

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ПЕТРОВ ОЛЕКСІЙ МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 624.072.2:624.012

**МІЦНІСТЬ, ДЕФОРМАТИВНІСТЬ ТА ТРІЩИНІСТІЙКІСТЬ
ПРОГІННИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ЇХ ЗГІНІ З
КРУЧЕННЯМ**

05.23.01 - будівельні конструкції, будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеській державній академії будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Карпюк Василь Михайлович,
Одеська державна академія будівництва та архітектури, професор кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій, м.Одеса.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бліхарський Зіновій Ярославович,
Національний університет „Львівська політехніка“, директор інституту будівництва та інженерії доквілля, професор кафедри будівельних конструкцій та мостів, м.Львів.

кандидат технічних наук, професор
Коваль Петро Миколайович,
Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури, завідувач кафедри «Архітектурні конструкції», м.Київ.

Захист відбудеться **"12" березня 2018 року** о **"11³⁰"** годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.060.01 при Одеському національному морському університеті за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Мечникова, 34, ОНМУ, у конференц-залі (3-й поверх нового корпусу ОНМУ).

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці університету за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Мечникова, 34, ОНМУ.

Автореферат розісланий **" 8 " лютого 2018 року**

Вчений секретар спеціалізованої
Вченої ради Д41.060.01, к.т.н., доцент



О.В. Акімова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Проблема згину з крученням є маловивченою і тому постійно включається в плани найважливіших науково-дослідних робіт по бетону та залізобетону. Проведені дослідження являються, безумовно, актуальними і необхідними. Незважаючи на наявний досвід проектування, питання розрахунку залізобетонних конструкцій, підданих згину з крученням, в нормах проектування поки-що висвітлені недостатньо. У них відсутні цілі розділи для розрахунку даних елементів по розкриттю і закриттю тріщин; визначення прогинів залізобетонних конструкцій з урахуванням крутильної жорсткості; визначення напружень в арматурі, яка сприймає нормальні N_{ys} , $N_{\theta s}$ та дотичні T_{ys} , $T_{\theta s}$ зусилля; визначення січних модулів пружності спіральних смуг бетону E'_c вздовж і E'_c поперек тріщин; у нормах також відсутні значення нормативних $f_{ck,tor}$ і розрахункових $f_{cd,tor}$ опорів крученню для різних класів бетонів.

Розрахунок міцності елементів при згині з крученням за трьома схемами розташування стиснутої зони в просторовому перерізі викликає багато заперечень у фахівців. В дійсності вона приймає форму трапеції, а виникнення трьох схем можливе лише на середніх опорах статично невизначених балок.

При згині з крученням характерним є виникнення просторових похилих тріщин за гвинтовими лініями. Після утворення тріщин у напрямку головних розтягуючих напружень, зусилля сприймає, в основному, арматура, а в напрямку стискаючих напружень – бетон. Тому на практиці використовують методи розрахунку конструкцій за граничними станами, за спіральною просторовою тріщиною, графоаналітичний та експериментально-статистичний методи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є складовою частиною держбюджетної теми «Розробка розрахункових моделей прогинних залізобетонних конструкцій при складному напружено-деформованому стані приопорних ділянок» (номер державної реєстрації 0108U000559), а також теми: «Розв'язок прикладних інженерних задач за допомогою методів теорії споруд (номер державної реєстрації 0107U000809).

Дана робота відповідає актуальним напрямкам науково-технічної політики держави згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 5.05.1997р., №409 «Про забезпечення надійності й безпечної експлуатації будівель, споруд та інженерних мереж».

Мета роботи полягає в дослідженні міцності, деформативності та тріщиностійкості приопорних ділянок залізобетонних балок при їх згині з крученням з урахуванням конструктивних чинників та дії крутного моменту.

Задачі досліджень:

- розробити методику досліджень з використанням теорії планування та устаткування для виконання системних експериментальних досліджень, а також вивчити тріщиностійкість, механізм деформування та руйнування приопорних ділянок залізобетонних балок при їх згині з крученням;

- виявити особливості напружено-деформованого стану залізобетонних елементів з урахуванням дії крутного моменту та зробити узагальнену оцінку впливу дослідних факторів на несучу здатність їхніх приопорних ділянок;

- експериментально перевірити можливість використання найбільш розповсюджених методів для прогнозу несучої здатності залізобетонних елементів при їх згині з крученням;

- вдосконалити інженерну методика розрахунку міцності просторових похилих перерізів прогінних залізобетонних конструкцій при їх згині з крученням;

- обрати і розвинути експериментально забезпечену фізично нелінійну модель деформування залізобетону дослідних елементів з урахуванням дії поперечної сили, згинальних і крутних моментів;

- розробити розрахункову скінчено-елементну нелінійну деформаційну модель напружено-деформованого стану дослідних елементів та здійснити її тестування шляхом порівняння експериментальних даних з розрахунковими;

- впровадити результати досліджень у практику проектування, реконструкції та підсилення прогінних залізобетонних конструкцій.

