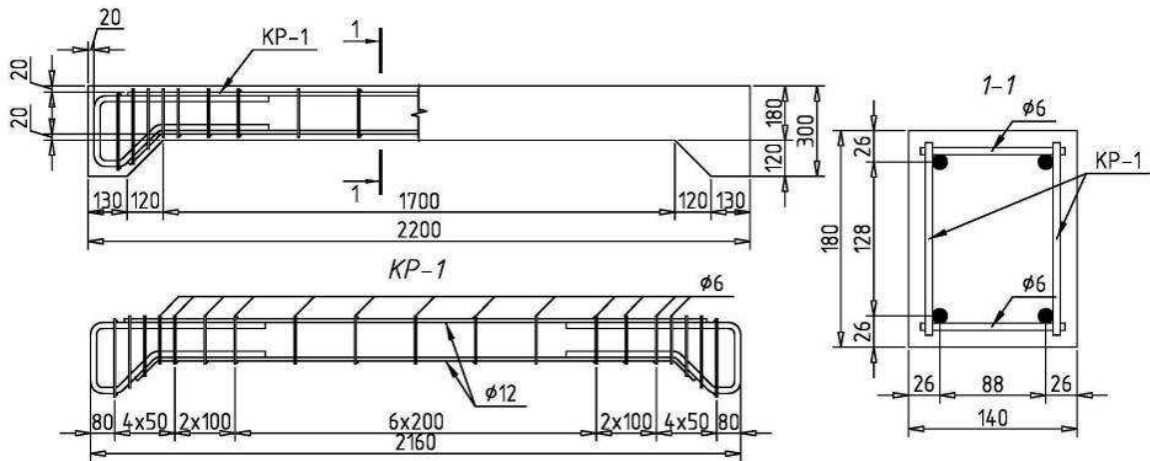


Рис. 1. Опалубне креслення та армування дослідних колон

Підсилення залізобетонних колон проводили шляхом влаштування залізобетонної обойми на ділянці між консолями колон довжиною 1700 мм. Геометричні розміри перерізу обойми підсилення визначалися відповідно до конструктивних вимог забезпечення захисного шару арматури та умов бетонування. Армування обойми підсилення симетричне, у вигляді 4 арматурних стержнів Ø10 мм. Бетонну суміш для формування залізобетонних обійм запроєктовано того самого класу міцності, що й бетон колон – С25/30. Конструкція обойми підсилення наведена на рис. 2.

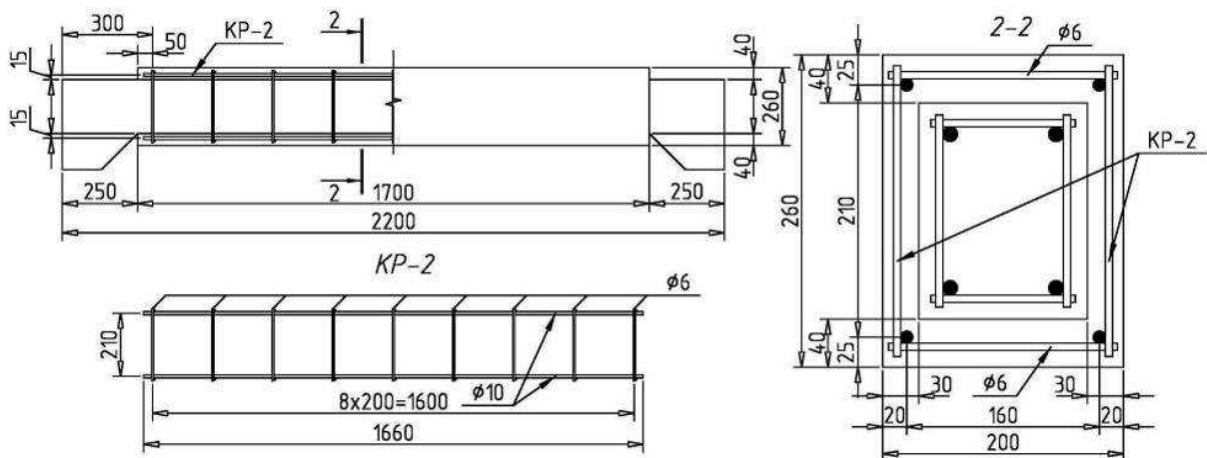


Рис. 2. Опалубне креслення та армування обойми підсилення

Під час влаштування залізобетонних обійм виконували відбір зразків армування та формували зразки бетону для визначення їхніх фізико-механічних характеристик. Результати визначення характеристик матеріалів дослідних колон наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

**Фізико-механічні характеристики матеріалів дослідних колон**

Арматура колони Ø 12 мм				Арматура обойми 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)	$f_{cm,cube}$ (МПа)	$f_{cm,prism}$ (МПа)	Клас
636,9	0,00302	0,048	211	610,7	0,00291	0,070	210	38,0	28,3	C25/30



Колони випробовували на позацентричний стиск. Ексцентриситет прикладання стискаючого зусилля становив 150 мм для всіх зразків. Закріплення колони на кінцях – шарнірне. У процесі навантаження фіксували деформації армування та бетону основного й додаткового перерізів підсиленних колон, вигини зразків по довжині, а також відстежували утворення та розвиток тріщин, вимірюючи ширину їхнього розкриття.

Процес випробування підсиленних колон складався з 3 етапів. На першому етапі виконували навантаження колони до відповідного рівня перед підсиленням та фіксували навантаження на період проведення робіт із підсилення. На другому етапі виконували підсилення зразка у вигляді залізобетонної обойми та залишали підсилену конструкцію під навантаженням на період набирання міцності бетону обойми (28 діб). На третьому етапі продовжували випробування вже підсиленої колони до руйнування.

У процесі випробування першого підсиленого зразка КП-03-0,0 відбулося його руйнування внаслідок розколювання консольної частини колони (рис. 3а). Руйнування відбулося під навантаженням 237,3 кН. Щоб уникнути цього явища у подальших дослідженнях було запроєктовано підсилення консольної ділянки колон у вигляді знімної металевої обойми. Роботу цього підсилення апробовано на вже пошкодженому зразку КП-03-0,0. Для цього приконсольні ділянки колони було звільнено від залізобетонної обойми на довжину 250 мм, виконано монтаж металевих обойм на обох консолях, об'єднано поздовжню арматуру залізобетонної обойми з металевими обоймами підсилення приварюванням арматурних стержнів  $\varnothing 10$  мм та відновлено залізобетонну обойму до попередніх розмірів (рис. 3б).

