МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА, ТРАНСПОРТУ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва

Допустити до захисту
Зав. кафедри БДМБ
д-р техн. наук, професор
_____ Володимир ЯЦУН
«____» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

«Вплив ефекту обтиснення на напружено-деформований стан та зміну деформаційних характеристик бетону в сталевих обоймах»

Керівник: доцент кафедри БДМБ
_____ І. О. СКРИННІК

Консультант з охорони праці:
доцент кафедри БДМБ
_____ В. В. ДАРІЄНКО

Виконала: студентка групи БІ-25 М
спеціальності G19 Будівництво
та цивільна інженерія
_____ А. М. ЛАРЧЕНКО

Кр

Підписано КЕП
Центральноукраїнський національний технічний університет
Ларченко Анна Михайлівна
Сертифікат: 514B5C86A1E5DA11040000000E9F5D0091AD7405
Дійсний з 05.03.2026 16:56:02 по 05.03.2027 16:56:01

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інститут, факультет, відділення: факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва
Освітній ступінь: магістр
Спеціальність: G19 «Будівництво та цивільна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри БДМБ,
д.т.н., проф. _____ Яцун В.В.
«____» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

Ларченко Анні Михайлівні

1. Тема роботи: «Вплив ефекту обтиснення на напружено-деформований стан та зміну деформаційних характеристик бетону в сталевих обоймах»
керівник роботи: Скриннік І.О., доцент
затверджені наказом вищого навчального закладу від “10” серпня 2026 року № 24-13

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 25.11.2027 р.

3. Вихідні дані до роботи: колона 400×400 мм з бетону С20/25, армування 4Ø20 А500С; обойма з кутиків і планок зі сталі С245; навантаження після реконструкції N = 3600 кН; ДБН В.2.6-98:2009, ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010, ДБН В.2.6-198:2014; наукові публікації з теорії обтисненого бетону.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: вступ; огляд літератури та постановка завдань; моделі деформування обтисненого бетону; напружено-деформований стан бетону і перерізу колони в сталевій обоймі; методика і приклад розрахунку підсилення; охорона праці; загальні висновки; general conclusions; список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу: мультимедійна презентація (23 слайди).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав	Завдання прийняв
Основна частина	Скриннік І.О., доцент	01.09.2026	
Охорона праці	Дарієнко В.В., доцент	01.09.2026	

7. Дата видачі завдання: «01» вересня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання	Примітка
1	Огляд літератури, постановка завдань	01.09–25.09.2026	виконано
2	Аналіз моделей обтисненого бетону	26.09–10.10.2026	виконано
3	Параметричні розрахунки ефективності обойми	11.10–24.10.2026	виконано
4	Розрахунок НДС перерізу, імовірнісна оцінка	25.10–07.11.2026	виконано
5	Методика і приклад розрахунку підсилення	08.11–14.11.2026	виконано
6	Розділ «Охорона праці»	15.11–18.11.2026	виконано
7	Оформлення записки, презентації	19.11–24.11.2026	виконано
8	Подання роботи на кафедру	25.11.2026	виконано

Студентка _____ Ларченко А.М.

Керівник роботи _____ Скриннік І.О.

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл. арк.	Примітка
				Документація загальна		
				Знову розроблена		
А4		1		Титульний аркуш	1	
А4		2		Завдання	2	
А4		3		Анотація	1	
А4		4		Abstract	1	
А4		5	ОБСО 20.G19.28 ПЗ	Пояснювальна записка	48	
				Зміст		с. 1
				Вступ		с. 3
				Розділ 1		с. 6
				Розділ 2		с. 14
				Розділ 3		с. 22
				Розділ 4		с. 32
				Розділ 5		с. 39
				Загальні висновки		с. 43
				General conclusions		с. 44
				Список використаних джерел		с. 45
А4		6	ОБСО 20.G19.28 ІМ	Ілюстраційні матеріали	23	слайдів

					ОБСО 20.G19.28 ВД		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Ларченко А.М.			Вплив ефекту обтиснення на НДС і деформаційні характеристики бетону в сталевих обоймах Відомість кваліфікаційної магістерської роботи	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив		Скриннік І.О.				М	1	1
Реценз.						ЦНТУ гр. БІ-25 М		
Н. контр.		Дарієнко В.В.						
Затвердив		Яцун В.В.						

АНОТАЦІЯ

Ларченко А.М. Вплив ефекту обтиснення на напружено-деформований стан та зміну деформаційних характеристик бетону в сталевих обоймах. – Кваліфікаційна магістерська робота за спеціальністю G19 «Будівництво та цивільна інженерія». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026.

Робота містить 48 с., 22 рис., 11 табл., 30 джерел.

Мета роботи – оцінити вплив ефекту обтиснення на напружено-деформований стан і деформаційні характеристики бетону в сталевих обоймах та запропонувати порядок його врахування під час розрахунку підсилення залізобетонних колон. Порівняно моделі обтисненого бетону Richart, Mander і ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1, кількісно оцінено зміну деформації на піку, граничної деформації та січного модуля залежно від рівня обтиснення. Отримано залежності коефіцієнта ефективності і ефективного тиску обтиснення в обоймі з кутиків і планок від її параметрів. Оцінено вплив попереднього обтиснення нагріванням планок, побудовано діаграми взаємодії N–M перерізу колони, виконано імовірнісну оцінку методом Монте-Карло. Розроблено алгоритм і приклад розрахунку підсилення колони, заходи з охорони праці.

Ключові слова: ОБТИСНЕННЯ, СТАЛЕВА ОБОЙМА, БЕТОН, ДЕФОРМАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН, ПІДСИЛЕННЯ КОЛОН, ДЕФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ.

ABSTRACT

Larchenko A.M. Influence of the confinement effect on the stress-strain state and changes in the deformation characteristics of concrete in steel jackets. – Master's qualification thesis, specialty G19 "Civil Engineering". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

The thesis contains 48 pages, 22 figures, 11 tables and 30 references.

The aim of the work is to evaluate the influence of confinement on the stress-strain state and deformation characteristics of concrete in steel jackets and to propose a procedure for taking it into account in the design of strengthening of reinforced concrete columns. The Richart, Mander and DSTU-N B EN 1992-1-1 confined concrete models were compared, and the changes of peak strain, ultimate strain and secant modulus depending on the confinement level were quantified. Relationships of the confinement effectiveness coefficient and effective confining pressure in an angle-and-batten jacket on its parameters were obtained. The effect of pre-stressing the battens by heating was evaluated, N–M interaction diagrams of the column section were plotted, and a Monte Carlo probabilistic assessment was performed. A design algorithm, an example of column strengthening and occupational safety measures were developed.

Keywords: CONFINEMENT, STEEL JACKET, CONCRETE, DEFORMATION CHARACTERISTICS, STRESS-STRAIN STATE, COLUMN STRENGTHENING, DEFORMATION MODEL.

ЗМІСТ

ВСТУП 3
Розділ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ 6
1.1 Проблема підсилення стиснутих залізобетонних елементів 6
1.2 Способи підсилення та типи обойм 7
1.3 Ефект обтиснення бетону в дослідженнях 9
1.4 Нормативна база 12
1.5 Висновки до розділу 1. Завдання дослідження 13
Розділ 2. МОДЕЛІ ДЕФОРМУВАННЯ ОБТИСНЕНОГО БЕТОНУ 14
2.1 Механізм ефекту обтиснення 14
2.2 Моделі міцності обтисненого бетону 14
2.3 Діаграма деформування обтисненого бетону 16
2.4 Зміна деформаційних характеристик бетону 17
2.5 Ефективність обтиснення в обоймі з кутиків і планок 18
2.6 Висновки до розділу 2 21
Розділ 3. НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН БЕТОНУ І ПЕРЕРІЗУ КОЛОНИ В СТАЛЕВІЙ ОБОЙМІ 22
3.1 Активне обтиснення нагріванням планок 22
3.2 Деформаційна модель перерізу колони з обоймою 24
3.3 Діаграми взаємодії N–M 25
3.4 Вплив рівня навантаження під час підсилення 26
3.5 Порівняння з трубобетонним елементом 28
3.6 Імовірнісна оцінка приросту несучої здатності 29
3.7 Висновки до розділу 3 30

					ОБСО 20.G19.28 ПЗ		
Змн.	*Арк.*	*№ докум.*	*Підпис*	*Дата*			
Розробив		*Ларченко А.М.*			*Вплив ефекту обтиснення на НДС і деформаційні характеристики бетону в сталевих обоймах Пояснювальна записка*	*Літ.*	*Арк.*	*Аркушів*
Перевірив		*Скриннік І.О.*				*М*	*1*	*48*
Реценз.						*ЦНТУ гр. БІ-25 М*		
Н. контр.		*Дарієнко В.В.*						
Затвердив		*Яцун В.В.*						

Розділ 4. МЕТОДИКА І ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ПІДСИЛЕННЯ КОЛОНИ СТАЛЕВОЮ ОБОЙМОЮ 32
4.1 Алгоритм розрахунку 32
4.2 Вихідні дані прикладу 33
4.3 Підбір параметрів обойми 33
4.4 Розрахунок зварних швів планок 35
4.5 Конструювання і технологія улаштування обойми 35
4.6 Порівняння з альтернативними способами підсилення 37
4.7 Висновки до розділу 4 38
Розділ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ 39
5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів 39
5.2 Розрахунок повітрообміну під час зварювальних робіт 40
5.3 Розрахунок сумарного рівня шуму 40
5.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях 41
5.5 Висновки до розділу 5 41
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 43
GENERAL CONCLUSIONS 44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 45

ВСТУП

Актуальність теми. Значна частина каркасних громадських і виробничих будівель в Україні збудована в 1960–1990-х роках і нині потребує реконструкції. Зміна функціонального призначення, надбудова, встановлення нового обладнання та воєнні пошкодження збільшують навантаження на колони, а фізичний знос знижує їхню несучу здатність. Найпростішим і найшвидшим способом підсилення стиснутих залізобетонних елементів є сталева обойма з кутиків і поперечних планок [1, 2]. Така обойма не лише додає металевий переріз, а й обмежує поперечне розширення бетону, тобто створює ефект обтиснення. Обтиснений бетон працює в умовах об'ємного напруженого стану, і його міцність та граничні деформації зростають [3, 4].

Проте в практиці проєктування цей ефект зазвичай не враховують: обойму розраховують як додаткову поздовжню арматуру, а бетон – за одновісною діаграмою. Чинні ДБН В.2.6-98:2009 [5] та ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [6] містять нелінійну деформаційну модель, але не дають прямих рекомендацій щодо обтиснення бетону сталевою обоймою з кутиків. Єврокод 2 [7] наводить формули для обтисненого бетону, однак тиск обтиснення для обойми з окремих планок потрібно визначати самостійно. Тому аналіз впливу обтиснення на напружено-деформований стан і деформаційні характеристики бетону в сталевих обоймах є актуальним завданням.

Мета роботи – оцінити вплив ефекту обтиснення на напружено-деформований стан і деформаційні характеристики бетону в сталевих обоймах та запропонувати порядок його врахування під час розрахунку підсилення залізобетонних колон.

Завдання дослідження:

– проаналізувати способи підсилення стиснутих залізобетонних елементів і опубліковані дослідження ефекту обтиснення бетону;

– порівняти моделі міцності та діаграми деформування обтисненого бетону;

– кількісно оцінити зміну деформаційних характеристик бетону (деформації на піку, граничних деформацій, січного модуля) залежно від рівня обтиснення;

– визначити ефективний тиск обтиснення в обоймі з кутиків і планок залежно від її параметрів;

– оцінити вплив активного (попереднього) обтиснення та побудувати діаграми взаємодії N–M перерізу колони з обоймою;

– оцінити розкид результатів імовірнісним методом і розробити алгоритм та приклад розрахунку підсилення;

– розробити заходи з охорони праці під час улаштування сталевих обойм.

Об'єкт дослідження – стиснуті залізобетонні елементи, підсилені сталевими обоймами.

Предмет дослідження – вплив обтиснення на міцність, деформативність і напружено-деформований стан бетону в сталевих обоймах.

Методи дослідження: аналіз і узагальнення літературних даних, аналітичні моделі обтисненого бетону (Richart, Mander, ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1), нелінійна деформаційна модель перерізу, параметричні розрахунки та метод Монте-Карло.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

– отримано параметричні залежності коефіцієнта ефективності обтиснення та ефективного тиску обтиснення для сталевої обойми з кутиків і планок від кроку планок, розміру кутика і товщини планок;

– показано, що попереднє обтиснення планок нагріванням змінює насамперед початкову ділянку роботи бетону, а граничний приріст міцності визначається пасивним обтисненням;

– кількісно оцінено частку приросту несучої здатності колони, зумовлену обтисненням бетону, та розкид цього приросту з урахуванням мінливості властивостей матеріалів.

Практичне значення полягає в алгоритмі та прикладі розрахунку підсилення залізобетонної колони сталевою обоймою з урахуванням обтиснення, які можна використати під час проєктування реконструкції каркасних будівель.

Апробація результатів. Основні результати роботи представлено на міжнародній науково-технічній онлайн-конференції «Наука, інженерія та технології: сучасні виклики й перспективи» (Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, 24–25 листопада 2026 р.).

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Обсяг основного тексту – 48 сторінок, містить 22 рис. і 11 табл.; список використаних джерел містить 30 найменувань.

Розділ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Проблема підсилення стиснутих залізобетонних елементів

Колони каркасних будівель є найбільш відповідальними елементами: вихід з ладу однієї колони може спричинити прогресуюче обвалення. Під час реконструкції навантаження на колони часто зростає на 20–50 %, а обстеження виявляє зниження міцності бетону, корозію арматури та відколи захисного шару. Порядок обстеження і оцінювання технічного стану встановлює ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 [8], за яким конструкції відносять до однієї з категорій технічного стану; для обмежено працездатних і аварійних конструкцій призначають підсилення.