Об'єкт дослідження: однопрогінні залізобетонні елементи прямокутного поперечного перерізу, у розрахункових перерізах яких окрім поперечних сил і згинальних моментів виникають ще й крутні моменти.

Предмет досліджень: напружено-деформований стан, міцність, тріщиностійкість та деформативність прогінних залізобетонних елементів з урахуванням дії крутного моменту.

Методи досліджень: вивчення та аналіз літературних джерел, формулювання задач досліджень, експериментально-теоретичні методи з використанням теорії планування експерименту, методів механіки залізобетону, деформаційної теорії, критеріїв міцності бетону та арматури, порівняння експериментальних даних з результатами розрахунків та їх аналіз, формулювання основних висновків; абстрагування, аналіз, синтез, індукція, дедукція.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблена нова методика дозволила дослідити напружено-деформований стан та отримати нові дані про стиснене та вільне кручення приопорних ділянок залізобетонних балок аж до їх руйнування, в результаті чого вперше комплексно визначений системний вплив на тріщиностійкість, деформативність та міцність дослідних зразків – балок таких конструктивних чинників, як величина прольоту зрізу, кількість поперечного, нижнього робочого і верхнього монтажного армування та величини крутного моменту як зокрема, так і при їхній взаємодії, що дало змогу побудувати відповідні адекватні математичні моделі з достатньою інформаційною корисністю;

- розкриті особливості деформування, тріщиноутворення та руйнування дослідних зразків, підданих згину з крученням. Виявлений механізм та нові схеми руйнування їхніх приопорних ділянок і вперше встановлена їх залежність від відповідного співвідношення дослідних факторів;

- розроблена нова інженерна методика розрахунку міцності приопорних ділянок прогінних залізобетонних елементів при їх згині з крученням з урахуванням реального впливу на неї дослідних факторів;

- отримала подальший розвиток нелінійна деформаційна модель стержневої залізобетонної конструкції, яка з єдиних позицій механіки залізобетонну дозволяє урахувати особливості сумісної роботи бетону й арматури на всіх стадіях, включаючи руйнування, за одночасної дії поперечної сили, згинального і крутного моментів;

- запропонований варіант моделювання складного напружено-деформованого стану балок при їх згині з крученням шляхом нелінійного скінчено-елементного розрахунку з використанням реальних діаграм стану матеріалів, сучасних феноменологічних критеріїв міцності дає можливість чисельно відтворити результати експерименту за допомогою сучасних обчислювальних комплексів, зокрема, «Лира-САПР» та зробити достовірний прогноз, насамперед, їх міцності;

- шляхом порівняльного аналізу дана оцінка достовірності прогнозу міцності просторових перерізів прольотних залізобетонних конструкцій за найбільш розповсюдженими нормативними і авторськими методиками.

Практичне значення отриманих результатів роботи:

- запропонована інженерна методика розрахунку міцності приопорних ділянок залізобетонних конструкцій при їх згині з крученням дає можливість більш точно урахувати вплив конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії порівняно з іншими методиками, що, в цілому, забезпечує достовірний прогноз їх несучої здатності;

- удосконалена деформаційна модель напружено-деформованого стану стержневої залізобетонної конструкції є розвитком та доповненням загального деформаційного методу розрахунку, закладеного в основу ДБН і ДСТУ України, і дозволяє з єдиних позицій виконувати її розрахунок за I і II групами граничних станів;

- запропонований варіант моделювання складного напружено-деформованого стану дослідних балок шляхом нелінійного скінчено-елементного розрахунку розкриває додаткові можливості ПК «Лира-САПР» в частині розв'язку зворотної задачі;

- результати експериментально-теоретичних досліджень дисертаційної роботи впроваджені в практику проектування об'єктів, зокрема при підсиленні фундаментів і надземних прогінних конструкцій м'ясо-молочного корпусу, комплексної забудови території Нового Ринку (концерн «Веселка», м. Одеса), а також в навчальний процес Одеської державної академії будівництва та архітектури при підготовці спеціалістів та магістрів будівельного профілю.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем особисто виконано:

- розроблена методика і виготовлена універсальна силова установка для проведення лабораторних досліджень за темою дисертації;