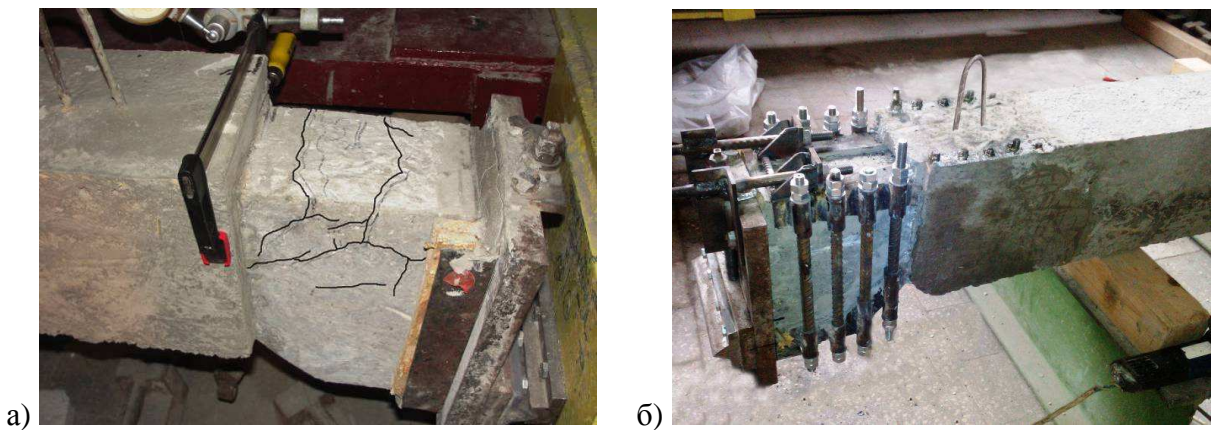


Рис. 3. Руйнування консольної частині колони КП-03-0,0:  
а) розколювання бетону; б) влаштування металевої обойми

При подальшому випробуванні колона КП-03-0,0 зруйнувалася по нормальному перерізу під навантаженні 480,53 кН. При цьому на консольних ділянках не спостерігалось утворення нових тріщин, розкриття існуючих тріщин чи інших ознак руйнування. На основі досвіду випробування зразка КП-03-0,0 було прийнято рішення застосовувати металеві обойми на консолях при випробуванні всіх наступних підсиленних колон. Таке рішення дозволило не тільки підсилити консольні ділянки дослідних колон, а й забезпечити надійне включення у роботу арматури обойми підсилення.

У третьому розділі подано результати експериментальних досліджень стиснуто-зігнутих залізобетонних колон: контрольних і підсилених залізобетонними обоймами за дії навантаження різних рівнів.

Напружено-деформований стан підсилених залізобетонною обоймою колон при випробуванні короткочасним навантаженням на позacentровий стиск 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 колони. Друга стадія починається з моменту, коли деформації в розтягненій арматурі обох перерізів досягають межі текучості. При цьому в колон рівнів підсилення  $0.0$ ,  $0.3$  та  $0.5N_{u(K)}$  спочатку наставала текучість додаткового, а потім основного армування, а в зразків рівнів  $0.7$  та  $0.9N_{u(K)}$  навпаки, спочатку наставала текучість основної, а потім додаткової арматури. Після досягнення обох шарів розтягнутого армування деформацій текучості наставала втрата рівноваги між зовнішнім навантаженням та внутрішніми зусиллями у перерізі колони. У момент втрати рівноваги колони досягали своєї несучої здатності, після чого спостерігалися значні прирости деформацій та вигину колон при поступовому зниженні прикладеного навантаження. Третя стадія – фізичне руйнування. Фізичне руйнування колон підсилених за дії навантаження рівнів  $0.0$ ,  $0.3$ ,  $0.5$  та  $0.7N_{u(K)}$  відбувалося в наслідок роздроблення бетону стисненої зони обойми, а колон рівня підсилення  $0.9N_{u(K)}$  через одночасний розрив обох шарів розтягнутого армування та роздроблення бетону стисненої зони обойми. Характер руйнування окремих дослідних колон представлено на рис. 4.

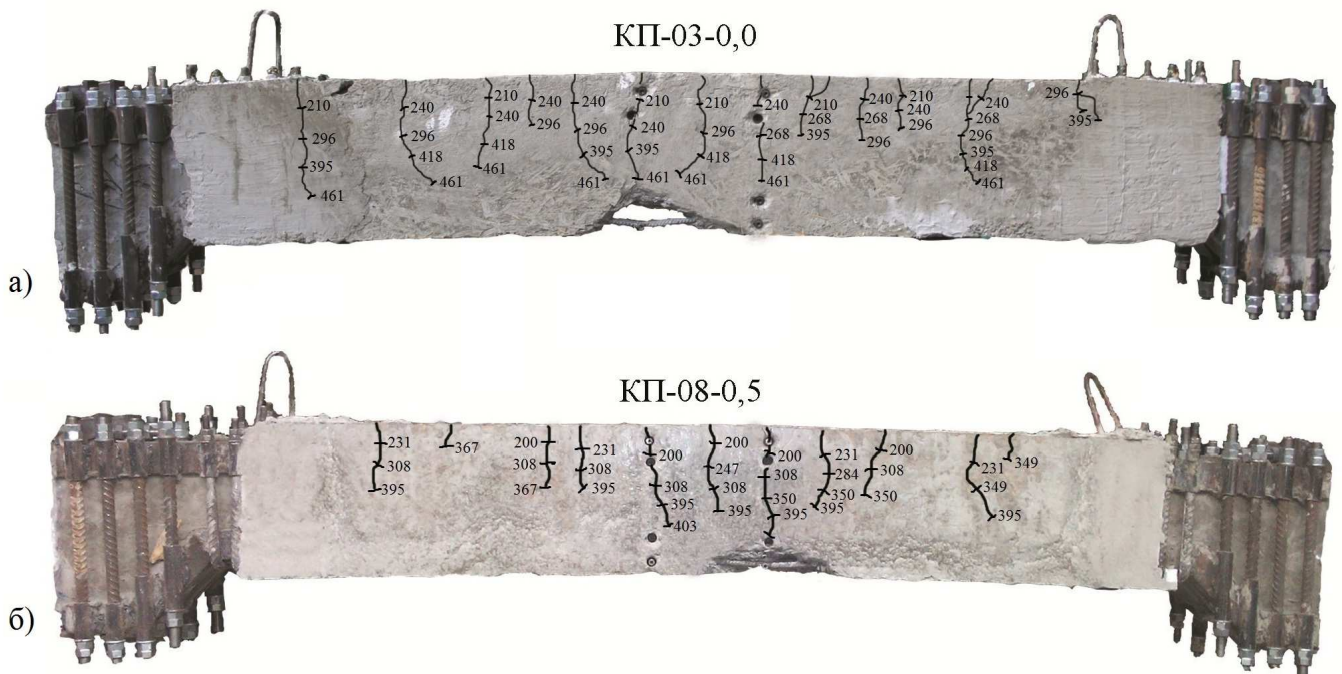


Рис. 4. Типовий характер руйнування підсилених колон:

- а) колона підсилена без навантаження;
- б) колона підсилена за дії навантаження рівня  $0.5N_{u(K)}$

Критерій вичерпання несучої здатності був однаковий для всіх дослідних колон – втрата рівноваги між зовнішніми та внутрішніми зусиллями. Втрата рівноваги відповідає максимуму на графічних залежностях деформацій найбільш стиснутої фібри бетону від зовнішнього навантаження. Для колон підсилених за дії навантаження рівнів 0.0, 0.3 та  $0.5N_{u(K)}$  максимальних деформацій стиску зазнали крайні фібри бетону обойми. У випадку колон підсилених за дії навантаження рівнів 0.7 та  $0.9N_{u(K)}$  крайні стиснуті фібри бетону колон зазнали значних деформацій до моменту підсилення. Деформації крайніх фібр бетону обойми не перевищили сумарних деформацій фібр бетону колони, хоч і отримували більші прирости на кожному етапі навантаження. Результати визначення несучої здатності дослідних колон подані у таблиці 2.