Дослідження напружено-деформованого стану конструкцій підсилення виконуються і на прикладі регіональних об'єктів, зокрема для заводу залізобетонних виробів у м. Дніпро [9]. Окремою сучасною проблемою є відновлення колон, пошкоджених унаслідок обстрілів: у таких випадках вирішальною є швидкість виконання робіт і можливість підсилення без тривалого виведення об'єкта з експлуатації [2]. Для цих умов сталева обойма має очевидні переваги: вона монтується без мокрих процесів, включається в роботу відразу після зварювання і не потребує набору міцності.

Питання підсилення під навантаженням ретельно досліджено для згинаних елементів. О. П. Борисюк і Ю. Ю. Зятюк показали, що спільне підсилення балок сталефібробетоном у стиснутій зоні та композитами в розтягнутій змінює напружено-деформований стан перерізу і потребує врахування передісторії навантаження [10]. Для стиснутих елементів аналогічною особливістю є те, що бетон існуючої колони вже стиснений, а обойма вмикається в роботу лише на прирості навантаження.

Експериментальні дослідження колон, підсилених залізобетонними обоймами під високим рівнем навантаження, виконано у Львівській політехніці [11]. Встановлено, що методи розрахунку таких елементів мають відрізнятися від

звичайних через вплив навантаження, що діє на колону в момент підсилення. Отже, розрахунок підсилення стиснутих елементів має спиратися на реальні діаграми деформування матеріалів, а не лише на граничні зусилля.

1.2 Способи підсилення та типи обойм

Класифікацію способів підсилення стиснутих залізобетонних елементів, узагальнену автором за [1, 2, 11], наведено на рис. 1.1. Основні групи – збільшення перерізу (нарощування), обойми, розвантаження конструкцій розпірками та зміна розрахункової схеми.

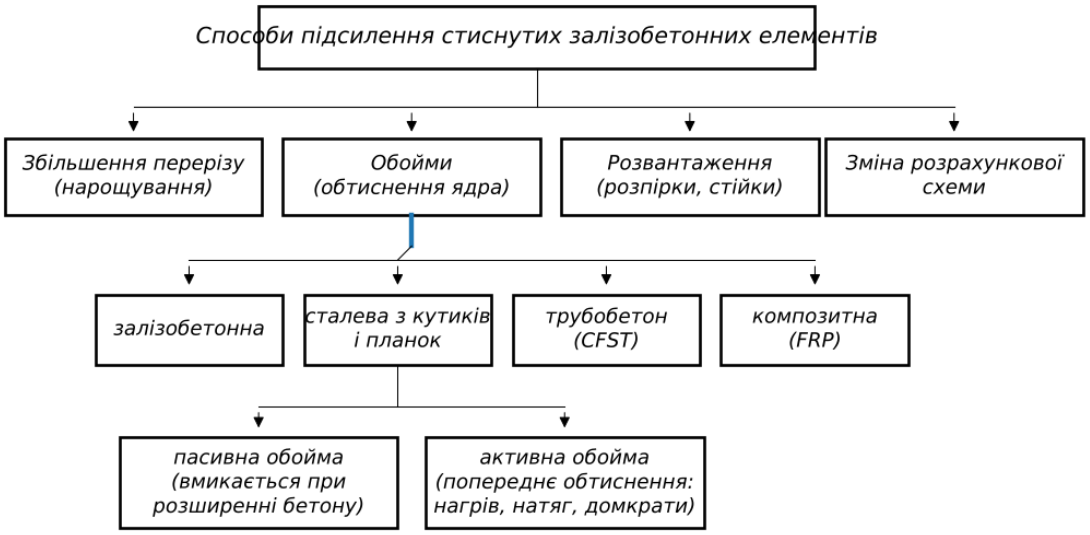


Рис. 1.1 Класифікація способів підсилення стиснутих залізобетонних елементів (складено автором)

Р. Редьква зазначає, що найбільшого поширення набули способи підсилення колон нарощуванням перерізу залізобетонними або сталевими обоймами; обойми бувають одно-, дво-, трибічні та замкнені [1]. Товщину залізобетонної обойми призначають 50–300 мм, поздовжню арматуру – не менше Ø16 мм, поперечну – Ø6–8 мм з кроком не більше 200 мм. Для навантажених центрально та позацентрово стиснутих колон рекомендовано попередньо напружені сталеві обойми з кутиків, сполучних планок і опорних подушок [1].

Поперечні перерізи основних типів обойм показано на рис. 1.2. Сталева обойма з кутиків і планок (рис. 1.2, а) обтискає бетон переважно в кутах, де

розташовані кутики; між кутиками бетон обтиснений лише частково. Залізобетонна обойма (рис. 1.2, б) збільшує переріз, але обтиснення з її боку незначне. Трубобетонний елемент (рис. 1.2, в) забезпечує найбільш рівномірне обтиснення. Композитна обойма (рис. 1.2, г) обтискає бетон пружно аж до розриву волокон.

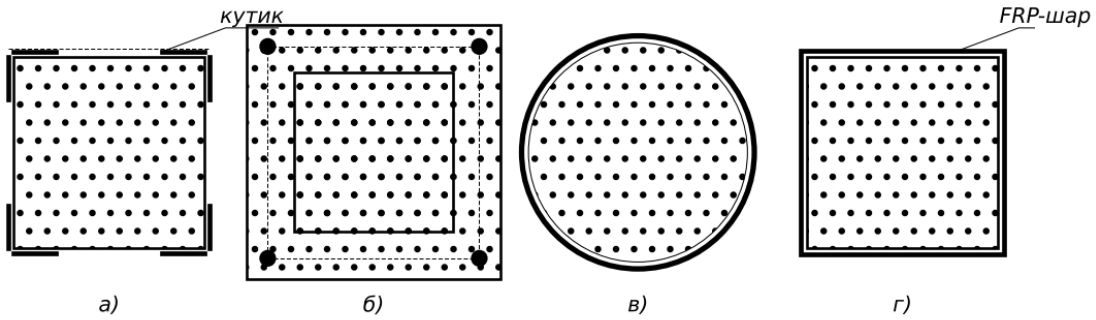


Рис. 1.2 Типи обойм: а – сталева з кутиків і планок; б – залізобетонна; в – трубобетон; г – композитна (FRP)

Порівняльну характеристику обойм наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Порівняння типів обойм для підсилення колон (узагальнено автором за [1, 12, 13, 14])

Тип обойми	Переваги	Недоліки	Характер обтиснення
Сталева з кутиків і планок	швидкий монтаж, мала маса, працює відразу	потреба антикорозійного і вогнезахисту	нерівномірне, переважно в кутах; пасивне або активне
Залізобетонна	висока вогнестійкість, значний приріст перерізу	мокрі процеси, набір міцності, збільшення розмірів	слабке, визначається хомутами
Трубобетон (CFST)	максимальна ефективність, технологічність нових конструкцій	для підсилення існуючих колон застосовується рідко	рівномірне по колу
Композитна (FRP)	мала товщина, корозійна стійкість	висока вартість, крихке руйнування, вогнестійкість	пружне, зростає до розриву волокон

Конструкцію сталевої обойми з попередньо напруженими планками описано в [1] і [13]: кутики встановлюють на розчині по кутах колони, планки приварюють з одного боку, а потім нагрівають і приварюють з другого боку. Під

час охолодження планки скорочуються і обтискають колону. Такий прийом перетворює пасивну обойму на активну, і саме він розглянутий у розділі 3.

1.3 Ефект обтиснення бетону в дослідженнях

Основи теорії обтисненого бетону заклали F. E. Richart, A. Brandtzaeg та R. L. Brown [4], які встановили, що міцність бетону при всебічному гідростатичному тиску f_l зростає приблизно на 4,1 f_l. J. B. Mander, M. J. N. Priestley та R. Park [3] запропонували єдину діаграму деформування для бетону, обтисненого поперечною арматурою, з урахуванням ефективності обтиснення в круглих і прямокутних перерізах. Ця модель досі є базовою для розрахунків обтиснених елементів.

Y. F. Wu та Y. Wei [15] запропонували загальну модель «напруження – деформація» для бетону, обтисненого як сталлю, так і композитами. Для композитних обойм Y.-G. Cao, C. Jiang і Y.-F. Wu на базі 296 експериментальних діаграм розробили уніфіковану модель для круглих, квадратних, прямокутних і еліптичних перерізів, параметрами якої є співвідношення сторін і радіус заокруглення кутів [16]. K. G. Megalooikonomou та G. S. Papavasileiou для прямокутних колон з FRP-обоймою показали чисельним моделюванням, що необтиснені зони перерізу також частково обтиснені і додають міцності, хоча й з нижчою граничною міцністю [12].

Найбільш повно ефект обтиснення вивчено для трубобетонних елементів. M. Shariati зі співавторами дослідили еволюцію контактного тиску обтиснення в осьово стиснутих трубобетонних стояках: зі зростанням D/t обтиснення зменшується, а деформація початку взаємодії бетону і сталі залежить головно від міцності бетону [17]. L. He, S. Lin і H. Jiang випробували шість трубобетонних стояків з коефіцієнтами обтиснення від 0,23 до 1,19; приріст пікової несучої здатності становив 4–15 %, але при більшому коефіцієнті обтиснення суттєво покращувалися пластичність і поведінка після піку [14].

Українська школа сталезалізобетону також накопичила значні дані. А. В. Гасенко в монографії [13] узагальнив способи самонапруження: застосування

самонапружувального цементу дало приблизно на 30 % вищу міцність ядра, а механічне обтиснення ядра під час тверднення тиском 1,5–2 МПа підвищувало несучу здатність при центральному стиску до 29 %. Д. Г. Петренко встановив, що тверднення бетону в замкненому середовищі сталевої труби підвищує його міцність на 10–15 % [18]. В. О. Сіробаба дослідив несучу здатність сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів [19], а В. М. Адаменко, Д. А. Дзюбко та О. В. Романишен – напружено-деформований стан вузлів сталезалізобетонних каркасно-монолітних будівель з використанням інформаційного моделювання [20].

Узагальнені діапазони приросту міцності за наведеними джерелами показано на рис. 1.3. Помітно, що для однакових за назвою «ефектів обтиснення» прирости відрізняються в кілька разів: вони залежать від того, що саме обтискається (ядро чи весь переріз), від рівня тиску обтиснення та від показника, яким оцінено приріст (міцність бетону чи несуча здатність елемента).

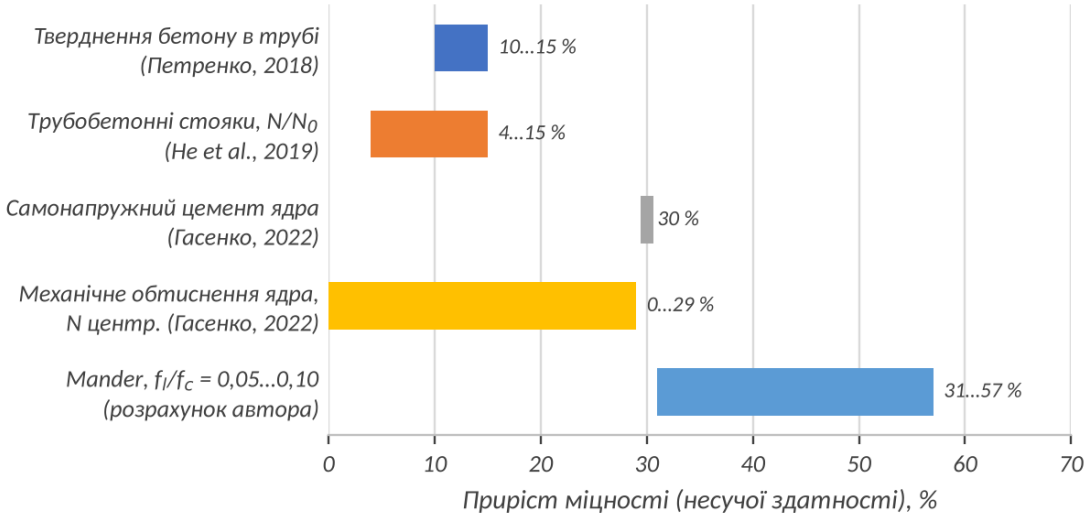


Рис. 1.3 Приріст міцності та несучої здатності завдяки обтисненню (побудовано автором за даними [18, 14, 13] і власним розрахунком)

Для обойм з окремих кутиків і планок найбільш докладне дослідження виконали R. Montuori та V. Piluso [21]. Вони запропонували модель, у якій бетон між планками обтиснений за принципом «арочного ефекту», а розрахунок

колони при позацентровому стиску виконано з урахуванням обтиснення. Саме цей підхід, поєднаний з моделлю [3], прийнято в цій роботі.

Окремо слід розглянути способи створення попереднього обтиснення. За узагальненням [13], попередні напруження в сталезалізобетонних конструкціях створюють механічним натягом або обтисненням ядра, застосуванням розширних і самонапружувальних цементів, центрифугуванням, а також конструктивними прийомами – зміною послідовності монтажу і бетонування. Для підсилення існуючих колон практично доступними є лише механічні способи: стягування кутиків струбцинами, натяг поперечних тяжів гайками і термічний спосіб – нагрівання планок перед приварюванням. Термічний спосіб найпростіший, не потребує спеціального обладнання і тому розглянутий у цій роботі.

Для сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів В. О. Сіробаба встановив, що легкий бетон в обоймі має нижчий модуль пружності і більшу деформативність, ніж важкий, і тому сильніше реагує на обмеження поперечних деформацій [19]. Ця обставина важлива для реконструкції будівель, де застосовано керамзитобетон. Дослідження вузлів каркасно-монолітних будівель [20] показали, що в зонах сполучення колон з перекриттям виникає складний напружений стан, тому кінцеві ділянки обойми, де навантаження передається через опорні столики, потребують окремого конструювання.

Узагальнюючи огляд, можна виділити три чинники, від яких залежить ефект обтиснення: жорсткість і розташування обтискального елемента (суцільна труба, окремі планки, композитна стрічка), рівень тиску обтиснення відносно міцності бетону і момент включення обойми в роботу (пасивне чи активне обтиснення). Для обойм з кутиків і планок кількісних даних щодо перших двох чинників у вітчизняній літературі недостатньо, а третій чинник практично не досліджено.