- проведені системні натурні та числові експериментальні дослідження роботи просторових, похилих і нормальних перерізів залізобетонних балок при стисненому і вільному крученні їхніх приопорних ділянок, результати яких представлені у вигляді відповідних математичних моделей;

- вдосконалено інженерну методику розрахунку міцності приопорних ділянок балкових конструкцій при їх згині з крученням, яка підвищує надійність проектування та безпеку експлуатації таких конструкцій;

- змодельовано напружено-деформований стан залізобетонних балок при їх стисненому та вільному крученні з урахуванням реальних діаграм стану матеріалів, сучасного феноменологічного критерію міцності шляхом скінчено-елементного розрахунку у ПК «Лира-САПР»;

- розвинена нелінійна деформаційна скінчено-елементна модель стержневої залізобетонної конструкції, яка з єдиних позицій механіки залізобетонну дозволяє достовірно прогнозувати несучу здатність їхніх розрахункових перерізів за сумісної дії поперечної сили, згинального і крутного моментів.

- перевірена можливість та умови застосування найбільш розповсюджених національних і авторських методів розрахунку несучої здатності приопорних ділянок дослідних елементів.

Апробація результатів дисертаційної роботи.

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наукових конференціях та засіданнях кафедри опору матеріалів ОДАБА (2006÷2016рр): п'ятій науково-технічній конференції «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (м. Рівне, 2006р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Інноваційні технології у будівництві» (м.Вінниця, 2010р.); шостій Всеукраїнській науково-технічній конференції «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону (м.Одеса, 2011р.); Міжнародній інтернет-конференції (м.Харків, 2012р.); XXVII Міжнародній Науково-практичній конференції „Перспективи розвитку Європейського університету в контексті широкої інноваційної стратегії” (м.Будапешт, Угорщина, 2013р.); Восьмій міжнародній конференції (Proceedings of the 8th International Conference MMT, м.Аріель, Ізраїль, 2014р.); Десятій ювілейній Всеукраїнській науково-технічній конференції «Будівництво в сейсмічних районах України» (м.Одеса, Україна, 2015р.), 71-й науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу академії (м.Одеса, Україна, 2015р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону» (м.Полтава, 2017р.).

Публікації. Основний зміст дисертації висвітлений у 16 публікаціях, з них 1 – монографія, 12 – в рекомендованих ВАК та Міністерством освіти і науки України, 3 – в зарубіжних фахових виданнях, а також у журналах та збірках, що входять до наукометричних баз даних РИНЦ, UlrichsWeb Global Serials Directory, DOAJ, EBSCO, GoogleScholar.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків та додатків. Її зміст викладено на 332 сторінках, з яких 174 сторінок основного тексту, 18 сторінок списку використаних літературних джерел із 145 назв, 101 сторінка додатків. Основна частина дисертації містить 45 рисунків та 7 таблиць.

Автор виражає глибоку повагу та щире подяку Заслуженому діячу науки і техніки України, д.т.н., професору Дорофєєву Віталію Степановичу за цінні поради, консультації та сприяння, наданні ним при підготовці даної роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подана загальна характеристика дисертації, обґрунтована актуальність теми, викладені мета та задачі досліджень, наукова новизна й практична цінність роботи, вказаний особистий внесок автора в отриманні результатів, наведені дані щодо апробації результатів досліджень і публікацій за вказаною темою.

Перший розділ дисертації присвячений огляду літературних джерел про вивчення деформацій кручення зі згином залізобетонних конструкцій, серед яких є роботи: Т.Н. Азізова, Є.М. Бабича, В.М. Байкова, А.М. Бамбури, А.Я. Барашикова, А.В. Белубекяна, Г.І. Бердичевського, З.Я. Бліхарського, П.М. Бурлаченка, П.Ф. Вахненка, О.О. Гвоздєва, О.С. Городецького, А.В. Гришина, В.О. Гришина, В.С. Дорофєєва, Е.Г. Єлагіна, Д.А. Єрмоленка, О.С. Залесова, Х.С. Карієва, М.І. Карпенка, В.М. Карпюка, В.Г. Кваші, Є.В. Клименка, С.Ф. Клованича, О.М. Клюки, В.І. Корсуна, П.М. Ковалю, А.А. Кудрявцева, О.І. Кузьменко,

В.С. Кукунаєва, М.М. Лессига, Й.Й. Лучка, І.М. Ляліна, Т.Х. Малюка, Г.Х. Масюка, Г.В. Мурашкіна, Ю.І. Немчинова, В.В. Пінаджана, І.Є. Прокоповича, Л.К. Рулле, М.В. Савицького, О.В. Семка, Р.А. Складневої, А.М. Скудри, М.С. Горяника, Л.В. Фалєєва, С.Л. Фоміна, О.І. Харитонова, Ю.В. Чиненкова, Т.П. Чистової, Е.Д. Чихладзе, О.Л. Шагіна, Ю.В. Школи, В.С. Шмуклера, В.К. Юдіна, О.Ф. Яременка, М.М. Ячменевої, та інших.