Таблиця 2

**Експериментальна несуча здатність дослідних колон**

Колона	Навантаження перед підсиленням, $N_{str}$ (кН)		Вичерпання несучої здатності, $N_u$ (кН)		Приріст несучої здатності	
	зразка	середнє	зразка	середнє	зразка	середній
К-01	-	-	176,52	174,56	-	-
К-02	-		172,60		-	
КП-03-0,0	0	0	480,53	474,93	175%	172%
КП-04-0,0	0		469,33		169%	
КП-05-0,3	50,99	52,78 ( $0,30 \cdot N_{u(K)}$ )	460,91	465,62	164%	167%
КП-06-0,3	54,56		470,33		169%	
КП-07-0,5	88,26	84,05 ( $0,48 \cdot N_{u(K)}$ )	451,11	442,52	158%	155%
КП-08-0,5	79,83		437,93		151%	
КП-09-0,7	122,58	124,52 ( $0,71 \cdot N_{u(K)}$ )	421,69	430,28	142%	146%
КП-10-0,7	126,45		438,86		151%	
КП-11-0,9	147,10	149,18 ( $0,85 \cdot N_{u(K)}$ )	392,86	397,51	125%	128%
КП-12-0,9	151,26		402,15		130%	

Максимальне підвищення несучої здатності отримали колони підсилені без дії навантаження (рівень  $0.0 \cdot N_{u(K)}$ ). Ефект підсилення склав 172%. При наявності навантаження перед підсиленням ефект від підсилення зменшувався на 5%, 17%, 25% та 44% відповідно для рівнів 0.0, 0.3, 0.5, 0.7 та  $0.9N_{u(K)}$ . Найменший ефект – 128% – отримали колони рівня  $0.9 \cdot N_{u(K)}$ .

Як зазначалося 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, при якому починалася текучість основного та додаткового шарів армування дослідних колон (рис. 5, табл. 3).

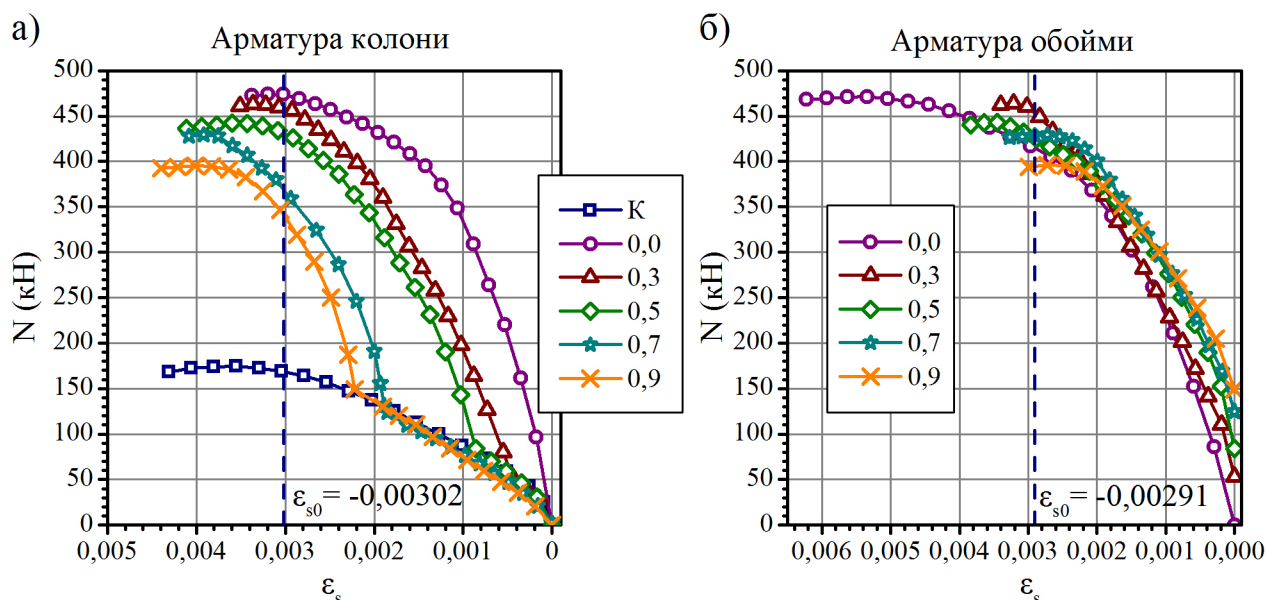


Рис. 5. Графіки деформування арматури дослідних колон:

- а) графіки деформування арматури основного перерізу (колон);  
 б) графіки деформування розтягнутої арматури додаткового переізу (обойм)

Таблиця 3

**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)		$N_u - \max(N_y; N_{y,add})$ $N_u$
		зразка	середнє	зразка	середнє	
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		

За даними таблиці 3 бачимо, що найбільша розбіжність між несучою здатністю та навантаженням при текучості розтягнутого армування становить 3,6% (колон К-01 та К-02), а найменша – 0,2% (зразки КП-03-0,0 та КП-04-0,0). Це підтверджує вищезгадане твердження, що втрата рівноваги між зовнішніми та внутрішніми зусиллями відбувається після текучості обох шарів розтягнутого армування.

За отриманими результатами вигину дослідних зразків виконано аналіз експлуатаційної придатності колон за допустимим вигином (рис. 6). Критерієм втрати експлуатаційної придатності було досягнення граничного вигину  $f_u = l/150 = 14,7$  мм відповідно до ДСТУ Б В.1.2-3:2006 "Прогини і переміщення".

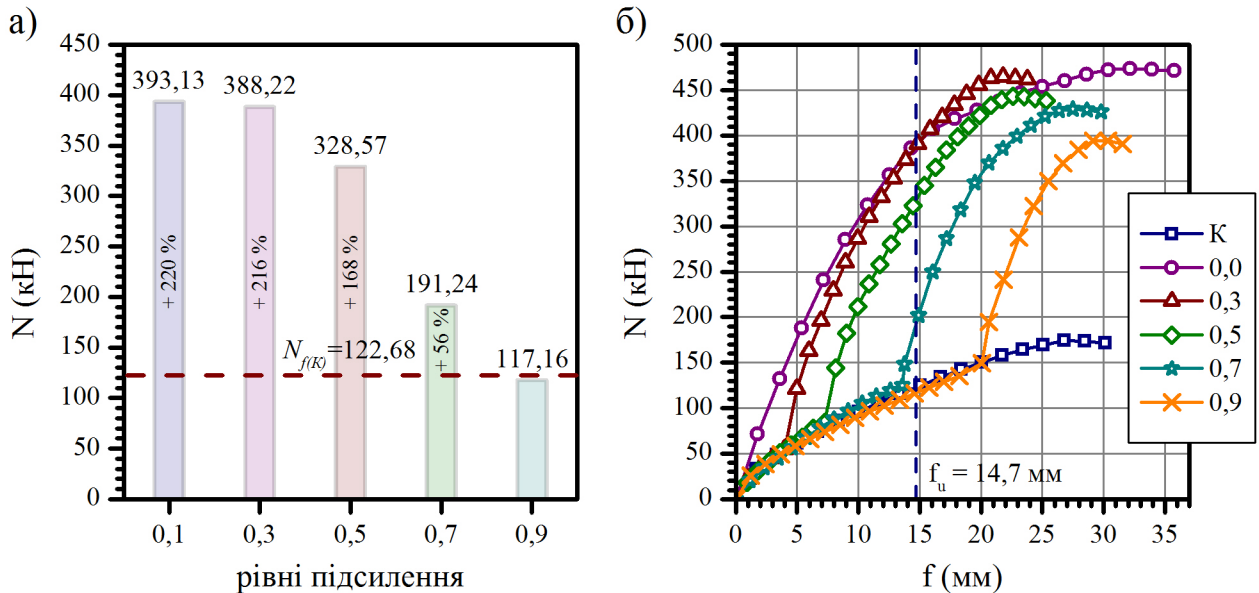


Рис. 6. Результати експериментальної експлуатаційної придатності колон за граничним вигином: а) ефекти підвищення експлуатаційної придатності; б) графіки вигину дослідних колон