1.4 Нормативна база

Розрахунок залізобетонних елементів в Україні виконують за ДБН В.2.6-98:2009 [5] і ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [6], які передбачають нелінійну деформаційну модель з параболічно-лінійною або дволінійною діаграмою бетону. Паралельно діє ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010 [7], п. 3.1.9 якого дає залежності для обтисненого бетону: збільшену характеристичну міцність $f_{ck,c}$ та граничні деформації $\varepsilon_{c2,c}$, $\varepsilon_{cu2,c}$. Розрахунок сталевих елементів обойми, планок і зварних швів виконують за ДБН В.2.6-198:2014 [22]. Для трубобетонних елементів обтиснення враховано коефіцієнтами η_a і η_c ДСТУ-Н Б EN 1994-1-1:2010 [23], а для сталезалізобетонних перекриттів з профільованим настилом діє ДСТУ-Б В.2.6-215:2016 [24].

Отже, нормативна база дозволяє врахувати обтиснення, але для обойми з кутиків і планок тиск обтиснення і його ефективність проєктувальник має обґрунтувати самостійно. Напружено-деформований стан у цій роботі розуміємо в загальноприйнятому значенні – як сукупність напружень і деформацій у точках тіла [25].

1.5 Висновки до розділу 1. Завдання дослідження

1. Сталева обойма з кутиків і планок – найпоширеніший спосіб швидкого підсилення стиснутих залізобетонних елементів, зокрема пошкоджених. Її розраховують переважно як додаткову поздовжню арматуру, без урахування обтиснення бетону.

2. Ефект обтиснення добре вивчено для трубобетону і композитних обойм; для обойм з окремих планок він нерівномірний і залежить від кроку планок і розміру кутиків.

3. Опубліковані прирости міцності завдяки обтисненню становлять від 4 до 30 % і більше, тому потрібна кількісна оцінка для конкретних параметрів обойми.

Тому в роботі поставлено завдання: порівняти моделі обтисненого бетону; оцінити зміну деформаційних характеристик; визначити ефективний тиск

обтиснення в обоймі; оцінити активне обтиснення і напружено-деформований стан перерізу; розробити методику та приклад розрахунку.

Розділ 2

МОДЕЛІ ДЕФОРМУВАННЯ ОБТИСНЕНОГО БЕТОНУ

2.1 Механізм ефекту обтиснення

Під час осьового стиску бетон розширюється в поперечному напрямку. Доки напруження не перевищують 0,3–0,4 f_c, коефіцієнт поперечної деформації бетону становить 0,15–0,20. Після утворення мікротріщин об'єм бетону починає зростати, поперечні деформації випереджають поздовжні, і бетон, не обмежений збоку, руйнується розколюванням. Якщо поперечні деформації обмежує обойма, у бетоні виникає бічний тиск f_l. Мікротріщини розвиваються повільніше, і бетон може сприйняти більше напруження та більші деформації [3, 4].

Розрізняють пасивне і активне обтиснення. Пасивне обтиснення виникає лише тоді, коли бетон, розширюючись, навантажує обойму; на початкових етапах навантаження воно практично відсутнє. Активне обтиснення створюють заздалегідь – натягом, нагріванням планок, домкратами або самонапружувальним цементом [13]. При активному обтисненні бетон від початку навантаження працює в умовах об'ємного напруженого стану.

2.2 Моделі міцності обтисненого бетону

Модель F. E. Richart зі співавторами [4] є лінійною:

$$f_{cc} = f_c + 4{,}1 \cdot f_l \qquad (2.1)$$

де f_{cc} – міцність обтисненого бетону, МПа; f_c – міцність необтисненого бетону, МПа; f_l – тиск обтиснення, МПа.

Модель J. B. Mander зі співавторами [3] побудована на п'ятипараметричній поверхні руйнування і при однаковому тиску обтиснення в обох напрямках має вигляд

$$f_{cc} = f_c \cdot (-1{,}254 + 2{,}254 \cdot \sqrt{(1 + 7{,}94 \cdot f_l/f_c)} - 2 \cdot f_l/f_c) \qquad (2.2)$$

Відповідно до п. 3.1.9 ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1 [7] характеристична міцність обтисненого бетону

$f_{ck,c} = f_{ck} \cdot (1 + 5 \cdot \sigma_2 / f_{ck})$ при $\sigma_2 \leq 0{,}05 \cdot f_{ck}$; $f_{ck,c} = f_{ck} \cdot (1{,}125 + 2{,}5 \cdot \sigma_2 / f_{ck})$ при $\sigma_2 > 0{,}05 \cdot f_{ck}$ (2.3)

де σ_2 – ефективний бічний тиск обтиснення, що відповідає f_l.

Порівняння коефіцієнта $K = f_{cc}/f_c$ за трьома моделями показано на рис. 2.1 і в табл. 2.1.

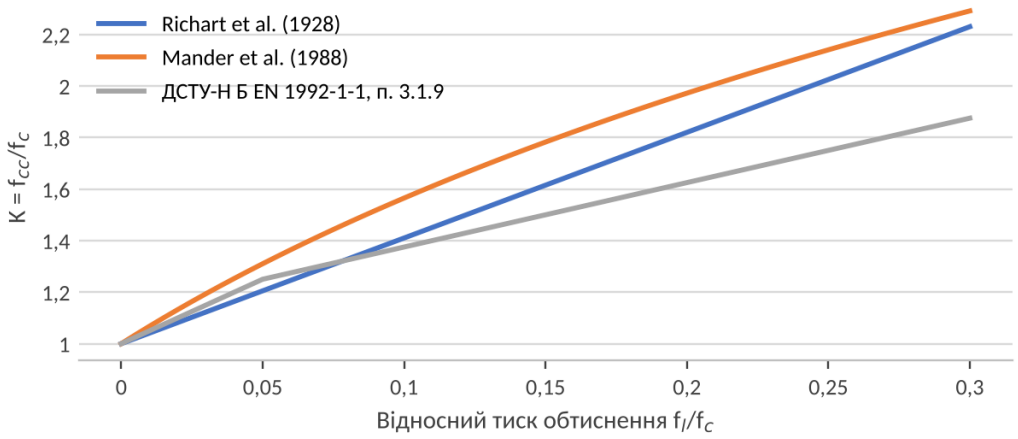


Рис. 2.1 Залежність коефіцієнта підвищення міцності від відносного тиску обтиснення (розрахунок автора)

Таблиця 2.1

Коефіцієнт підвищення міцності $K = f_{cc}/f_c$ за різними моделями (розрахунок автора)

f_l/f_c	**Richart, (2.1)**	**Mander, (2.2)**	**EN 1992-1-1, (2.3)**
0,05	1,21	1,31	1,25
0,1	1,41	1,56	1,38
0,2	1,82	1,97	1,62
0,3	2,23	2,29	1,88

При малих тисках обтиснення (до 0,1 f_c), характерних для сталевих обойм з планок, модель Mander дає найбільший приріст, а нормативна модель Єврокоду – найменший. При $f_l/f_c = 0{,}1$ розбіжність між ними становить 14 %. Модель Єврокоду для $\sigma_2 > 0{,}05\ f_{ck}$ є лінійною з кутовим коефіцієнтом 2,5, тобто значно консервативнішою за модель Richart. Для проєктування доцільно використовувати нормативну модель (2.3), а модель Mander – для аналізу деформування і верхньої оцінки.

2.3 Діаграма деформування обтисненого бетону

Повна діаграма за моделлю Mander описується виразом [3]

$$\sigma_c = f_{cc} \cdot x \cdot r / (r - 1 + x^r),\ x = \varepsilon_c/\varepsilon_{cc},\ r = E_c/(E_c - E_{sec}) \qquad (2.4)$$

де $\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}\cdot[1 + 5\cdot(f_{cc}/f_c - 1)]$ – деформація на піку; $\varepsilon_{co} = 0{,}002$; $E_c = 5000\cdot\sqrt{f_c}$ – початковий модуль пружності, МПа; $E_{sec} = f_{cc}/\varepsilon_{cc}$ – січний модуль на піку.

Розрахунок виконано для бетону класу С20/25 із середньою міцністю f_{cm} = 28 МПа, що відповідає бетону більшості колон, які підлягають підсиленню. Діаграми для різних рівнів обтиснення показано на рис. 2.2, а їхні параметри – у табл. 2.2.

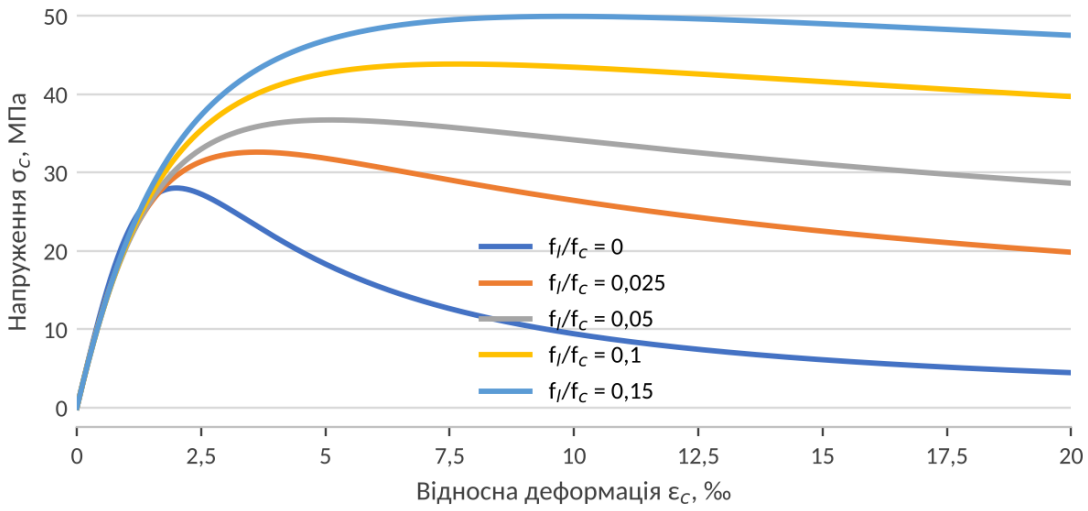


Рис. 2.2 Діаграми деформування бетону С20/25 за різного рівня обтиснення (розрахунок автора за моделлю [3])

Таблиця 2.2

Параметри діаграм обтисненого бетону С20/25 (розрахунок автора)

f_l/f_c	f_l, МПа	f_{cc}, МПа	K	ε_{cc}, ‰	E_{sec}/E_c	K за EN	$\varepsilon_{cu2,c}$, ‰
0	0,00	28,0	1,00	2,00	0,53	1,000	3,5
0,025	0,70	32,6	1,16	3,64	0,34	1,125	8,5
0,05	1,40	36,7	1,31	5,10	0,27	1,250	13,5
0,1	2,80	43,8	1,56	7,65	0,22	1,375	23,5
0,15	4,20	49,9	1,78	9,82	0,19	1,500	33,5

Початкова ділянка всіх діаграм однакова, оскільки початковий модуль пружності від обтиснення не залежить. Обтиснення змінює форму діаграми після рівня напружень близько 0,7 f_c: пік зміщується вгору і праворуч, а спадна гілка

стає пологою. Уже при f_l/f_c = 0,025, тобто при тиску лише 0,7 МПа, міцність зростає на 16 %, а деформація на піку – у 1,8 раза.

2.4 Зміна деформаційних характеристик бетону

Для оцінки зміни деформаційних характеристик розглянуто три показники: деформацію на піку ε_{cc}, граничну деформацію $\varepsilon_{cu2,c}$ та відношення січного модуля на піку до початкового. Гранична деформація за ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1 [7]

$$\varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2}\cdot(f_{ck,c}/f_{ck})^2;\ \varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0{,}2\cdot\sigma_2/f_{ck} \qquad (2.5)$$

де ε_{c2} = 0,002 і ε_{cu2} = 0,0035 – деформації необтисненого бетону класів до С50/60.

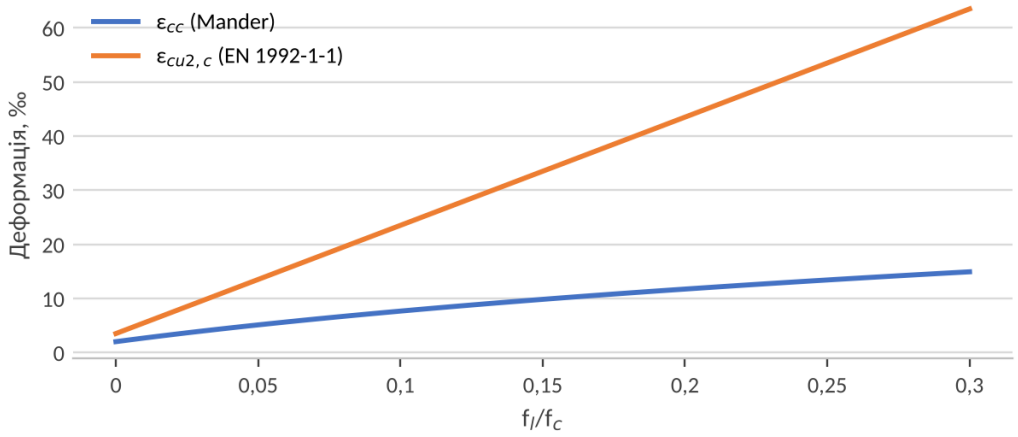


Рис. 2.3 Зміна деформації на піку та граничної деформації від рівня обтиснення (розрахунок автора)

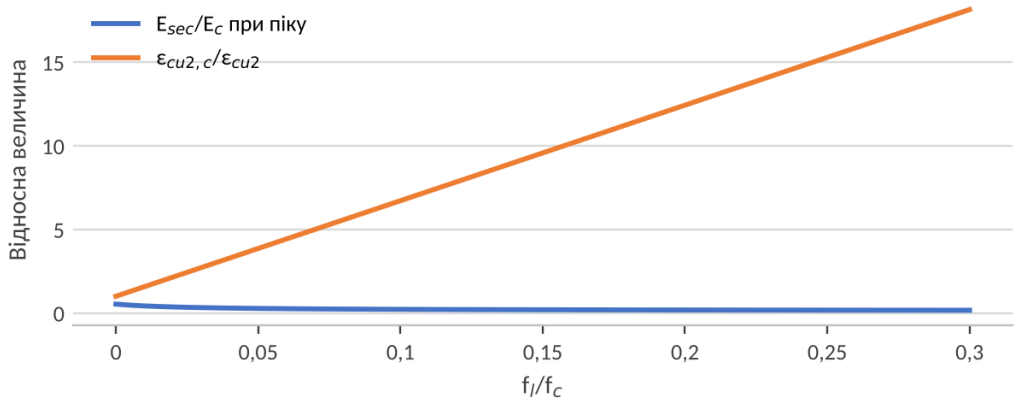


Рис. 2.4 Зміна відносного січного модуля і відносної граничної деформації (розрахунок автора)

Із рис. 2.3 і 2.4 видно, що деформаційні характеристики значно чутливіші до обтиснення, ніж міцність. При $f_l/f_c = 0{,}1$ міцність зростає в 1,38–1,57 раза, деформація на піку – у 3,8 раза, а гранична деформація – у 6,7 раза. Січний модуль на піку знижується з 0,53 до 0,22 від початкового модуля. Отже, обтиснений бетон є значно пластичнішим, і для нього вже не можна застосовувати дволінійну діаграму з $\varepsilon_{cu} = 0{,}0035$: це призводить до заниження як несучої здатності, так і деформативності елемента.