У 1940 році М.С. Боришанським, одним із перших, були проведені випробування на кручення призми квадратного перетину, армованої плоскими каркасами. Руйнування зразків відбувалося за гвинтоподібними тріщинами. Була закладена ідея методу розрахунку залізобетонних елементів зі спіральною просторовою тріщиною окремо по бетону, окремо по арматурі.

Із зарубіжних дослідників, слідуючи хронології, відзначимо роботи: Баха, Графа, Мерша, Зіа, Коуена. У свій час Мерш запропонував (класичний метод Мерша-Ріттера) відому схему розподілу дотичних напружень при крученні бетонних елементів, яка лежала в основі розрахункових формул вітчизняних норм до 1963 року.

Важливий вклад у вивчення цього питання зробили Ю.В. Чиненков, І.М. Лялінта інші дослідники. Зокрема, О.О Гвоздевим і М.М. Лессиг був розроблений метод (метод рівноваги зусиль в просторовому перерізі) розрахунку залізобетонних балок спочатку для прямокутних, а потім і для кільцевих перерізів, підданих згину з крученням і чистому крученню. Потім ця розрахункова методика була поширена на розрахунок міцності двотаврових, таврових, попередньо напружених балок з важких і легких бетонів, а також нерозрізних балок.

В підсумку були визначені і зафіксовані в нормах три можливі схеми руйнування балок з розташуванням стиснутої зони бетону, відповідно, паралельно до верхньої, бічної і нижньої граней. Проте, експериментальна перевірка показувала значну розбіжність розрахункової несучої здатності з дослідними даними.

З огляду на вищенаведене у дисертаційній роботі сформульовані мета досліджень та поставлені задачі для її досягнення.

У **другому розділі** описана методика та об'єм експериментальних досліджень напружено-деформованого стану залізобетонних балок при їх згині з крученням. Приведені характеристики дослідних зразків, технологія їхнього виготовлення, методика випробування та вимірювальна система.

На підставі аналізу апріорної інформації з літературних джерел з урахуванням реальної можливості здійснення експерименту у якості дослідних обрані фактори, представлені в табл. 1.

Характеристика і рівні зміни дослідних факторів

Таблиця 1

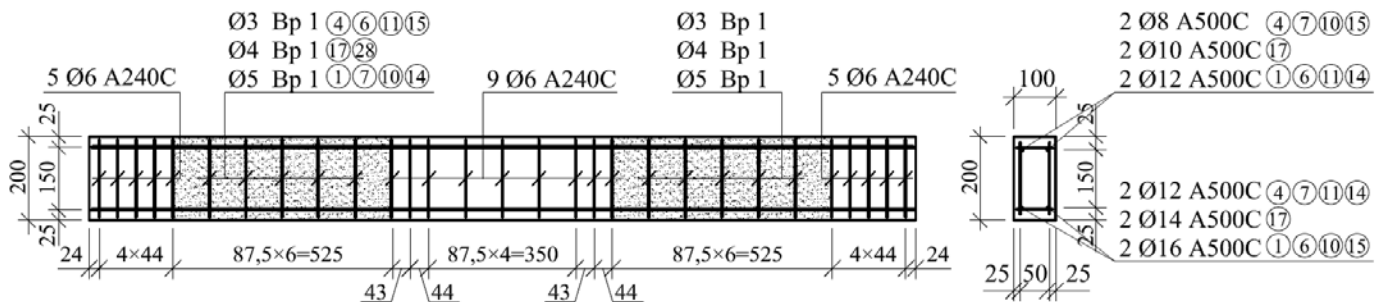
Дослідні фактори		Рівні зміни			Інтервал зміни
Код	Натуральні значення	«-1»	«0»	«+1»	
X ₁	Відносний прогін зрізу, a/h_0	1	2	3	1
X ₂	Крутний момент, T, кН·м	1,5	2,25	3,00	0,75кН·м
X ₃	Коефіцієнт поперечного армування, $\rho_w (B_p I)$	0,0016	0,0029	0,0045	$\approx 0,00145$
X ₄	Коефіцієнт поздовжнього робочого армування, $\rho_f (A500C)$	0,0129	0,0176	0,0230	$\approx 0,00505$
X ₅	Коефіцієнт поздовжнього армування стиснутої зони, $\rho'_f (A500C)$	0,0058	0,0090	0,0129	$\approx 0,00355$

Практика показала, що кожний з обраних факторів може впливати на функцію виходу нелінійно. Тому її доцільно апроксимувати поліномом другого ступеня. У зв'язку із цим був прийнятий п'ятифакторний трирівневий план, близький за властивостями до Д-оптимального, типу На 5. На кожний дослід було виготовлено по 2 зразки – балки. Разом з додатковими дослідними всього було випробувано 57 балок.