Максимальне підвищення експлуатаційної придатності за граничним вигином отримали колони підсилені без дії навантаження (рівень  $0,0 \cdot N_{u(K)}$ ), а саме 220%. Із наявністю рівня навантаження при підсиленні ефект від підсилення зменшувався (рис. 6). Підсилення зразків рівня  $0,9 \cdot N_{u(K)}$  відбувалося коли вигин колон уже перевищував гранично допустимий.

Втрату експлуатаційної придатності колони за граничною шириною розкриття тріщин прийнято вважати навантаження  $N_w$  при якому тріщини досягали ширини розкриття  $w_{max} = 0,3$  мм (відповідно до ДСТУ Б В.2.6-156:2010 табл. 5.1). Результати, необхідні для аналізу експлуатаційної придатності за тріщиностійкістю дослідних колон, представлено на рис. 7.

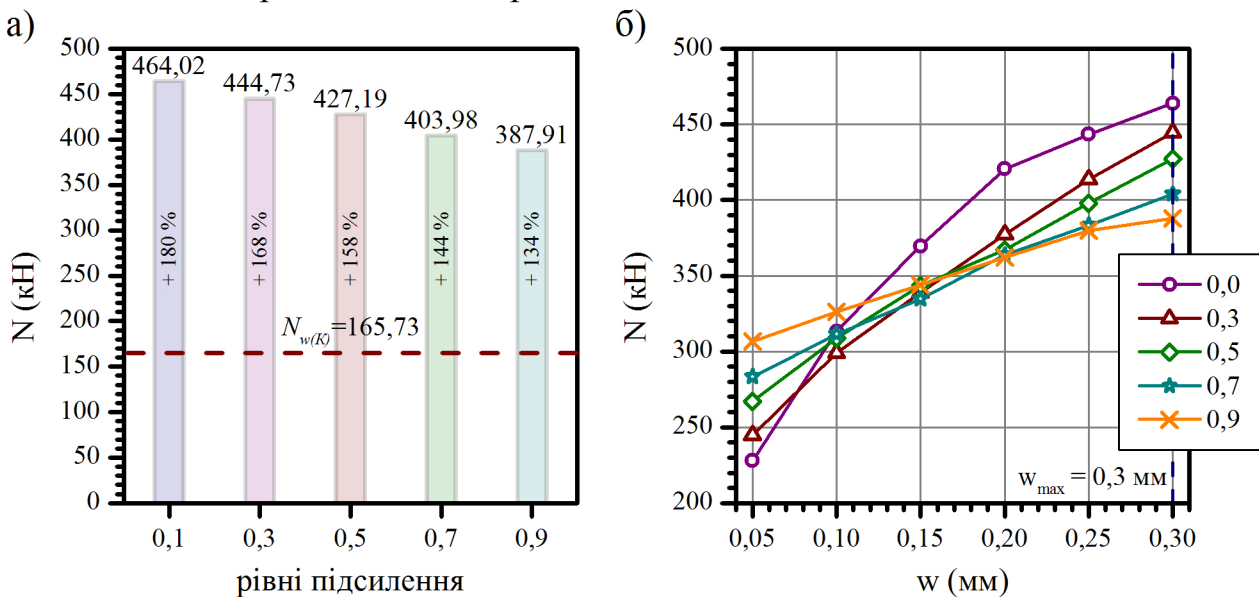


Рис. 7. Експлуатаційна придатність колон за граничною шириною розкриття тріщин: а) ефекти підвищення експлуатаційної придатності; б) графіки розвитку ширини розкриття тріщин дослідних колон

Максимального підвищення експлуатаційної придатності за граничними тріщинами величиною у 180% досягнули зразки підсилені без дії навантаження (рівень  $0.0 \cdot N_{u(K)}$ ), а мінімального (134%) – колони підсилені за дії навантаження рівня  $0.9 \cdot N_{u(K)}$ . Як видно з рис. 7, перші тріщини шириною розкриття 0,05 мм найшвидше з'являються у обоймі колон підсилених без дії навантаження, проте гранична ширина тріщин 0,3 мм у цих зразках досягається найпізніше, порівняно з рештою дослідних зразків. Простежується така закономірність: що більший рівень навантаження перед підсиленням, то пізніше у обоймах з'являються тріщини шириною розкриття 0,05 мм. Проте для досягнення граничної ширини тріщин 0,3 мм діє протилежна закономірність: що більший рівень навантаження перед підсиленням, то швидше в обоймах з'являються граничні тріщини.

**У четвертому розділі** описано методика розрахунку несучої здатності підсиленних при дії навантаження залізобетонних колон.

Розрахунок контрольних та підсиленних зразків виконано за нелінійною деформаційною методикою відповідно до чинних норм проектування ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Розрахункові залежності виведено на основі рівнянь рівноваги, описаних у п. 4.2 та 4.3 ДСТУ Б В.2.6-156:2010 із урахуванням особливостей сумісної роботи складеного перерізу.

Відповідно за основні розрахункові передумови визначення несучої здатності колон прийнято:

- за розрахунковий приймається переріз, що відповідає середнім деформаціям бетону і арматури по довжині блока між тріщинами;
- деформації в арматурі однакові з оточуючим їх бетоном, як при розтягу, так і при стиску;
- для розрахункового перерізу справедливою є гіпотеза про лінійний розподіл деформацій по його висоті.

Додатково пропонуємо такі розрахункові передумови:

- коробчатий переріз обойми підсилення, приводимо до еквівалентного двотаврового перерізу (рис. 8);
- зчеплення між бетоном колони (основний переріз) та бетоном обойми підсилення (додатковий переріз) вважаємо абсолютно жорстким.

Відповідно до прийнятих передумов можлива реалізація чотирьох форм рівноваги розрахункового перерізу:

- перша форма – увесь переріз стиснуто ( $x_1 > h^{add}$ );
- друга форма – нейтральна вісь у межах нижньої полиці обойми. У перерізі обойми є зона розтягу, основний переріз колони – стиснутий ( $h^{add} - h_{ef}^{add} < x_1 < h^{add}$ );
- третя форма – нейтральна вісь у межах стінки обойми. Зона розтягу є як у перерізі обойми, так і в основному перерізі колони ( $h_{eff}^{add} < x_1 < h^{add} - h_{ef}^{add}$ );
- четверта форма – нейтральна вісь у межах верхньої полиці обойми. У перерізі обойми є зона розтягу, основний переріз колони – розтягнутий ( $x_1 < h_{eff}^{add}$ ).