Важливим наслідком є зміна напружено-деформованого стану при спільній роботі бетону зі сталлю. Сталь кутиків С245 досягає текучості при $\varepsilon_y \approx 1{,}2$ ‰, тобто раніше за пік діаграми необтисненого бетону (2 ‰). При обтисненні пікова деформація бетону зростає до 3,6–7,7 ‰, і бетон та сталь досягають граничних станів майже одночасно, що дозволяє повніше використати обидва матеріали.

2.5 Ефективність обтиснення в обоймі з кутиків і планок

У сталевій обоймі з кутиків і планок бетон обтиснений нерівномірно (рис. 2.5). У плані тиск передається через кутики, і між ними утворюється «арка» необтисненого бетону висотою близько w'/4. По висоті між планками також утворюються арки, тож повністю обтисненим є лише ядро перерізу, розміщене всередині обох систем арок [3, 21].

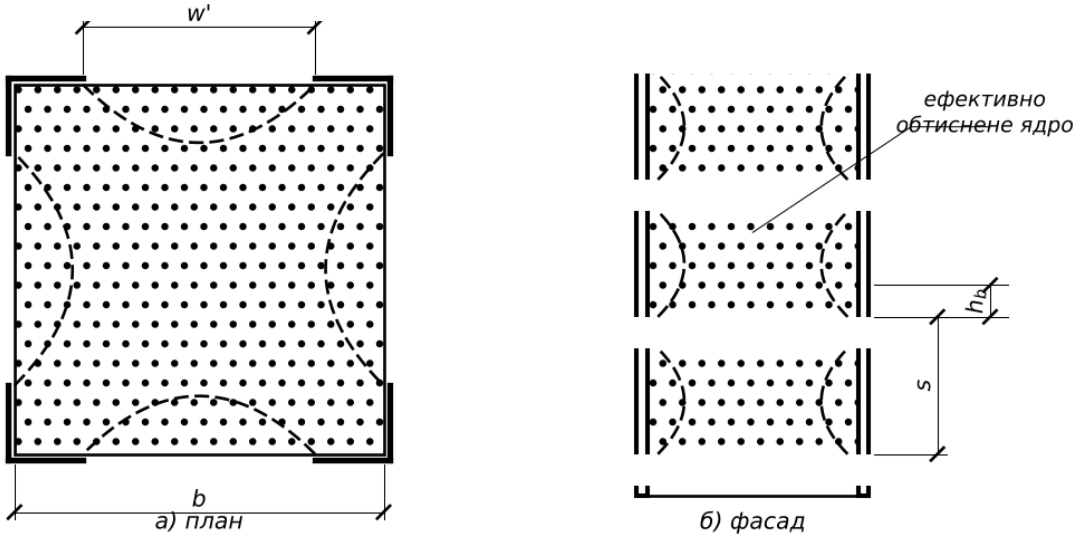


Рис. 2.5 Схема ефективно обтисненого ядра в обоймі з кутиків і планок: а – план; б – фасад (складено автором за [3, 21])

Ефективність обтиснення враховано коефіцієнтом k_e, який для квадратного перерізу з кутиками приймається за аналогією з моделлю [3]:

$$k_e = (1 - 4 \cdot w'^2/(6 \cdot b^2)) \cdot (1 - s'/(2 \cdot b))^2 \qquad (2.6)$$

де b – розмір перерізу колони, мм; $w' = b - 2 \cdot a$ – відстань між полицями кутиків, мм; a – ширина полиці кутика, мм; $s' = s - h_b$ – відстань у світлі між планками, мм; s – крок планок, мм; h_b – висота планки, мм.

Номінальний тиск обтиснення від планок при їх текучості та ефективний тиск:

$$f_l = 2 \cdot A_b \cdot f_{yb}/(b \cdot s); \; f_{l,eff} = k_e \cdot f_l \qquad (2.7)$$

де $A_b = t_b \cdot h_b$ – площа перерізу планки, мм²; f_{yb} – границя текучості сталі планок, МПа.

Результати параметричного розрахунку для колони 400×400 мм з планками висотою 100 мм зі сталі С245 (f_{yb} = 240 МПа) показано на рис. 2.6, 2.7 і в табл. 2.3.

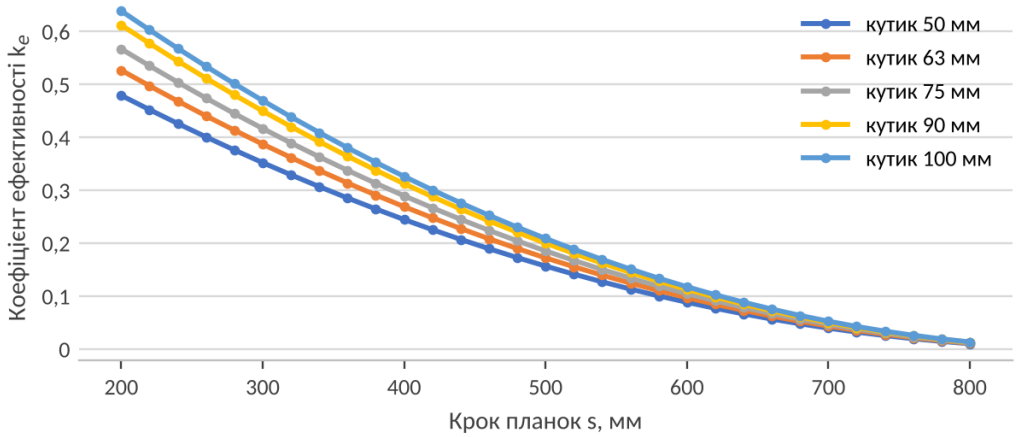


Рис. 2.6 Залежність коефіцієнта ефективності обтиснення від кроку планок і розміру кутика (розрахунок автора)

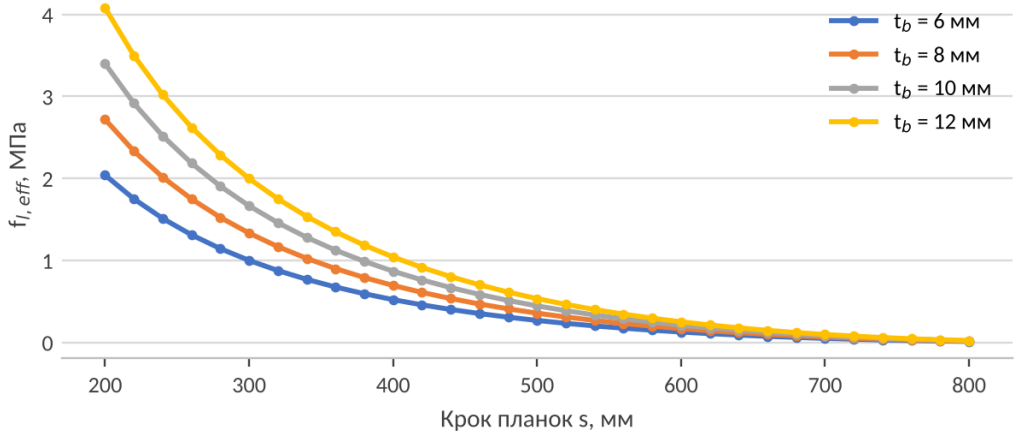


Рис. 2.7 Ефективний тиск обтиснення залежно від кроку і товщини планок (кутик 75 мм, розрахунок автора)

Таблиця 2.3

Ефективність обтиснення колони 400×400 мм обоймою з кутиків ∟75 і планок висотою 100 мм (розрахунок автора)

t_b, мм	s, мм	f_l, МПа	k_e	$f_{l,eff}$, МПа	K за (2.2)
6	300	2,40	0,416	1,00	1,23
6	400	1,80	0,289	0,52	1,12
6	500	1,44	0,185	0,27	1,06
8	300	3,20	0,416	1,33	1,30
8	400	2,40	0,289	0,69	1,16
8	500	1,92	0,185	0,35	1,08
10	300	4,00	0,416	1,66	1,36
10	400	3,00	0,289	0,87	1,20
10	500	2,40	0,185	0,44	1,11

Коефіцієнт ефективності швидко зменшується зі збільшенням кроку планок: при s = 300 мм k_e = 0,42, при s = 400 мм – 0,29, а при кроці понад 600 мм обтиснення практично зникає. Збільшення кутика з 50 до 100 мм підвищує k_e приблизно на третину, оскільки зменшує проліт арок у плані. Отже, крок планок є головним параметром, що керує обтисненням; збільшення товщини планок без зменшення кроку малоефективне. Рекомендовано крок планок не більше 0,75 b та розмір кутика не менше 0,18 b.

2.6 Висновки до розділу 2

1. Моделі Richart, Mander і ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1 дають близькі результати при малих тисках обтиснення, але модель Єврокоду найбільш консервативна; при f_l/f_c = 0,1 різниця з моделлю Mander становить 14 %.

2. Обтиснення значно сильніше змінює деформаційні характеристики бетону, ніж його міцність: при f_l/f_c = 0,1 деформація на піку зростає в 3,8 раза, гранична деформація – у 6,7 раза, а січний модуль на піку знижується в 2,4 раза.

3. В обоймі з кутиків і планок ефективність обтиснення k_e = 0,19–0,42 і визначається переважно кроком планок. Ефективний тиск обтиснення для практичних параметрів обойми становить 0,3–1,7 МПа, що дає приріст міцності бетону 7–36 %.

Розділ 3

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН БЕТОНУ І ПЕРЕРІЗУ КОЛОНИ В СТАЛЕВІЙ ОБОЙМІ

3.1 Активне обтиснення нагріванням планок

У пасивній обоймі планки починають працювати лише після того, як бетон почне помітно розширюватися, тобто при напруженнях понад 0,7 f_c. Крім того, між обоймою і бетоном завжди є зазори в розчинному шарі. Щоб обойма працювала від початку, планки приварюють до кутиків з одного боку, нагрівають і приварюють з другого боку в нагрітому стані [1, 13]. Під час охолодження планка прагне скоротитися на $\alpha \cdot \Delta T$, але цьому перешкоджає колона, і в планці виникає розтяг:

$$\sigma_{b0} = \eta \cdot \alpha \cdot E_s \cdot \Delta T \qquad (3.1)$$

де $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1} – коефіцієнт температурного розширення сталі; $E_s = 2{,}06 \cdot 10^5$ МПа – модуль пружності сталі; ΔT – перепад між температурою нагрівання і температурою експлуатації, °C; η – коефіцієнт, що враховує податливість кутиків, розчинного шару, зварних швів і повзучість бетону.

Залежність напруження в планці від ΔT при різних η показано на рис. 3.1. При нагріванні до 100 °C (ΔT = 80 °C) теоретичне напруження становить 198 МПа, тобто близько 80 % границі текучості. З урахуванням втрат прийнято методичне значення η = 0,5, за якого σ_{b0} = 99 МПа.

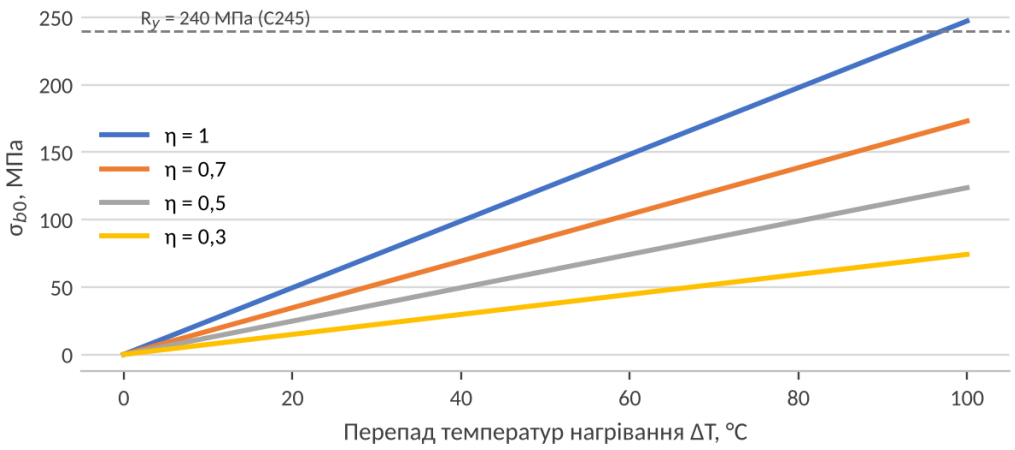


Рис. 3.1 Напруження в планці від попереднього нагрівання (розрахунок автора)

Для обойми з планок 100×8 мм з кроком 300 мм на колоні 400×400 мм активний ефективний тиск обтиснення за (2.6), (2.7) з заміною f_{yb} на σ_{b0} становить $f_{l0} = 0{,}55$ МПа, а граничний пасивний тиск при текучості планок – $f_{l,eff} = 1{,}33$ МПа. Діаграми деформування бетону в цих двох випадках порівняно з необтисненим бетоном показано на рис. 3.2 і в табл. 3.1.