Дослідні зразки у зазначених серіях представляють собою (рис.1) вільно обперті однопрогінні балки прямокутного перерізу з номінальними розмірами 1975x200x100мм і розрахунковою довжиною прольоту $L=9h_0=1575$ мм, де h_0 - робоча висота перетину, що дорівнює 175мм. Балки армовані двома плоскими зварними каркасами (рис.1) з подовжньою нижньою 2Ø12,14,16 A500C і верхньою 2Ø8,10,12 A500C арматурою і об'єднані між собою з (2+2)Ø3,4,5 ВрІ.

Для виготовлення дослідних зразків використовували звичайний важкий бетон класу С20/25 на гранітному щебені фракцій 5÷10мм, кварцовому піску з модулем крупності 1,5, а в якості в'язучого - звичайний портландцемент марки 400 без добавок. Для зменшення водоцементного відношення, поліпшення легкоукладності бетонної суміші і скорочення термінів набору міцності бетону у всіх дослідних зразках використовували комплексну добавку Релаксол-Супер М в кількості 1% від ваги цементу в перерахунку на суху речовину.

Перед укладанням бетонної суміші на нижню й верхню поздовжню арматуру каркасів балки за технологією заводу-виготовлювача ООО «Веда» (м. Київ) були наклеєні «ланцюжки» тензорезисторів з базою 5мм для визначення поздовжніх і поперечних сил, а також згинальних моментів, які сприймаються безпосередньо арматурними стержнями. Деформації бетону дослідних зразків вимірювали за допомогою тензорезисторів з базою 50мм, а також індикаторів годинникового типу із ціною поділки $1 \cdot 10^{-3}$ мм (рис.2).



Умовні позначення: (i) - № дослід

Рис. 1 Конструкція і армування дослідних зразків-балок з великими прольотами зрізу

Вертикальні переміщення балки й кути нахилу перерізів вимірювали також за допомогою індикаторів годинникового типу, встановлених відповідно до рис.2.

Для випробування дослідних зразків-балок була запроектована та виготовлена спеціальна універсальна силова установка (рис.3). До нижньої частини силової установки кріпляться чотири виносні анкерні консолі (1) (по дві з кожного боку), які разом з чотирма сержками (2), змонтованими на тілі балки, і тяжами (3) дають можливість прикладати до її приопорних частин крутний момент (4), величина якого контролюється і підтримується на цьому рівні за допомогою повірених 3-и і 5-ти тонних динамометрів.

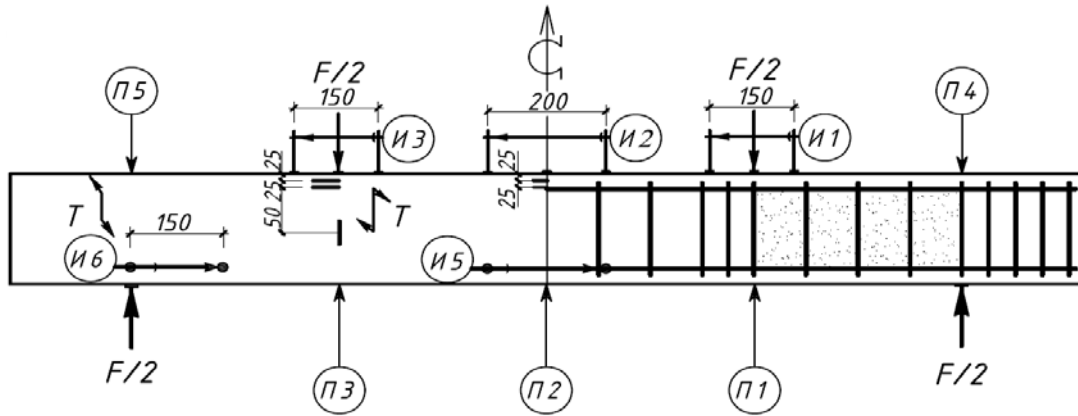


Рис. 2 Схема прикладення навантаження, розташування приладів та наклейки тензорезисторів у дослідних балках

Конструкція силової установки з пристосуваннями здатна створити дві вертикальні зосереджені сили по 250кН кожна, горизонтальної (за необхідності) зосередженої сили величиною до 280кН, двох крутних моментів по 15кНм з урахуванням пружної роботи всіх її елементів.