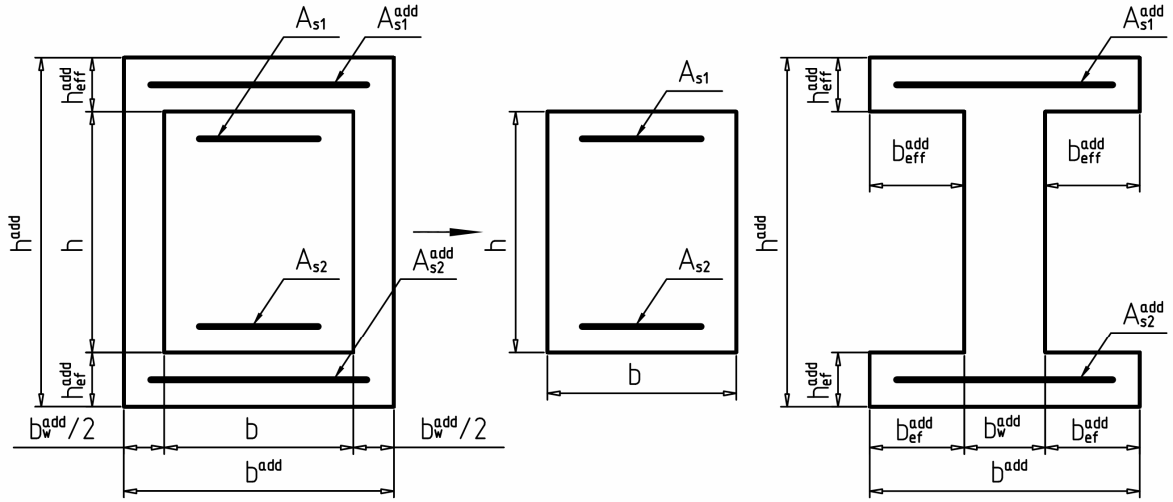


Рис. 8. Представлення складеного поперечного перерізу підсиленого зразка у вигляді прямокутного (переріз колони) та еквівалентного двотаврового (приведений коробчатий переріз обійми)

Під час проведення експерименту досліджувані колони працювали в межах третьої форми рівноваги складеного перерізу (рис. 9).

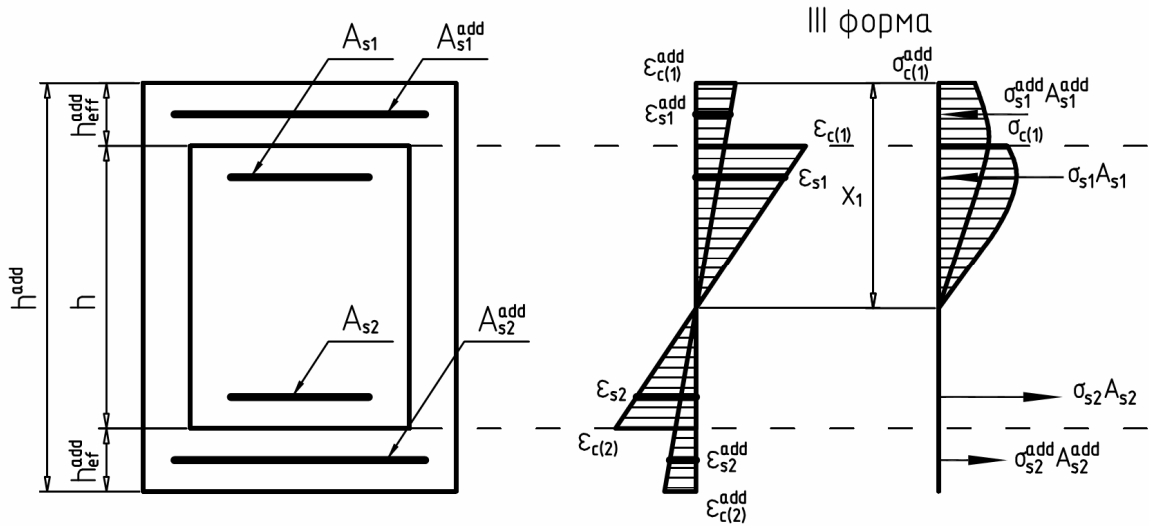


Рис. 9. Третя форма рівноваги складеного перерізу підсиленої колони

Рівняння рівноваги для III форми:

$$\frac{bf_{cd}}{\aleph} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left( \frac{\epsilon_{c(1)}}{\epsilon_{c1}} \right)^{k+1} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} + \frac{f_{cd}^{add}}{\aleph^{add}} \left[ b_w^{add} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left( \frac{\epsilon_{c(1)}^{add}}{\epsilon_{c1}^{add}} \right)^{k+1} + 2b_{eff}^{add} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left( \frac{\epsilon_{c(1)}^{add k+1} - \epsilon_{eff(2)}^{add k+1}}{\epsilon_{c1}^{add k+1}} \right) \right] + \sum_{i=1}^n \sigma_{si}^{add} A_{si}^{add} - N = 0, \quad (1)$$

$$\frac{bf_{cd}}{\aleph^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left( \frac{\epsilon_{c(1)}}{\epsilon_{c1}} \right)^{k+2} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} (x_1 - z_{si}) + \frac{f_{cd}^{add}}{\aleph^{add 2}} \left[ b_w^{add} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left( \frac{\epsilon_{c(1)}^{add}}{\epsilon_{c1}^{add}} \right)^{k+2} + 2b_{eff}^{add} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left( \frac{\epsilon_{c(1)}^{add k+2} - \epsilon_{eff(2)}^{add k+2}}{\epsilon_{c1}^{add k+2}} \right) \right] + \sum_{i=1}^n \sigma_{si}^{add} A_{si}^{add} \frac{\epsilon_{c(1)}^{add} - \aleph^{add} z_{si}^{add}}{\aleph^{add}} - M = 0. \quad (2)$$

Для того щоб врахувати напружено-деформований стан колони до моменту підсилення, пропонуємо у розрахунок підсиленого елемента додати певні параметри. Цими параметрами є проміжні результати розрахунку непідсилених колон, які відповідають обраним рівням навантаження перед підсиленням, а саме: напружено-деформований стан 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. Алгоритм розрахунку залізобетонних колон, підсилених залізобетонною обіймою представлено на рис. 10.