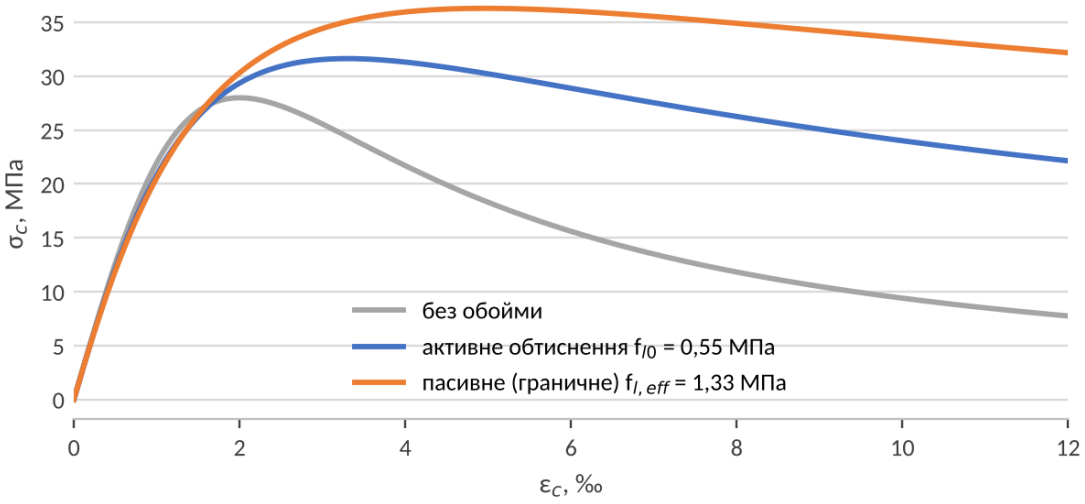


Рис. 3.2 Діаграми деформування бетону С20/25: без обойми, при активному і граничному пасивному обтисненні (розрахунок автора)

Таблиця 3.1

Вплив виду обтиснення на параметри діаграми бетону С20/25 (розрахунок автора)

Стан бетону	**f_l, МПа**	**f_{cc}, МПа**	**ε_{cc}, ‰**
Без обойми	0	28,0	2,0
Активне обтиснення (нагрівання планок)	0,55	31,6	3,3
Пасивне обтиснення при текучості планок	1,33	36,3	5,0

Активне обтиснення підвищує міцність бетону на 13 %, а граничне пасивне – на 30 %. Оскільки зусилля в планці не може перевищити її несучої здатності, попереднє напруження не додається до граничного пасивного тиску, а лише використовує частину ресурсу планки заздалегідь. Тому основна користь активного обтиснення – не в збільшенні граничної міцності, а в тому, що обойма включається в роботу від початку довантаження, без «запізнення», і бетон

працює в умовах об'ємного напруженого стану на всіх етапах. Це особливо важливо для колон, що підсилюються під навантаженням, коли бетон уже стиснений до рівня 0,5–0,7 f_c. Аналогічний висновок про роль попереднього самонапруження сталезалізобетонних конструкцій зроблено в [13].

3.2 Деформаційна модель перерізу колони з обоймою

Для оцінки напружено-деформованого стану перерізу застосовано нелінійну деформаційну модель за ДБН В.2.6-98:2009 [5] і ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [6] з гіпотезою плоских перерізів. Рівняння рівноваги:

$$N = \Sigma\, \sigma_{ci} \cdot A_{ci} + \Sigma\, \sigma_{sj} \cdot A_{sj};\; M = \Sigma\, \sigma_{ci} \cdot A_{ci} \cdot y_{ci} + \Sigma\, \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \cdot y_{sj} \qquad (3.2)$$

$$\varepsilon(y) = \varepsilon_0 + (1/r) \cdot y \qquad (3.3)$$

де σ_{ci}, A_{ci}, y_{ci} – напруження, площа і координата і-ї смуги бетону; σ_{sj}, A_{sj}, y_{sj} – те саме для j-го стрижня арматури або кутика; ε_0 – деформація на осі перерізу; $1/r$ – кривизна.

Бетон описано параболічно-прямокутною діаграмою (2.3), (2.5) з параметрами $f_{ck,c}$, $\varepsilon_{c2,c}$, $\varepsilon_{cu2,c}$ для обтисненого бетону, сталь – діаграмою Прандтля. Переріз розбито на 400 смуг. Граничні стани визначено за досягненням граничної деформації в крайньому волокні або деформації ε_{c2} у точці на відстані $(1 - \varepsilon_{c2}/\varepsilon_{cu2}) \cdot h$ від стиснутої грані [7]. Алгоритм реалізовано автором у Python.

Розглянуто колону 400×400 мм з бетону С20/25 з армуванням 4Ø20 А500С. Обойма – чотири кутики ∟ 75×6 зі сталі С245 (площа кожного 8,78 см²) та планки 100×8 мм з кроком 300 мм. Розглянуто три розрахункові випадки:

– А – колона без підсилення;

– Б – колона з обоймою, кутики враховано як додаткову арматуру, обтиснення не враховано (традиційний підхід);

– В – колона з обоймою з урахуванням обтиснення бетону ($f_{l,eff}$ = 1,33 МПа).

Для порівняння ролі обтиснення в цьому підрозділі використано характеристичні значення міцності (коефіцієнти надійності за матеріалом дорівнюють одиниці). Кутики вважаються включеними в роботу через опорні столики.

3.3 Діаграми взаємодії N–M

Діаграми взаємодії поздовжньої сили і згинального моменту для трьох випадків показано на рис. 3.3, а характерні точки – у табл. 3.2.

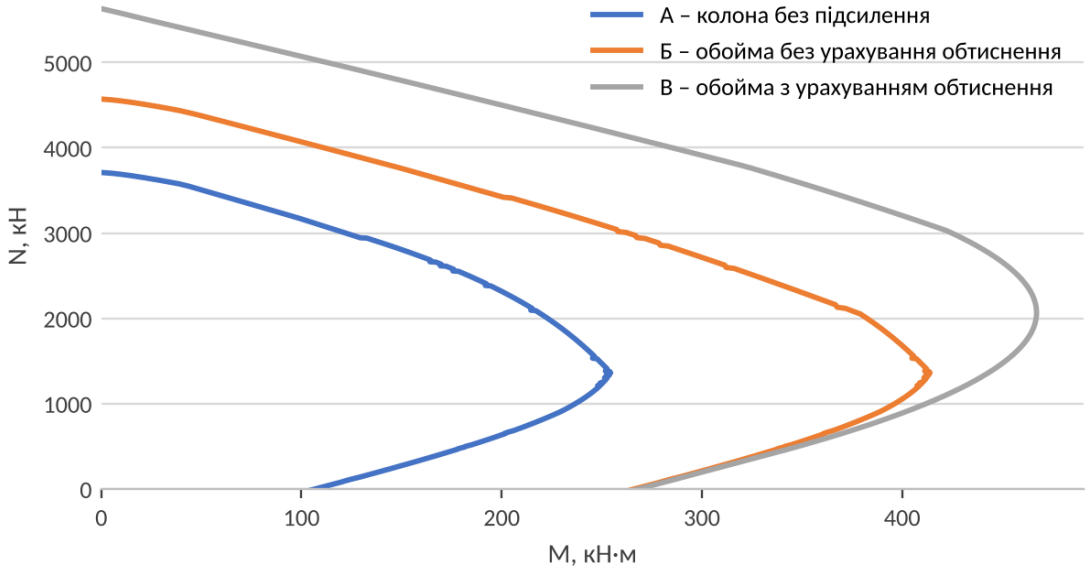


Рис. 3.3 Діаграми взаємодії N–M перерізу колони 400×400 мм (розрахунок автора)

Таблиця 3.2

Несуча здатність перерізу в характерних точках (розрахунок автора)

Показник	А	Б	В
N_0 (центральний стиск), кН	3710	4571	5631
N при e = 20 мм, кН	3386	4172	5067
N при e = 100 мм, кН	2138	2841	3548
M_{max}, кН·м	254	414	467
Приріст N при e = 20 мм відносно А, %	–	23	50

Традиційний розрахунок (випадок Б) показує приріст несучої здатності при випадковому ексцентриситеті 20 мм на 23 %. Урахування обтиснення (випадок В) збільшує приріст до 50 %. Таким чином, частка приросту, зумовлена саме обтисненням бетону, становить близько 53 % від загального приросту при e = 20 мм і 50 % при e = 100 мм. Зі збільшенням ексцентриситету роль обтиснення залишається суттєвою, оскільки зростання граничної деформації $\varepsilon_{cu2,c}$ збільшує висоту стиснутої зони, в якій напруження досягають розрахункового опору.

Важливо, що обтиснення змінює і характер руйнування: при $\varepsilon_{cu2,c} = 16{,}8$ ‰ замість 3,5 ‰ розтягнута арматура і кутики встигають досягти текучості, а руйнування стає пластичним. Цей ефект узгоджується з даними [14] щодо кращої пластичності трубобетонних елементів з більшим коефіцієнтом обтиснення.

3.4 Вплив рівня навантаження під час підсилення

Колони здебільшого підсилюють без повного розвантаження. До моменту включення обойми бетон і арматура колони вже мають деформацію ε_{pre}, що відповідає діючому навантаженню N_{pre}, а кутики обойми деформуються лише на прирості $\varepsilon - \varepsilon_{pre}$ [11]. Якщо гранична деформація бетону дорівнює $\varepsilon_{c2} = 2$ ‰, то при високому рівні попереднього навантаження кутики до моменту руйнування бетону не досягають текучості і використовуються неповністю.

Для оцінки цього ефекту виконано розрахунок центрально стиснутої колони 400×400 мм (характеристичні значення міцності) при рівні навантаження під час підсилення $\beta = N_{pre}/N_0$ від 0 до 0,8. Несуча здатність підсиленої колони

$$N_u = A_c \cdot \sigma_c(\varepsilon_u) + A_s \cdot \sigma_s(\varepsilon_u) + A_a \cdot \min(f_{ya};\ E_s \cdot (\varepsilon_u - \varepsilon_{pre})) \qquad (3.4)$$

де ε_u – гранична деформація бетону при осьовому стиску ($\varepsilon_{c2} = 2$ ‰ без урахування обтиснення і $\varepsilon_{c2,c} = 3{,}34$ ‰ з урахуванням обтиснення за (2.5)); A_a, f_{ya} – площа і границя текучості кутиків.

Результати показано на рис. 3.4 і в табл. 3.3.

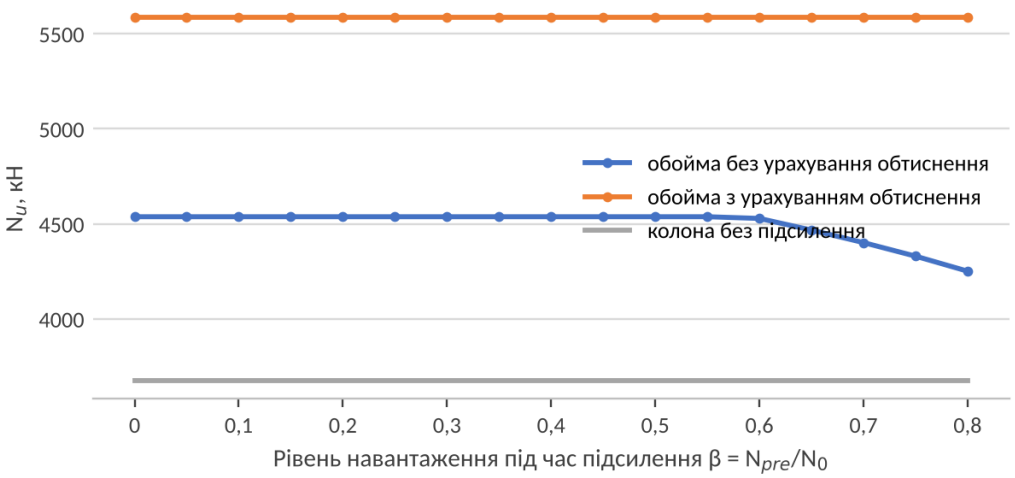


Рис. 3.4 Вплив рівня навантаження під час підсилення на несучу здатність колони (розрахунок автора)

Таблиця 3.3

Несуча здатність центрально стиснутої колони залежно від рівня навантаження під час підсилення, кН (розрахунок автора)

β	Без підсилення	Обойма без обтиснення	Обойма з обтисненням	Різниця, %
0,0	3677	4538	5588	23
0,4	3677	4538	5588	23
0,6	3677	4529	5588	23
0,7	3677	4402	5588	27
0,8	3677	4251	5588	31

Без урахування обтиснення при β > 0,6 несуча здатність підсиленої колони знижується, оскільки кутики не встигають досягти текучості: при β = 0,8 втрата становить 6 %. Урахування обтиснення збільшує граничну деформацію бетону до 3,34 ‰, і кутики досягають текучості за будь-якого рівня попереднього навантаження в розглянутому діапазоні. Отже, обтиснення не лише підвищує міцність бетону, а й компенсує негативний вплив підсилення під навантаженням. Це ще один аргумент на користь попереднього обтиснення планок: воно забезпечує включення обойми в роботу саме тоді, коли бетон існуючої колони вже напружений.