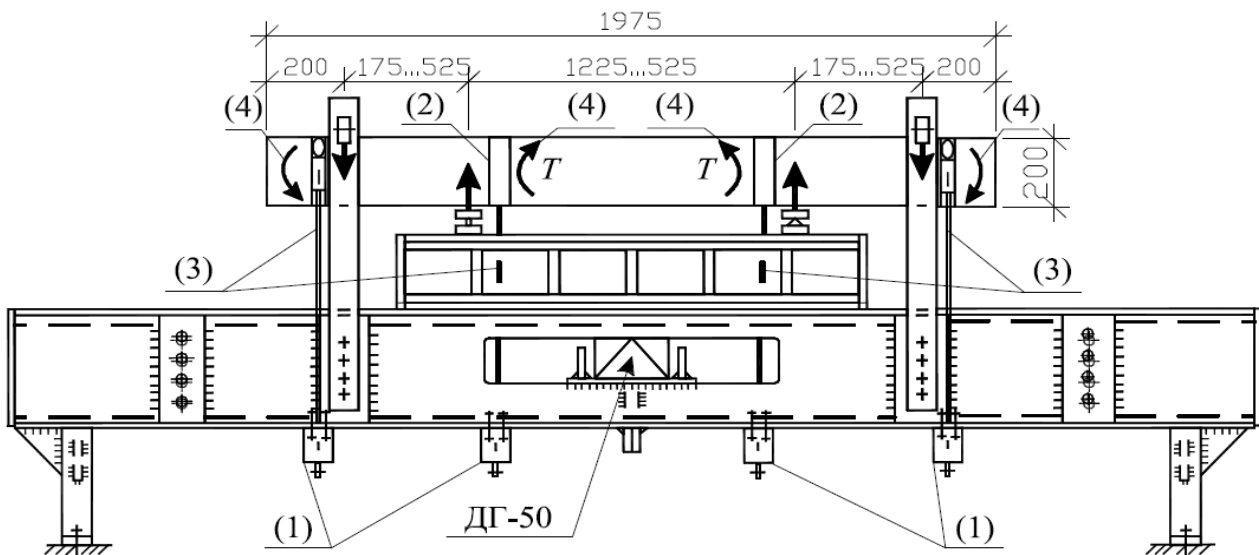


Рис. 3 Силовая установка для випробування дослідних зразків-балок

Фізико-механічні характеристики матеріалів

Таблиця 2

№ п/п	Характеристика	Бетон у віці 28 діб		Арматура	
		C20/25	A500C	Bp1	
1	Гранична міцність на стиск, МПа	25,5	500	395	
2	Гранична міцність на розтяг, МПа	2,34	500	395	
3	Початковий модуль пружності, E_{ck} , МПа	30600	190000	200000	
4	Стисливість, $\varepsilon_{cl} \cdot 10^{-5}$, $\varepsilon_{s0} \cdot 10^{-5}$	181	263	198	
5	Гранична стисливість, $\varepsilon_{cu} \cdot 10^{-5}$, $\varepsilon_{su} \cdot 10^{-5}$	395	2500	2500	
6	Гранична розтяжність, $\varepsilon_{ctu} \cdot 10^{-5}$, $\varepsilon_{stu} \cdot 10^{-5}$	18,1	2500	2500	
7	Коефіцієнти Пуассона, ν_c , ν_s	0,2	0,25	0,25	

Моделювання НДС нормальних перерізів балок здійснювали за адаптованою шаруватою деформаційною моделлю, а дослідних елементів, в цілому, - шляхом

нелінійного скінчено-елементного розрахунку в апробованому програмному комплексі «Лира-САПР» з введенням в нього реальних діаграм станів бетону і арматури та використанням феноменологічного критерію міцності складно напруженого бетону Г.О. Генієва, В.М. Киссюка, Г.О. Тюпіна, об'ємних восьмивузлових ізопараметричних скінчених елементів №236 з розмірами 10x10x10мм, кусочно-лінійної залежності №14 бібліотеки ПК з відповідним алгоритмом.