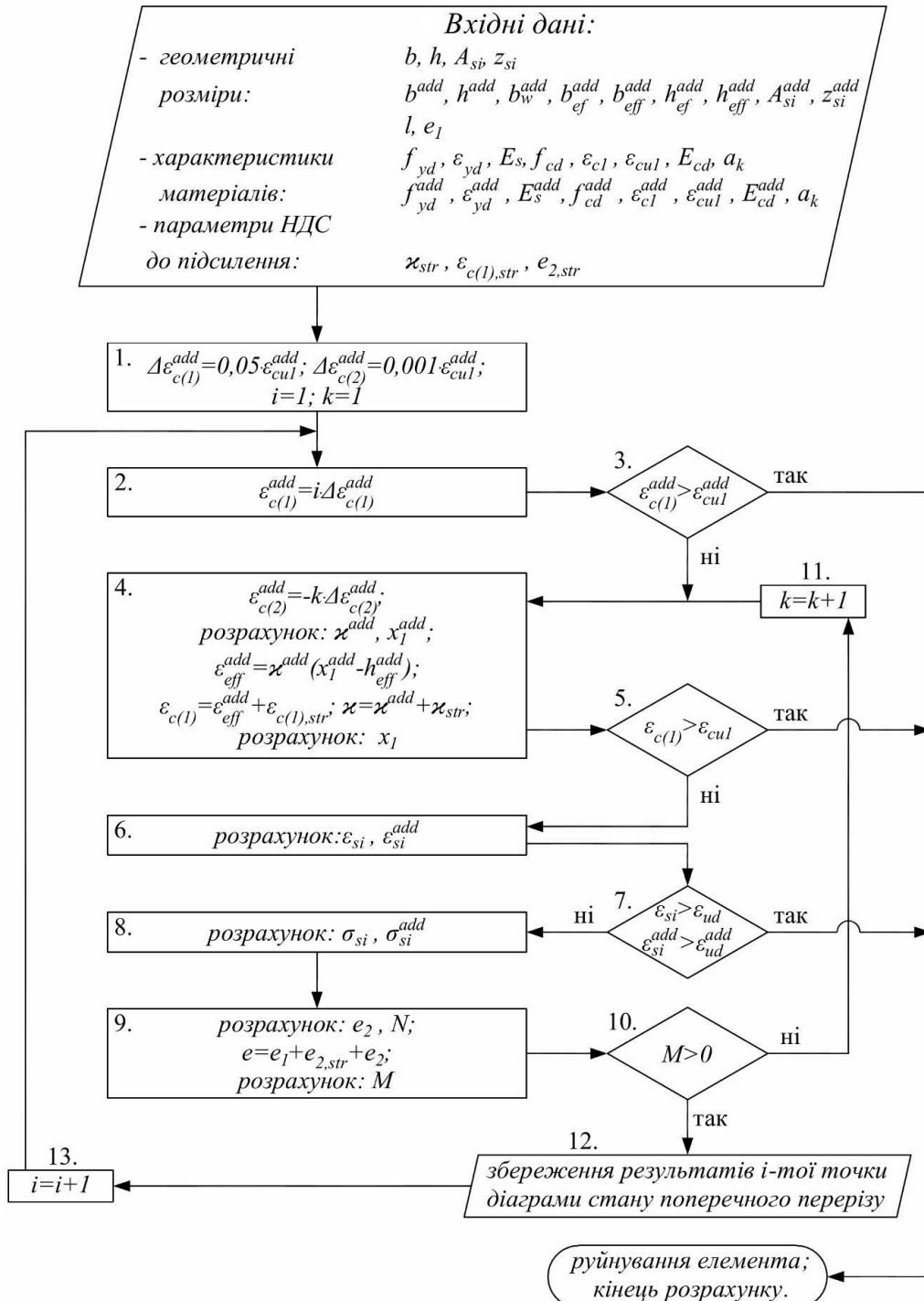


Рис. 10. Алгоритм розрахунку підсилених колон



Відповідно до пункту 4.1.2 ДСТУ Б В.2.6-156:2010 при розрахунку стиснуто-зігнутих елементів необхідно враховувати впливи другого порядку, тобто вигин конструкції. У представленому алгоритмі розрахунку підсиленних стиснуто-зігнутих елементів впливи другого порядку враховано через додаткові ексцентриситети прикладання стискуючого 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 ( $e_2$ ).

Вигин стиснуто-зігнутого елемента визначено за формулою:

$$f = \frac{1}{r} k_m l^2. \quad (3)$$

де  $\frac{1}{r}$  – кривизна вигнутої осі в перерізі колони.  $k_m$  – коефіцієнт, що залежить від характеру завантаження елемента.  $l$  – приведена довжина колони, яка в нашому випадку дорівнює геометричній довжині через шарнірне закріплення на обох кінцях.

У ДСТУ Б В.2.6-156:2010 зазначено, що формулу (3) застосовують при розрахунку статично визначених елементів постійного перерізу, які працюють за балковою схемою. Проте в європейських нормах з проектування 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. Таким чином формула (3) у нашому випадку набуде вигляду:

$$f = \frac{1}{8} \varkappa l^2 \text{ або } f = \frac{1}{8} \varkappa^{add} l^2. \quad (4)$$

Розрахункові діаграми стану дослідних колон відображають реальний напружено-деформований стан підсиленних та контрольних зразків і добре корелюють із експериментальними результатами. Критерій вичерпання несучої здатності однаковий як за результатами розрахунку, так і за результатами експериментальних досліджень: ним є втрата рівноваги між внутрішніми та зовнішніми зусиллями. Результати визначення несучої здатності дослідних зразків експериментальним і розрахунковим способами наведені у таблиці 4.

Таблиця 4

**Розрахункова несуча здатність дослідних колон**

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

Так само, як і результати експериментальних досліджень, результати теоретичного розрахунку підтверджують, що максимального збільшення несучої здатності досягають колони підсилені без навантаження. Розрахунковий приріст несучої здатності колон рівня  $0.0 \cdot N_u$  становить 152%. Зі збільшенням рівня навантаження перед підсиленням розрахунковий ефект підсилення зменшується на 3%, 10%, 22% та 35% відповідно.

Розбіжність між розрахунковою та експериментально визначеною несучою здатністю контрольних колон становить 7,7%. У випадку підсилених зразків розбіжність між розрахунковою та експериментальною несучою здатністю перебуває 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.

Розрахункові величини для аналізу роботи розтягнутого армування представлено у таблиці 5.

Таблиця 5

### Розрахункова деформативність розтягнутого армування дослідних колон

Колони	Несуча здатність $N_u^{teor}$ , (кН)	Навантаження при текучості арматури колони $N_y^{teor}$ , (кН)	Навантаження при текучості арматури обойми $N_{y,add}^{teor}$ , (кН)	$\frac{N_u^{teor} - \max(N_y^{teor}; N_{y,add}^{teor})}{N_u^{teor}}$
Контрольні	161,05	159,75	-	0,8%
Рівень $0,0 \cdot N_u$	419,77	407,00	406,62	3,0%
Рівень $0,3 \cdot N_u$	414,39	413,88	407,05	0,1%
Рівень $0,5 \cdot N_u$	402,62	397,58	402,53	0,02%
Рівень $0,7 \cdot N_u$	384,36	336,74	382,54	0,5%
Рівень $0,9 \cdot N_u$	362,23	239,73	360,04	0,6%

З табл. 5 бачимо, що найбільша розбіжність між розрахунковою несучою здатністю та розрахунковим навантаженням при текучості розтягнутого армування становить 3,0% (колони рівня  $0.0 \cdot N_{u(K)}$ ), а найменша – 0,02% (колони рівня  $0.5 \cdot N_{u(K)}$ ). Отже втрата рівноваги між зовнішніми й внутрішніми зусиллями відбувається разом з текучістю всіх шарів розтягнутого армування, що повністю підтверджують експериментальні дослідження.