3.5 Порівняння з трубобетонним елементом

Для порівняння ефективності обтиснення обоймою з кутиків з найбільш ефективним типом обойми – сталевою трубою – розраховано несучу здатність трубобетонного стояка за ДСТУ-Н Б EN 1994-1-1 [23]:

$$N_{pl,Rk} = \eta_a \cdot A_a \cdot f_y + A_c \cdot f_{ck} \cdot (1 + \eta_c \cdot (t/d) \cdot (f_y/f_{ck})) \quad (3.5)$$

$$\eta_a = 0{,}25 \cdot (3 + 2 \cdot \bar{\lambda}) \le 1;\ \eta_c = 4{,}9 - 18{,}5 \cdot \bar{\lambda} + 17 \cdot \bar{\lambda}^2 \ge 0 \quad (3.6)$$

де A_a, A_c – площі сталі і бетону; t, d – товщина стінки і діаметр труби; $\bar{\lambda}$ – умовна гнучкість елемента.

Розрахунок виконано для труби діаметром 273 мм зі сталі S355 і бетону C25/30 (f_{ck} = 30 МПа) при різних товщинах стінки (рис. 3.5).

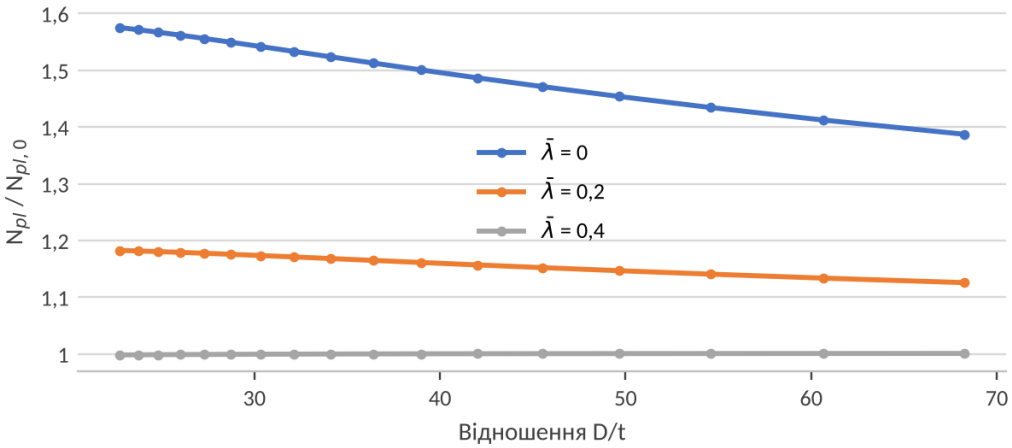


Рис. 3.5 Відносне збільшення несучої здатності трубобетонного стояка завдяки обтисненню за ДСТУ-Н Б EN 1994-1-1 (розрахунок автора)

Для короткого трубобетонного стояка ($\bar{\lambda}$ = 0) з D/t = 34 коефіцієнт обтиснення $\xi = A_a f_y/(A_c f_{ck})$ = 1,52, а нормативний приріст несучої здатності завдяки обтисненню – 52 %. Із зростанням гнучкості до $\bar{\lambda}$ = 0,4 приріст зникає. Для порівняння, в обоймі з кутиків і планок приріст міцності бетону становить 7–36 % (табл. 2.3). Отже, сталева обойма з окремих елементів реалізує лише частину можливого ефекту обтиснення, і вибір кроку планок має вирішальне значення.

3.6 Імовірнісна оцінка приросту несучої здатності

Ефект обтиснення залежить від параметрів, які мають значний розкид: міцності існуючого бетону, фактичної границі текучості планок і ефективності обтиснення k_e, що залежить від якості виконання розчинного шару і зварних швів. Для оцінки надійності результату виконано моделювання методом Монте-Карло (20 000 реалізацій) для центрально стиснутої колони. Прийнято: f_c – нормальний розподіл із середнім 28 МПа і коефіцієнтом варіації 0,15; f_{yb} – нормальний розподіл із середнім 270 МПа і коефіцієнтом варіації 0,07; k_e – рівномірний розподіл у межах 0,30–0,52. Критерій – відношення несучої здатності підсиленої колони (з кутиками і обтисненням) до несучої здатності колони без підсилення.

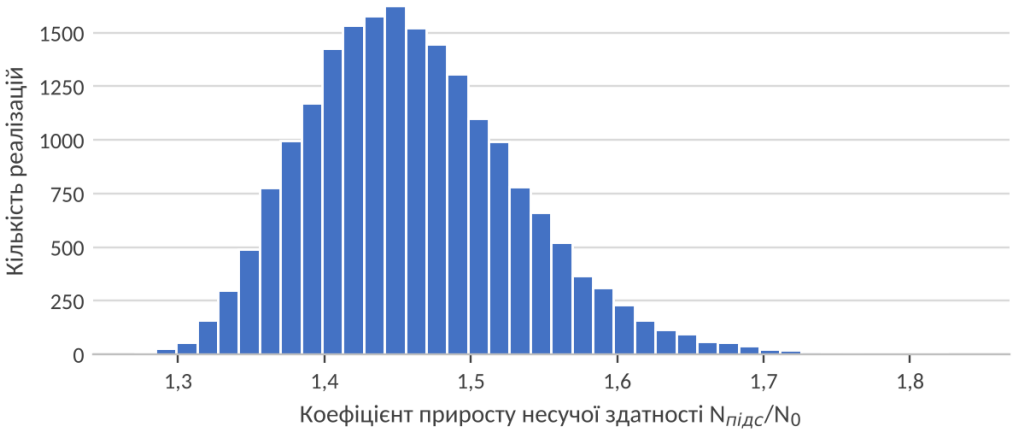


Рис. 3.6 Розподіл коефіцієнта приросту несучої здатності (моделювання Монте-Карло, розрахунок автора)

Розподіл результатів показано на рис. 3.6. Середнє значення коефіцієнта приросту становить 1,46, стандартне відхилення – 0,072, 5 %-й квантиль – 1,35, 95 %-й – 1,59. Навіть за несприятливого поєднання параметрів обойма забезпечує приріст несучої здатності не менше 35 %.

Аналіз чутливості (рис. 3.7) показує, що найбільший вплив на результат має коефіцієнт ефективності обтиснення k_e, тобто якість конструктивного виконання обойми. Вплив міцності бетону протилежний за знаком: чим слабший бетон, тим більший відносний приріст від обойми, оскільки тиск обтиснення

відносно міцності бетону зростає. Тому підсилення обоймою найефективніше саме для колон з низькою фактичною міцністю бетону.

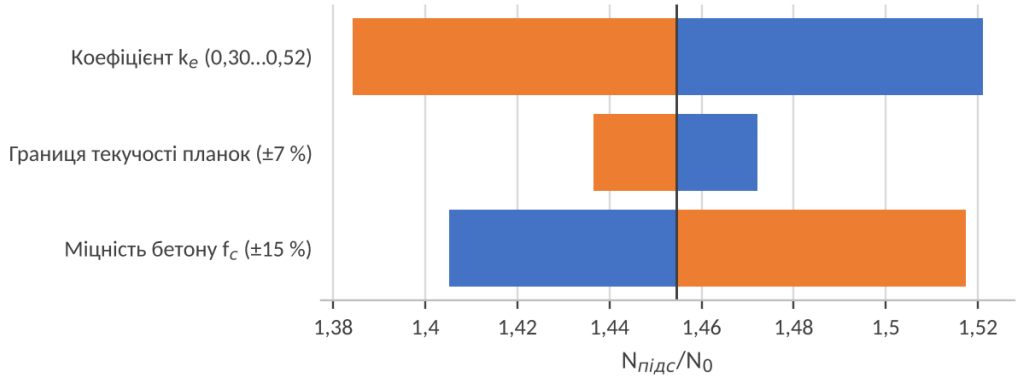


Рис. 3.7 Чутливість коефіцієнта приросту несучої здатності до вхідних параметрів (розрахунок автора)

Таблиця 3.4

Результати аналізу чутливості (розрахунок автора)

Параметр	**Нижнє значення**	**Базове**	**Верхнє значення**
Міцність бетону f_c (±15 %)	1,405	1,455	1,517
Границя текучості планок (±7 %)	1,437	1,455	1,472
Коефіцієнт k_e (0,30…0,52)	1,384	1,455	1,521

3.7 Висновки до розділу 3

1. Попереднє нагрівання планок до 100 °C створює в них напруження близько 99 МПа з урахуванням втрат і активний тиск обтиснення 0,55 МПа, що підвищує міцність бетону на 13 %. Граничний приріст визначається пасивним обтисненням (30 %), а активне обтиснення забезпечує включення обойми в роботу від початку довантаження.

2. Урахування обтиснення в деформаційній моделі перерізу збільшує розрахунковий приріст несучої здатності колони при e = 20 мм з 23 до 50 %; частка обтиснення становить близько половини загального приросту.

3. Обтиснення змінює характер руйнування з крихкого на пластичне завдяки зростанню граничної деформації бетону до 16,8 ‰.

4. При рівні навантаження під час підсилення понад 0,6 N_0 без урахування обтиснення кутики обойми використовуються неповністю; обтиснення усуває цей недолік.

5. Імовірнісна оцінка дає 5 %-й квантиль коефіцієнта приросту 1,35; найбільший вплив має коефіцієнт ефективності обтиснення k_e, тобто якість виконання обойми.

Розділ 4

МЕТОДИКА І ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ПІДСИЛЕННЯ КОЛОНИ СТАЛЕВОЮ ОБОЙМОЮ

4.1 Алгоритм розрахунку

На основі результатів розділів 2 і 3 складено алгоритм розрахунку підсилення залізобетонної колони сталевою обоймою з урахуванням обтиснення (рис. 4.1). Він передбачає визначення фактичних характеристик колони за результатами обстеження [8], призначення параметрів обойми, обчислення ефективного тиску обтиснення за (2.6), (2.7), характеристик обтисненого бетону за (2.3), (2.5) і перевірку несучої здатності за деформаційною моделлю (3.2), (3.3).

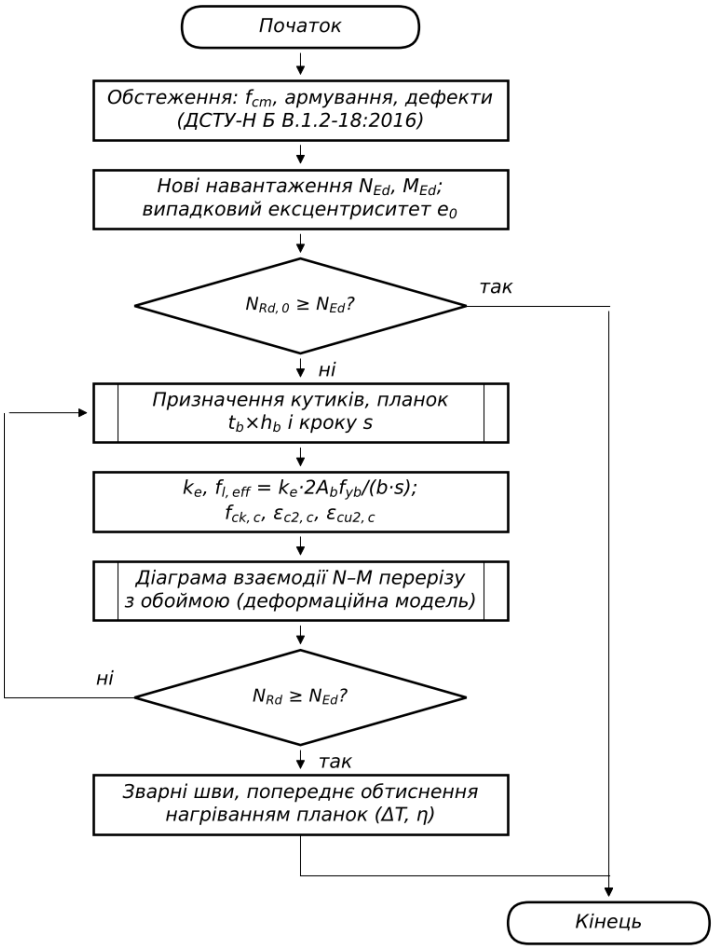


Рис. 4.1 Блок-схема алгоритму розрахунку підсилення колони сталевою обоймою з урахуванням обтиснення (складено автором)

Особливості алгоритму порівняно з традиційним підходом:

– тиск обтиснення визначається з урахуванням коефіцієнта ефективності k_e, тобто залежить від кроку планок і розміру кутиків;

– для обтисненого бетону застосовуються збільшені міцність і граничні деформації за ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1 [7], що консервативніше за модель Mander;

– кутики враховуються в перерізі лише за умови передачі на них навантаження через опорні столики;

– якщо колона підсилюється під навантаженням, рекомендовано виконувати попереднє обтиснення нагріванням планок, щоб обойма включалася в роботу від початку довантаження.

4.2 Вихідні дані прикладу

Розглянуто колону першого поверху каркасної виробничої будівлі, що реконструюється з влаштуванням надбудови. Переріз колони 400×400 мм, бетон класу С20/25 (f_{cd} = 13,3 МПа), поздовжня арматура 4Ø20 А500С (f_{yd} = 435 МПа), розрахункова довжина 4,2 м. Після реконструкції розрахункове поздовжнє зусилля N_{Ed} = 3600 кН при випадковому ексцентриситеті e_0 = max(h/30; 20 мм) = 20 мм [7]. Обойма – кутики ∟75×6 зі сталі С245 (R_y = 240 МПа [22]) і планки висотою 100 мм.

Несуча здатність колони без підсилення при e_0 = 20 мм за деформаційною моделлю $N_{Rd,0}$ = 2371 кН < N_{Ed} = 3600 кН, тобто підсилення потрібне. Нестача несучої здатності становить 52 %.

4.3 Підбір параметрів обойми

Розраховано несучу здатність колони з обоймою для п'яти варіантів планок (табл. 4.1, рис. 4.2).