У **третьому розділі** наведені результати виконаних експериментальних досліджень, які показали, що використання описаної методики, дає можливість оцінити залежність деформативності, тріщиностійкості та міцності дослідних зразків-балок не тільки від кожного конструктивного чинника і фактора зовнішнього впливу окремо, а й у їхній взаємодії за допомогою відповідних математичних моделей.

Згідно з законом розподілу дотичних напружень при прикладенні на першому етапі тільки крутного моменту спочатку на одній із бічних, а потім на верхній та нижній гранях дослідних елементів з'являються спіралеподібні тріщини, що розвиваються і поглиблюються з ростом крутного моменту (рис.4).

Після фіксації крутного моменту на заданому планом експерименту рівні та прикладення перших ступеней поперечного навантаження у середній частині дослідних зразків-балок появляються перші нормальні тріщини, які з його збільшенням розвиваються і появляються нові похилі тріщини у напрямку від опор до місць прикладення зосереджених сил.

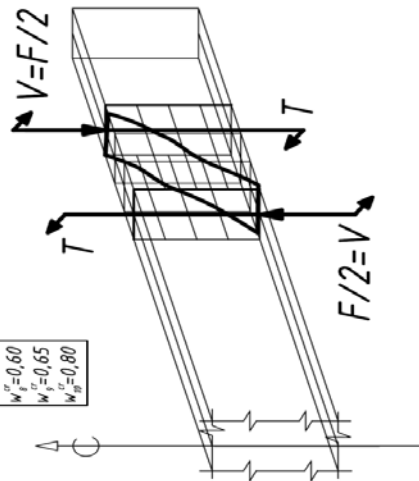
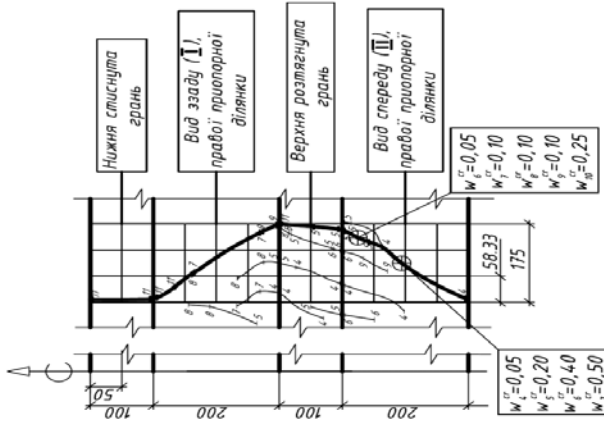
Експериментально встановлено, що крутний момент величиною до $0,6T_u$ не тільки радикально(майже в два рази) зменшує несучу здатність дослідних зразків-балок при стисненому крученні їхніх приопорних ділянок, а й підвищує прогини дослідних елементів до 70%, призводить до обертання опорного перерізу до $6,6^\circ$ ($8,4^\circ$ при вільному крученні всієї балки).

Середня ширина розкриття нормальних тріщин на рівні центру ваги робочої арматури у непереармованих дослідних елементах перед руйнуванням їхніх приопорних ділянок не перевищувала допустимих значень і знаходилась в межах $0,2...0,25$ мм. Максимальна ширина розкриття похилих тріщин посередині висоти перерізу дослідних балок при «експлуатаційному» ($\sim 0,65F_u$) рівні поперечного навантаження не перевищувала 0,6мм, а просторових спіралеподібних перед руйнуванням 1...2мм, що свідчить про необхідність збільшувати, насамперед, кількість поперечної арматури ($\rho_{sw} > 0,0044$).

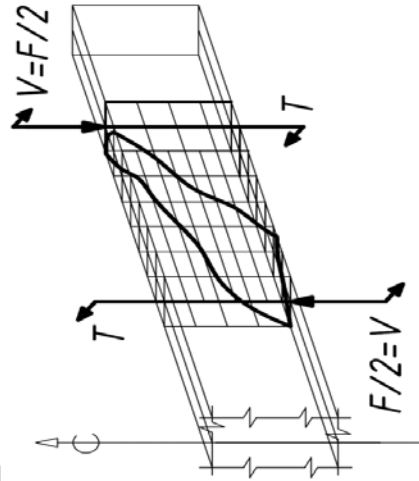
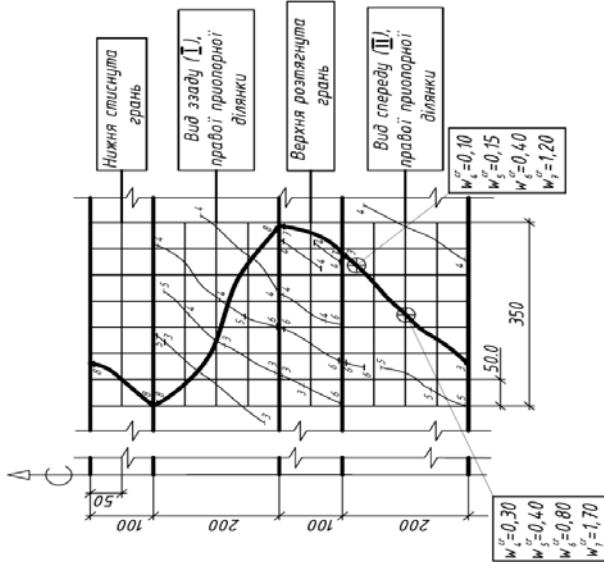
Руйнування складнонапружених дослідних елементів при їх згині з крученням бере початок від опори і виклинюється на поверхню балки в самому кінці прольоту зрізу (рис.4). При цьому, якщо довжина проекції руйнуючої просторової тріщини на тій вертикальній грані, де дотичні напруження від крутного моменту і поперечної сили збігаються за напрямком, близько до традиційної, то на протилежній грані довжина утвореної перед руйнуванням балки перехресної тріщини дорівнює прольоту зрізу.