Результати розрахунків вигину дослідних колон представлено у таблиці 6.

Таблиця 6

### Розрахункова експлуатаційна придатність колон за граничним вигином

Колони	Несуча здатність $N_u^{teor}$ , (кН)	Навант. при $f_u$ $N_f^{teor}$ , (кН)	Розрах. ефект підсилення	$N_f^{teor} / N_u^{teor}$	Експ. нав. при $f_u$ $N_f$ , (кН)	$\frac{N_f - N_f^{teor}}{N_f}$
Контрольні	161,05	128,28	-	0,80	122,68	-4,6%
Рівень $0,0 \cdot N_u$	419,77	412,02	221%	0,98	393,13	-4,8%
Рівень $0,3 \cdot N_u$	414,39	363,18	183%	0,88	388,22	6,4%
Рівень $0,5 \cdot N_u$	402,62	304,97	138%	0,76	328,57	7,2%
Рівень $0,7 \cdot N_u$	384,36	208,67	63%	0,54	191,24	-9,1%
Рівень $0,9 \cdot N_u$	362,23	-	-	-	-	-

За результатами розрахунку максимального ефекту підвищення експлуатаційної придатності за допустимим вигином – 221% досягли колони підсилені без дії навантаження (рівень  $0.0 \cdot N_u$ ). При наявності рівня попереднього навантаження ефект від підсилення зменшується, що також підтверджують результати експериментальних досліджень. Мінімального ефекту підсилення (63%), згідно з розрахунком, досягли колони, підсилені за дії навантаження рівня  $0.7 \cdot N_u$ . Колони підсилені при рівні  $0.9 \cdot N_u$  вичерпали експлуатаційну придатність ще до моменту підсилення. Різниця між експериментальними та розрахунковими величинами навантаження при досягненні граничного вигину знаходиться в межах - 9,1.7,2%. При цьому, для контрольних колон та зразків перебуває при рівні навантаження  $0.0 \cdot N_u$  та  $0.7 \cdot N_u$ , розрахунок показав завищені результати, а для рівнів  $0.3 \cdot N_u$  і  $0.5 \cdot N_u$  – занижені.

Під час розрахунку ширини розкриття тріщин підсиленних зразків до уваги приймали тільки середні деформації арматури та середні деформації бетону між тріщинами обойми підсилення. Деформації основного перерізу колони не враховували у розрахунку, оскільки обойма підсилення включається в розрахунок із нульовими деформаціями, а при подальшому навантаженні деформації обойми рівні приростам деформацій колони на контактному шарі. Результати розрахунків ширини розкриття тріщин подано у таблиці 7.

Таблиця 7

**Розрахункова експлуатаційна придатність дослідних колон за граничною шириною розкриття тріщин**

Колони	Несуча здатність $N_u^{teor}$ , (кН)	Навант. при $w_{max}$ $N_w^{teor}$ , (кН)	Розрах. ефект підсилення	$N_w^{teor} / N_u^{teor}$	Експ. нав. при $w_{max}$ $N_w$ , (кН)	$\frac{N_w - N_w^{teor}}{N_w}$
Контрольні	161,05	134,19	-	0,83	165,73	19,0%
Рівень $0,0 \cdot N_u$	419,77	334,55	149%	0,80	464,02	27,9%
Рівень $0,3 \cdot N_u$	414,39	345,00	157%	0,83	444,73	22,4%
Рівень $0,5 \cdot N_u$	402,62	350,52	161%	0,87	427,19	17,9%
Рівень $0,7 \cdot N_u$	384,36	348,86	160%	0,91	403,98	13,6%
Рівень $0,9 \cdot N_u$	362,23	321,73	140%	0,89	387,91	17,1%

Максимального підвищення експлуатаційної придатності за розрахунковою шириною розкриття тріщин досягли зразки підсилені за дії навантаження рівня  $0.5 \cdot N_{u(K)}$  (161%), а мінімального (140%) – за дії навантаження рівня  $0.9 \cdot N_{u(K)}$ . Закономірність, що ефект підсилення зменшується з підвищенням рівня навантаження перед підсиленням, не діє. Водночас ця закономірність підтверджена експериментальними результатами. Розбіжність між експериментальними та розрахунковими величинами навантаження при досягненні граничної ширини розкриття тріщин перебуває в межах 13,6.27,9%. Така збіжність результатів є достатньою, враховуючи той факт, що розрахунок ширини розкриття тріщини проводиться для середньої ширини розкриття, а спостереження під час експериментальних досліджень велось за тріщиною з максимальним розкриттям.

## ВИСНОВКИ

1. Підсилення залізобетонними обоймами дозволяє значною мірою зміцнити стиснуто-зігнуті залізобетонні елементи. Наявні дослідження таких конструкцій охоплюють широкий спектр аспектів їхньої роботи, проте НДС підсилених під навантаженням колон досі потребує глибшого експериментально-теоретичного вивчення.

2. Розроблено програму експериментальних досліджень та проведено випробування стиснуто-зігнутих залізобетонних колон, підсилених залізобетонною обоймою. Підсилення колон виконано під навантаженням різних рівнів, що дало змогу змодельовати напружено-деформований стан реальних конструкцій у момент підсилення та визначити його вплив на подальшу роботу підсилених елементів.

3. За результатами експериментальних досліджень максимального ефекту підвищення несучої здатності досягли зразки, підсилені без попереднього навантаження ( $0,0 \cdot N_{u(K)}$ ). Для цих зразків підвищення несучої здатності склало 172%. Із появою рівня навантаження перед підсиленням ефект від підсилення зменшувався. Для колон рівня  $0,3 \cdot N_{u(K)}$  ефект підсилення становив 167%; рівня  $0,5 \cdot N_{u(K)}$  – 155%; рівня  $0,7 \cdot N_{u(K)}$  – 146% та рівня  $0,9 \cdot N_{u(K)}$  – 128%.

4. Запропоновано методику розрахунку підсилених залізобетонних елементів, яка дозволяє оцінити параметри напружено-деформованого стану підсилених під навантаженням стиснуто-зігнутих елементів з доброю збіжністю. Різниця між розрахунковими й експериментальними величинами несучої здатності дослідних колон перебуває в межах 8,9..11,6%.

5. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що експлуатаційна придатність дослідних колон, підсилених під навантаженням високих рівнів, втрачається швидше. Граничне навантаження за допустимим вигином колон рівня  $0,0 \cdot N_{u(K)}$  зросло на 220%, в той час як колони рівня  $0,9 \cdot N_{u(K)}$  досягнули граничного вигину ще до моменту підсилення. Граничне навантаження за допустимою шириною розкриття тріщин зразків рівня  $0,0 \cdot N_{u(K)}$  зросло на 180%. З появою рівня навантаження перед підсиленням ефект зменшився до 134% (рівень підсилення  $0,9 \cdot N_{u(K)}$ ).

6. Запропоновано враховувати впливи другого порядку через розрахунок вигину колон на основі методу номінальної кривизни, який показав збіжність теоретичних значень вигину з експериментальними в межах 9%. Водночас розрахунок теоретичної ширини розкриття тріщин показав розбіжність із експериментом 13,6..27,9% в сторону заниження розрахункових значень.