Таблиця 4.1

Порівняння варіантів обойми (розрахункові значення, e_0 = 20 мм; розрахунок автора)

t_b, мм	s, мм	$f_{l,eff}$, МПа	N_{Rd}, кН	$N_{Rd}/N_{Rd,0}$	Маса планок, кг/м
8	500	0,35	3329	1,40	21,6
8	400	0,69	3510	1,48	27,0
8	300	1,33	3739	1,58	36,0
10	400	0,87	3598	1,52	33,8
10	300	1,66	3820	1,61	45,0

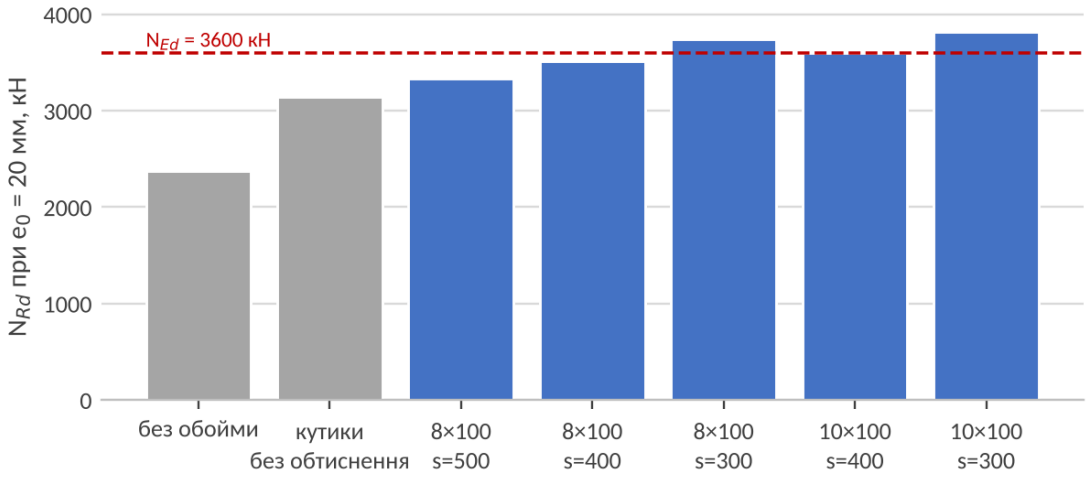


Рис. 4.2 Несуча здатність колони при різних варіантах обойми (розрахунок автора)

Якщо обтиснення не враховувати, несуча здатність колони з кутиками ∟75×6 становить 3138 кН і не забезпечує потрібних 3600 кН; довелося б збільшувати кутики або встановлювати додаткові стійки. З урахуванням обтиснення умова $N_{Rd} \geq N_{Ed}$ виконується для планок 100×8 мм з кроком 300 мм: N_{Rd} = 3739 кН, запас – 3,9 %. Варіант з планками 100×10 мм і кроком 400 мм потребує меншої кількості зварних швів, але його несуча здатність (3598 кН) дещо менша за потрібну. Діаграму взаємодії для прийнятого варіанта показано на рис. 4.3.

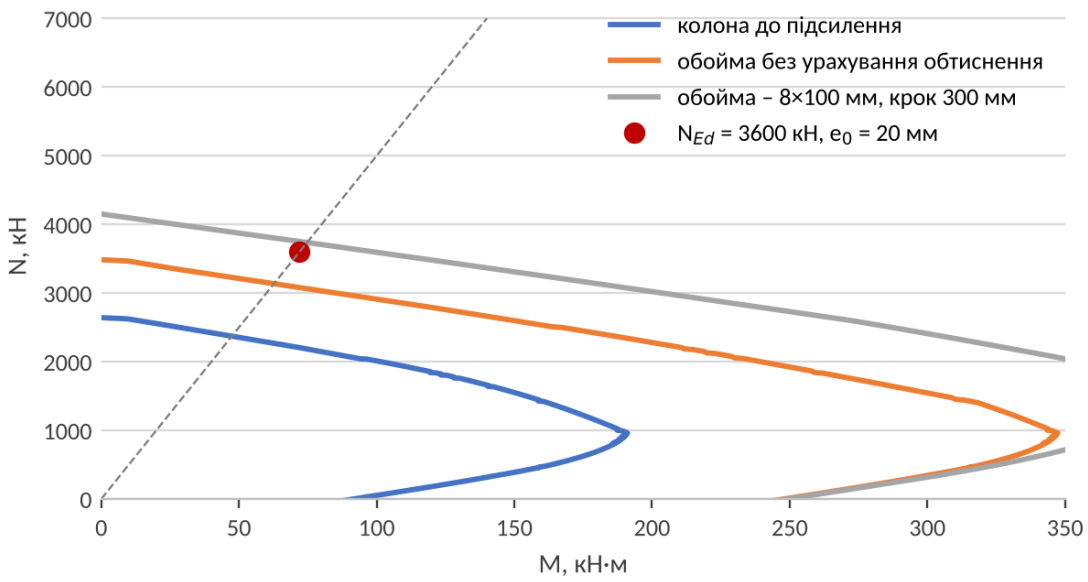


Рис. 4.3 Перевірка несучої здатності колони з прийнятою обоймою (розрахунок автора)

4.4 Розрахунок зварних швів планок

Зусилля в планці при її текучості

$$F_b = t_b \cdot h_b \cdot R_y = 8 \cdot 100 \cdot 240 = 192\,000 \text{ Н} = 192 \text{ кН} \quad (4.1)$$

Необхідна довжина кутових швів кріплення кінця планки до кутика при катеті $k_f = 8$ мм, електродах типу Е46 ($R_{wf} = 200$ МПа) і $\beta_f = 0{,}7$ [22]:

$$l_w = F_b/(\beta_f \cdot k_f \cdot R_{wf}) = 192\,000/(0{,}7 \cdot 8 \cdot 200) = 171 \text{ мм} \quad (4.2)$$

Фактична довжина швів (два флангові по 60 мм і лобовий 100 мм) – 220 мм > 171 мм, міцність швів забезпечена.

4.5 Конструювання і технологія улаштування обойми

Конструктивну схему прийнятої обойми показано на рис. 4.4. Кутики встановлюють по кутах колони на цементно-піщаному розчині М150 для щільного прилягання. Вгорі та внизу кутики спирають на опорні столики (кутики або листи), приварені до закладних деталей або закріплені анкерами в ригелі і фундаменті. Це забезпечує передачу навантаження на кутики.

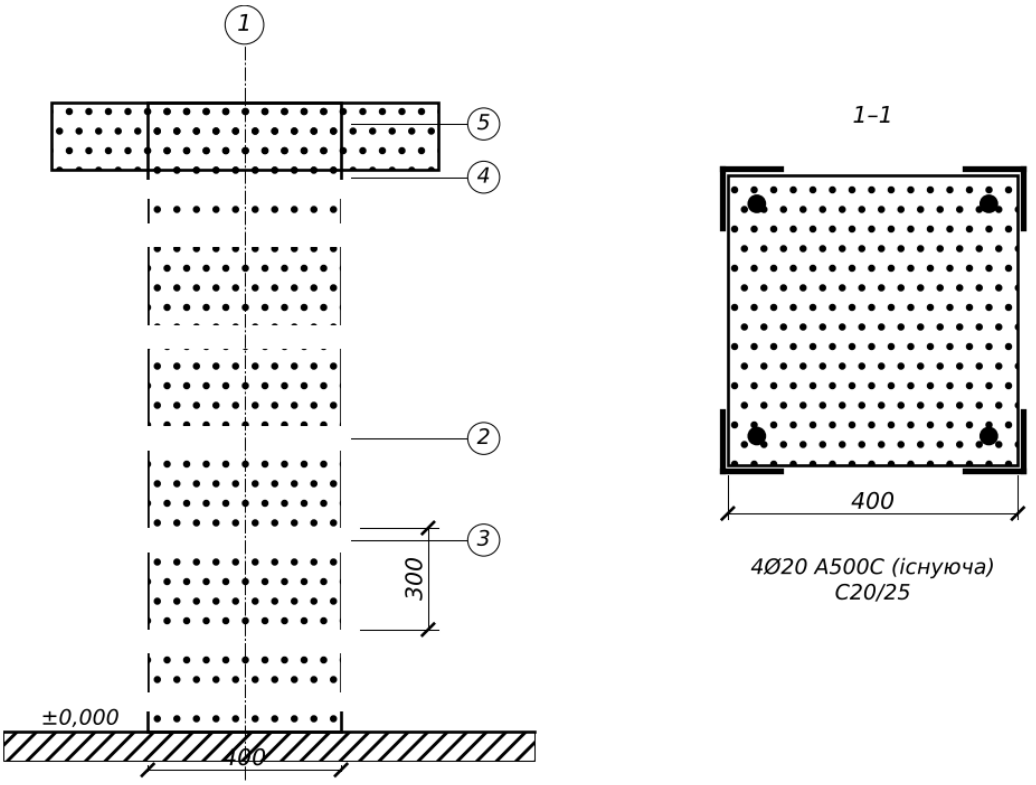


Рис. 4.4 Конструктивна схема підсилення колони сталевою обоймою: 1 – вісь колони; 2 – кутик ∟ 75×6; 3 – планка 100×8; 4 – опорний столик; 5 – ригель (складено автором)

Послідовність робіт:

– очищення поверхні колони, видалення пошкодженого бетону, відновлення захисного шару ремонтним розчином;

– встановлення кутиків на розчині і тимчасове стягнення їх струбцинами;

– приварювання планок до кутиків з одного боку;

– нагрівання планок газовим пальником до 100–120 °С з контролем температури термоіндикаторними олівцями або пірометром і приварювання вільних кінців у нагрітому стані;

– приварювання опорних столиків, ін'єктування зазорів між кутиками і бетоном;

– антикорозійний і вогнезахисний захист обойми.

Нагрівання планок слід виконувати від середини висоти колони до кінців, щоб обтиснення розподілялося рівномірно. Порівняно з нарощуванням

залізобетонною обоймою цей спосіб скорочує тривалість робіт на одній колоні до однієї-двох змін і не потребує набору міцності бетоном.

4.6 Порівняння з альтернативними способами підсилення

Для обґрунтування вибору сталевої обойми виконано якісне порівняння з залізобетонною і композитною обоймами для умов прикладу (табл. 4.2). Залізобетонна обойма товщиною 80 мм збільшує переріз колони до 560×560 мм і зменшує корисну площу приміщення, а також потребує опалубки, бетонування і щонайменше 7–14 діб набору міцності. Композитна обойма з вуглепластику ефективна для круглих колон, але для квадратного перерізу без заокруглення кутів її ефективність значно знижується [12, 16], а вартість матеріалів висока.

Таблиця 4.2

Порівняння способів підсилення колони 400×400 мм (узагальнено автором)

Показник	**Сталева обойма з обтисненням**	**Залізобетонна обойма**	**Композитна (FRP) обойма**
Збільшення розмірів перерізу	до 32 мм на сторону	160 мм на сторону	2–3 мм
Тривалість робіт на одній колоні	1–2 зміни	2–3 тижні з набором міцності	1–2 зміни
Включення в роботу	одразу, з попереднім обтисненням	після набору міцності	пасивне, після розширення бетону
Мокрі процеси	лише розчин під кутиками	бетонування	клейові склади
Вогнезахист	потрібен	не потрібен	потрібен обов'язково
Витрата сталі (прийнятий варіант)	27,6 кг/м кутиків + 36,0 кг/м планок	арматура обойми	–

Отже, для швидкого підсилення колон без зупинки експлуатації сталева обойма з попередньо напруженими планками є найбільш раціональною. Урахування обтиснення дозволяє не збільшувати переріз кутиків, тобто знижує витрату сталі порівняно з традиційним розрахунком.

4.7 Висновки до розділу 4

1. Розроблено алгоритм розрахунку підсилення колони сталевою обоймою з урахуванням ефекту обтиснення на основі нормативної деформаційної моделі та залежностей ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1.

2. У прикладі урахування обтиснення дозволило забезпечити потрібну несучу здатність (3739 кН ≥ 3600 кН) обоймою з кутиків ∟75×6, тоді як без урахування обтиснення ця обойма була б недостатньою (3138 кН).

3. Найраціональніше зменшувати крок планок, а не збільшувати їхню товщину: перехід від кроку 500 до 300 мм збільшує несучу здатність на 12 %.

Розділ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Улаштування сталевих обойм виконується в діючих або реконструйованих будівлях і включає роботи на висоті, електрозварювання, газополуменеве нагрівання, різання і шліфування металу. Під час цих робіт на працівників впливають такі небезпечні і шкідливі фактори:

– ураження електричним струмом від зварювального обладнання та ручного електроінструменту;

– зварювальний аерозоль, що містить сполуки марганцю, і гази;

– підвищений рівень шуму від кутової шліфмашини та перфоратора;

– падіння з висоти та падіння предметів з риштувань;

– опіки, пожежна небезпека від нагрітих планок, бризок металу і газового пальника;

– випромінювання зварювальної дуги;

– тяжкість праці під час переміщення кутиків і планок.

Заходи щодо зменшення впливу цих факторів наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Заходи з охорони праці під час улаштування сталевих обойм

Фактор	Захід	Нормативний документ
Електричний струм	заземлення корпусу зварювального апарата, обмежувач напруги неробочого ходу, перевірка ізоляції кабелів, діелектричні рукавиці	НПАОП 40.1-1.21-98 [26]
Зварювальний аерозоль	місцева витяжна вентиляція, респіратори, розрахунок повітрообміну	розрахунок п. 5.2
Шум	обмеження тривалості роботи, навушники, малошумний інструмент	ДСН 3.3.6.037-99 [27]
Робота на висоті	інвентарні риштування з огородженням, страхувальні пояси	НПАОП 0.00-1.15-07 [28]
Пожежна небезпека	наряд-допуск на вогневі роботи, вогнегасники, видалення горючих матеріалів у радіусі 5 м	ДБН А.3.2-2-2009 [29]

Продовження таблиці 5.1

Фактор	Захід	Нормативний документ
Випромінювання дуги	щитки зі світлофільтрами, переносні ширми	ДБН А.3.2-2-2009 [29]

5.2 Розрахунок повітрообміну під час зварювальних робіт

Розрахунок виконано для приміщення, де одночасно працює один зварник. Витрата електродів – 1,2 кг/год; питоме виділення зварювального аерозолю прийнято 15 г/кг електродів, частка сполук марганцю в аерозолі – 5 % (методичні припущення для рутилових електродів загального призначення). Маса марганцю, що виділяється:

$$G = 1{,}2 \cdot 15 \cdot 0{,}05 = 0{,}9 \text{ г/год} = 900 \text{ мг/год} \quad (5.1)$$

Необхідний повітрообмін для розбавлення до гранично допустимої концентрації $C_{доп} = 0{,}2$ мг/м³ при концентрації в припливному повітрі $C_{пр} = 0$:

$$L = G/(C_{доп} - C_{пр}) = 900/(0{,}2 - 0) = 4500 \text{ м}^3\text{/год} \quad (5.2)$$

Такий повітрообмін загальнообмінною вентиляцією у приміщенні цеху забезпечити складно, тому основним заходом прийнято місцевий відсмоктувач біля місця зварювання з ефективністю вловлювання не менше 0,8. Тоді на загальнообмінну вентиляцію припадає $0{,}2 \cdot 4500 = 900$ м³/год.