7. Запропонована методика розрахунку стиснуто-зігнутих елементів, підсилених залізобетонною обоймою, дозволяє враховувати напружено-деформований стан основного перерізу елемента під час підсилення та моменти від впливів другого порядку. Результати розрахунку за запропонованою методикою дають добру збіжність із експериментальними результатами

8. Результати експерименту та теоретичних розрахунків підтверджують, що розвантаження конструкції до максимально можливого рівня перед підсиленням призведе до підвищення її несучої здатності та покращення експлуатаційних властивостей.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Йовчик О.Д. Вплив рівня діючого навантаження на жорсткість залізобетонних балок, підсилених системою Ruredil X Mesh Gold / О.Д. Йовчик, П.І. Країнський, Р.В. Вашкевич, Р.Є. Хміль, З.Я. Бліхарський // Зб. наук. праць: Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2013 – вип. 25. – С.719-726.
2. Країнський П.І. Застосування розрахунку за деформаційним методом при плануванні досліджень стиснуто-зігнутих елементів, підсилених залізобетонною обоймою / П.І. Країнський, Р.Є. Хміль, З.Я. Бліхарський // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Теорія і практика будівництва. – Львів, 2013. – №755. – С.198-204.
3. Krayinskyi P.I. Features of experimental strain determination of compressed-bent elements considering their deflection curve / P.I. Krayinskyi, Ya.Z. Blikharskyi, R.Ye. Khmil // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Теорія і практика будівництва. – Львів, 2014. – №781. – С.90-95.
4. Країнський П.І. Дослідження експериментальної міцності залізобетонних позацентрово-стиснутих колон підсилених залізобетонною обоймою / 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.
5. Krayinskyi P.I. Research of reinforced concrete elements strengthened by reinforced concrete jacketing under high level loading / P.I. Krayinskyi, O.D. Yovchuk, I.V. Vasiliev // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Теорія і практика будівництва. – Львів, 2015. – №823. – С.348-353.
6. Krayinskyi P. Experimental investigation of reinforced concrete columns strengthened by jacketing / P. Krayinskyi, 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.
7. Krayinskyi P. The strength of reinforced concrete columns, strengthened by reinforced concrete jacketing under loading / P. Krayinskyi, R. Khmil, Z. Blikharskiy // Czasopismo inżynierii lądowej, środowiska i architektury (JCEEA) . – t. XXXII, z. 62 (3/II/15), lipiec-wrzesień 2015. – P.209-220.

## АНОТАЦІЯ

**Країнський П.І.** Міцність та деформативність залізобетонних стиснуто-зігнутих елементів, підсилених залізобетонною обоймою при дії навантаження. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Національний університет "Львівська політехніка", Міністерство освіти і науки України, Львів, 2016.

В дисертації досліджено несучу здатність та експлуатаційну придатність стиснуто-зігнутих залізобетонних елементів, підсилених залізобетонною обоймою при дії навантаження різних рівнів.

Отримано результати експериментальних досліджень, що характеризують

напружено-деформований стан залізобетонних колон, підсилених залізобетонними обоймами. Визначено характер впливу навантаження на конструкцію в момент підсилення на несучу здатність та експлуатаційну придатність підсиленої конструкції.

Запропоновано методику визначення несучої здатності залізобетонних колон, підсилених при дії навантаження на основі нелінійної деформаційної моделі ДБН В.2.6-98:2009 ДСТУ Б В.2.6-156:2010 із урахуванням реальних діаграм деформування матеріалів. Аналіз результатів експериментальних досліджень та теоретичних розрахунків дослідних конструкцій засвідчив добру збіжність результатів.

**Ключові слова:** стиснуто-зігнуті залізобетонні елементи, підсилення під навантаженням, залізобетонна обойма, несуча здатність, методика розрахунку.

## АННОТАЦІЯ

**Краинский П.И.** Прочность и деформативность железобетонных сжато-изгибаемых элементов, усиленных железобетонной обоймой при воздействии нагрузки. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 - строительные конструкции, здания и сооружения. – Национальный университет "Львовская политехника", Министерство образования и науки Украины, Львов, 2016.

В диссертации исследованы несущую способность и эксплуатационную пригодность сжато-изгибаемых железобетонных элементов, усиленных железобетонной обоймой при воздействии нагрузки разных уровней.

Во введении приведена общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, показана связь с научными программами, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлена ее общая характеристика.

**В первом разделе** выполнен обзор методов усиления железобетонных балочных конструкций, проведен анализ экспериментально-теоретических исследований прочности усиленных железобетонных балок и напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций, усиливаемых под нагрузкой.

**Второй раздел** содержит программу и методику экспериментальных исследований нормальных сжато-изгибаемых железобетонных элементов, усиленных железобетонной обоймой под нагрузкой.

Для достижения поставленной цели и реализации задач было изготовлено 12 опытных колон. Разработанная программа и методика экспериментальных исследований обеспечила получение новых данных о работе сжато-изгибаемых железобетонных элементов, усиленных железобетонной обоймой под нагрузкой.

**В третьем разделе** приведены результаты экспериментальных исследований сжато-изгибаемых железобетонных элементов не усиленных и усиленных железобетонной обоймой под нагрузкой.

Получены данные экспериментальных исследований прочности и эксплуатационной пригодности усиленных железобетонной обоймой колон в зависимости от уровня нагрузки при усилении, а также при усилении под нагрузкой

предельного уровня. Определены три характерных стадии НДС железобетонных колон, усиленных при воздействии нагрузки.

**В четвертом разделе** описана методика расчета прочности усиленных при действии нагрузки железобетонных сжато-изгибаемых элементов по деформационной модели ДБН В.2.6-98:2009.

В разделе детально описана методика и разработан алгоритм расчета несущей способности и напряженно-деформированного состояния железобетонных сжато-изгибаемых элементов, усиленных под нагрузкой, с учетом реальных свойств бетона и арматуры основного и дополнительного сечений.

Для проведения анализа и апробации предложенных методик исследованные усиленные железобетонные колонны были рассчитаны на прочность согласно предложенных алгоритмов. Сравнительный анализ показал хорошее сходство экспериментальных и теоретических данных.

**Ключевые слова:** сжато-изгибаемые железобетонные элементы, усиление под нагрузкой, железобетонная обойма, несущая способность, методика расчета.

## ANNOTATION

**Krainskyi P.I.** Strength and deformability of compressed-bent reinforced concrete elements, strengthened by reinforced concrete jacketing under load. – On the rights of manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.23.01 - building structures and buildings. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

In the thesis the bearing capacity and serviceability of compressed-bent reinforced concrete elements, strengthened by reinforced concrete jacketing was investigated.

The results of experimental studies characterizing stress-strain state of reinforced concrete columns strengthened by reinforced concrete jacketing are presented. The impact of load on the structure at the time of strengthening on the carrying capacity and serviceability was determined.

The method of determining the carrying capacity of concrete columns strengthened by reinforced concrete jacketing under load was developed. The method was based on nonlinear deformation model ДБН В.2.6-98: 2009 DSTU B V.2.6-156: 2010 taking into account the real strain diagrams of materials. Analysis of experimental results and theoretical calculations of experimental columns showed good convergence.

**Keywords:** compressed-bent reinforced concrete elements, under load strengthening, reinforced concrete jacketing, carrying capacity, design method.