5.3 Розрахунок сумарного рівня шуму

Під час улаштування обойми одночасно можуть працювати кілька джерел шуму (рис. 5.1). Сумарний рівень звуку

$$L_\Sigma = 10 \cdot \lg \Sigma \, 10^{0{,}1 \cdot L_i} \quad (5.3)$$

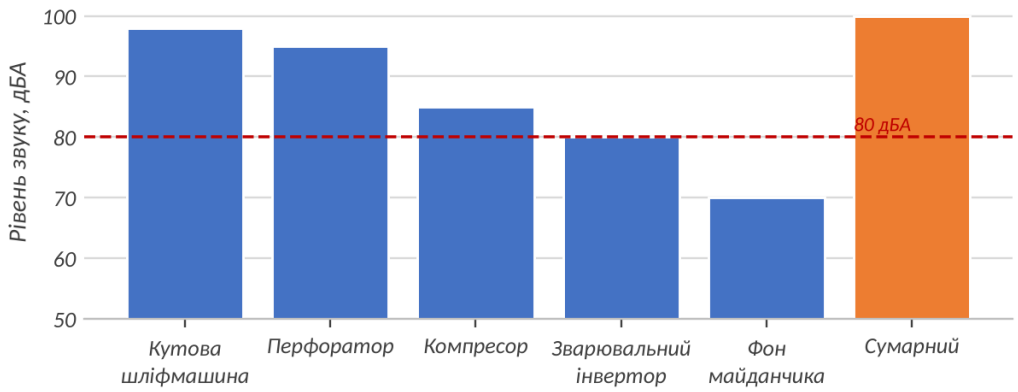


Рис. 5.1 Рівні звуку джерел шуму на робочому місці (розрахунок автора)

Для джерел 98, 95, 85, 80 і 70 дБА сумарний рівень становить 100,0 дБА, що перевищує допустимий рівень 80 дБА за ДСН 3.3.6.037-99 [27] на 20 дБА. Отже, необхідно розносити в часі роботи шліфмашини і перфоратора, обмежувати тривалість їх роботи та використовувати протишумні навушники з ефективністю не менше 25 дБА.

5.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Роботи з підсилення конструкцій часто виконуються на об'єктах, пошкоджених унаслідок воєнних дій, тому під час підготовки робіт потрібно передбачити порядок дій у разі повітряної тривоги. Працівники мають бути ознайомлені з розташуванням найближчого укриття, що відповідає вимогам ДБН В.2.2-5:2023 [30]. Під час сигналу тривоги зварювальні роботи і нагрівання припиняють, обладнання знеструмлюють, газові балони закривають, вантажопідіймальні механізми опускають вантаж. Перед відновленням робіт на пошкодженому об'єкті виконують огляд конструкцій, а аварійні колони попередньо розвантажують тимчасовими стійками.

5.5 Висновки до розділу 5

Визначено небезпечні і шкідливі фактори під час улаштування сталевих обойм та заходи щодо їх зменшення. Розрахунком встановлено, що для одного зварювального поста потрібен повітрообмін 4500 м³/год або місцевий

відсмоктувач, а сумарний рівень шуму 100,0 дБА вимагає організаційних заходів і засобів індивідуального захисту.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз літератури показав, що сталева обойма з кутиків і планок є найпоширенішим способом швидкого підсилення стиснутих залізобетонних елементів, але ефект обтиснення бетону в її розрахунку зазвичай не враховують. Опубліковані прирости міцності завдяки обтисненню становлять від 4 до 30 % і більше залежно від типу обойми і рівня тиску.

2. Порівняння моделей Richart, Mander і ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1 показало, що модель Єврокоду найбільш консервативна і може бути рекомендована для проєктування; при $f_l/f_c = 0{,}1$ її розбіжність з моделлю Mander становить 14 %.

3. Обтиснення значно сильніше змінює деформаційні характеристики бетону, ніж міцність: при $f_l/f_c = 0{,}1$ міцність зростає в 1,38–1,57 раза, деформація на піку – у 3,8 раза, гранична деформація – у 6,7 раза, а відносний січний модуль на піку знижується з 0,53 до 0,22.

4. В обоймі з кутиків і планок коефіцієнт ефективності обтиснення становить 0,19–0,42 і визначається насамперед кроком планок; ефективний тиск обтиснення 0,3–1,7 МПа дає приріст міцності бетону 7–36 %.

5. Попереднє нагрівання планок до 100 °C створює активний тиск обтиснення близько 0,55 МПа і забезпечує включення обойми в роботу від початку довантаження; граничний приріст визначається пасивним обтисненням.

6. Урахування обтиснення в деформаційній моделі перерізу збільшує розрахунковий приріст несучої здатності колони 400×400 мм при e = 20 мм з 23 до 50 %, а руйнування стає пластичним. За методом Монте-Карло 5 %-й квантиль коефіцієнта приросту становить 1,35.

7. Розроблено алгоритм і приклад розрахунку: урахування обтиснення дозволило забезпечити несучу здатність 3739 кН ≥ 3600 кН обоймою з кутиків ∟75×6 і планок 100×8 мм з кроком 300 мм без збільшення перерізу кутиків.

8. Розроблено заходи з охорони праці під час улаштування сталевих обойм, виконано розрахунки повітрообміну і сумарного рівня шуму.

GENERAL CONCLUSIONS

1. The literature review showed that a steel jacket made of angles and battens is the most common method of rapid strengthening of compressed reinforced concrete members, but the confinement of concrete is usually neglected in its design. The published strength gains due to confinement range from 4 to 30 % and more, depending on the jacket type and the confining pressure.

2. The comparison of the Richart, Mander and DSTU-N B EN 1992-1-1 models showed that the Eurocode model is the most conservative and can be recommended for design; at $f_l/f_c = 0.1$ it differs from the Mander model by 14 %.

3. Confinement changes the deformation characteristics of concrete much more than its strength: at $f_l/f_c = 0.1$ the strength increases 1.38–1.57 times, the peak strain 3.8 times, the ultimate strain 6.7 times, while the relative secant modulus at peak decreases from 0.53 to 0.22.

4. In an angle-and-batten jacket the confinement effectiveness coefficient is 0.19–0.42 and depends mainly on batten spacing; the effective confining pressure of 0.3–1.7 MPa increases concrete strength by 7–36 %.

5. Pre-heating of battens to 100 °C produces an active confining pressure of about 0.55 MPa and ensures that the jacket works from the beginning of additional loading; the ultimate gain is governed by passive confinement.

6. Taking confinement into account in the sectional deformation model increases the calculated gain in the load-bearing capacity of a 400×400 mm column at e = 20 mm from 23 to 50 %, and the failure becomes ductile. According to the Monte Carlo method, the 5 % quantile of the gain factor is 1.35.

7. A design algorithm and an example were developed: considering confinement made it possible to provide a resistance of 3739 kN ≥ 3600 kN with a jacket of L75×6 angles and 100×8 mm battens spaced at 300 mm without enlarging the angles.

8. Occupational safety measures for the installation of steel jackets were developed, and the air exchange and total noise level were calculated.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Редьква Р. Розробка та дослідження підсилення стиснутих залізобетонних елементів. *Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання* : матеріали V Міжнар. студ. наук.-техн. конф. Тернопіль : ТНТУ, 2022. С. 77–78. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/38010/2/V_MSNTK_2022_Redkva_R-Development_and_research_strengthening_77-78.pdf (дата звернення: 14.09.2026).

2. Ksonshkevych L. M. Ensuring the functioning of engineering, transport networks thanks to the strengthening of damaged reinforced concrete columns of their structures. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2024. Вип. 22. С. 80. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-08.

3. Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*. 1988. Vol. 114, No. 8. P. 1804–1826. URL: https://web.itu.edu.tr/darilmazk/file/Mander_Priestley_Park_StressStrainModelforConfinedConcrete.pdf (дата звернення: 03.10.2026).

4. Richart F. E., Brandtzaeg A., Brown R. L. A study of the failure of concrete under combined compressive stresses. Urbana : University of Illinois, 1928. 104 p. (Engineering Experiment Station Bulletin ; No. 185).

5. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. [Чинний від 2011-07-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011.

6. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний від 2011-06-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011.

7. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1992-1-1:2004, IDT). [Чинний від 2013-07-01]. Київ : Мінрегіон України, 2012.

8. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. [Чинний від 2017-04-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017.

9. Осипенко Д. С. Дослідження напружено-деформованого стану конструкцій підсилення заводу залізобетонних виробів в м. Дніпро : кваліфікаційна робота магістра. Кропивницький : ЦНТУ. URL: https://dspace.kntu.kr.ua/items/834f6b7a-710c-4a27-8e47-ca80fd5155f3 (дата звернення: 22.09.2026).

10. Борисюк О. П., Зятюк Ю. Ю. Напружено-деформований стан залізобетонних балок, підсилених під навантаженням сталефібробетоном і композитами при дії малоциклових навантажень. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2016. Вип. 33. С. 303–313. DOI: https://doi.org/10.31713/budres.v0i33.174.

11. Krayinskyy P. I., Yovchyk O. D., Vasiliev I. V. Research of reinforced concrete elements strengthened by reinforced concrete jacketing under high level loading. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. 2015. С. 346. URL: https://sciencetst.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/4167/5543.pdf (дата звернення: 17.10.2026).

12. Megalooikonomou K. G., Papavasileiou G. S. Analytical stress-strain model for FRP-confined rectangular RC columns. *Frontiers in Built Environment*. 2019. Vol. 5. Article 39. DOI: https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00039.

13. Гасенко А. В. Самонапруження сталезалізобетонних конструкцій : монографія. Полтава : ПП «Астрая», 2022. URL: https://reposit.nupp.edu.ua/files/original/8/9943/2b1a1be03083ca44350afa8f93ce95ae1ddd8825.pdf (дата звернення: 08.09.2026).

14. He L., Lin S., Jiang H. Confinement effect of concrete-filled steel tube columns with infill concrete of different strength grades. *Frontiers in Materials*. 2019. Vol. 6. Article 71. DOI: https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00071.

15. Wu Y.-F., Wei Y. General stress-strain model for steel- and FRP-confined concrete. *Journal of Composites for Construction*. 2015. Vol. 19, No. 4. URL: https://ascelibrary.com/doi/10.1061/%28ASCE%29CC.1943-5614.0000511 (дата звернення: 29.10.2026).

16. Cao Y.-G., Jiang C., Wu Y.-F. Cross-sectional unification on the stress-strain model of concrete subjected to high passive confinement by fiber-reinforced polymer. *Polymers*. 2016. Vol. 8, No. 5. Article 186. DOI: https://doi.org/10.3390/polym8050186.

17. Shariati M., Pourteymuri M., Naghipour M. et al. Evolution of confinement stress in axially loaded concrete-filled steel tube stub columns: study on enhancing urban building efficiency. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 17. Article 7544. DOI: https://doi.org/10.3390/su16177544.

18. Петренко Д. Г. Напружено-деформований стан гнучких сталебетонних колон : дис. … канд. техн. наук : 05.23.01. Харків : УкрДУЗТ, 2018. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2020/10/dis._petrenko.pdf (дата звернення: 11.10.2026).

19. Сіробаба В. О. Несуча здатність та деформативність сталезалізобетонних конструкцій з легких бетонів : дис. … канд. техн. наук : 05.23.01. Полтава : ПолтНТУ, 2018. URL: https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/main/page/specializovani-vcheni-radi/4405202/disertacii/2018-SirobabaVO.pdf (дата звернення: 26.09.2026).

20. Адаменко В. М., Дзюбко Д. А., Романишен О. В. Дослідження напружено-деформованого стану вузлів сталезалізобетонних каркасно-монолітних будівель з використанням інформаційних технологій розрахунку та інформаційного моделювання. *Механіка та математичні методи*. 2024. Т. 6, № 1. С. 107–123. DOI: https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-1-107-123.

21. Montuori R., Piluso V. Reinforced concrete columns strengthened with angles and battens subjected to eccentric load. *Engineering Structures*. 2009. Vol. 31, No. 2. P. 539–550.

22. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. [Чинні від 2015-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2014.

23. ДСТУ-Н Б EN 1994-1-1:2010. Єврокод 4. Проектування сталезалізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1994-1-1:2004, IDT). [Чинний від 2013-07-01]. Київ : Мінрегіон України, 2013.

24. ДСТУ-Б В.2.6-215:2016. Розрахунок і конструювання сталезалізобетонних конструкцій з плитами по профільованому настилу. URL: https://www.uscc.ua/files/14/dstu_b_v_2_6-215_2016.pdf (дата звернення: 19.10.2026).

25. Діаграма «стискальна сила – деформація бетону» : онлайн-розрахунок. MQN. URL: http://www.mqn.com.ua/ferroconcrete-compressive-force-deformation.php (дата звернення: 05.10.2026).

26. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. [Чинні від 1998-01-01]. Київ, 1998.

27. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. [Чинні від 1999-12-01]. Київ, 1999.

28. НПАОП 0.00-1.15-07. Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті. [Чинні від 2007-04-01]. Київ, 2007.

29. ДБН А.3.2-2-2009. Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. [Чинні від 2012-04-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2012.

30. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. [Чинні від 2023-09-01]. Київ : Мінрегіон України, 2023.