Наявність крутного моменту призводить також до нахилу нейтральної лінії у напрямку кута обертання балки. При цьому, вертикальна проекція стиснутої зони бетону в кінці прольоту зрізу має вид прямокутної трапеції, яка при високих рівнях крутного моменту ($\approx 0,6T_u$) і мінімальній кількості верхньої монтажної арматури ($\rho'_e = 0,006$) перетворюється у прямокутний трикутник, верхня сторона якого при вільному крученні дорівнює ширині балки. При стисненому крученні тільки приопорних ділянок дослідних елементів стиснута зона бетону перед руйнуванням приймала вид прямокутного трикутника, в якому нейтральна лінія перетинала верхню

а) Дослідна з/б балка №12 Б.
Права припорна ділянка.



б) Дослідна з/б балка №25 Б.
Права припорна ділянка.



в) Дослідна з/б балка №11 Б.
Ліва припорна ділянка.

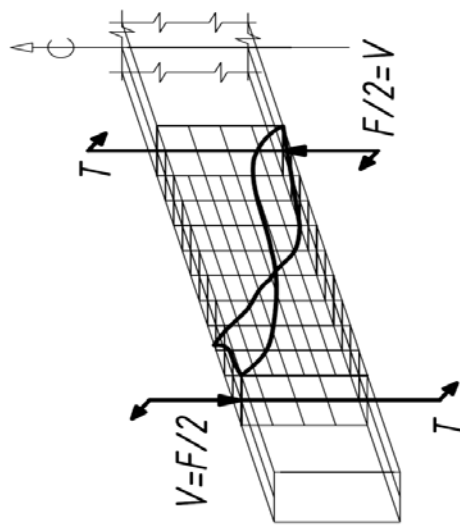
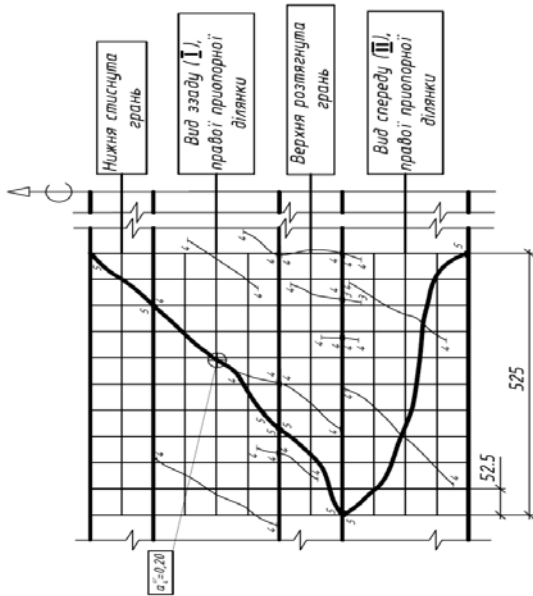


Рис. 4 Характерні схеми тріщиноутворення та руйнування дослідних балок з малим (а), середнім (б) і великим (в) прольотами зрізу при стисненому крученні їх припорних ділянок

(горизонтальну) грань балки, а в прямому куті утворювалася зона концентрації головних стискаючих напружень.

Нагельний ефект в арматурних стержнях балок, підданих згину з крученням, був ще меншим, ніж у звичайних неперearмованих балках і ним можна знехтувати.

Залежність несучої здатності дослідних елементів від конструктивних чинників та величини крутного моменту представлена на (рис.5).

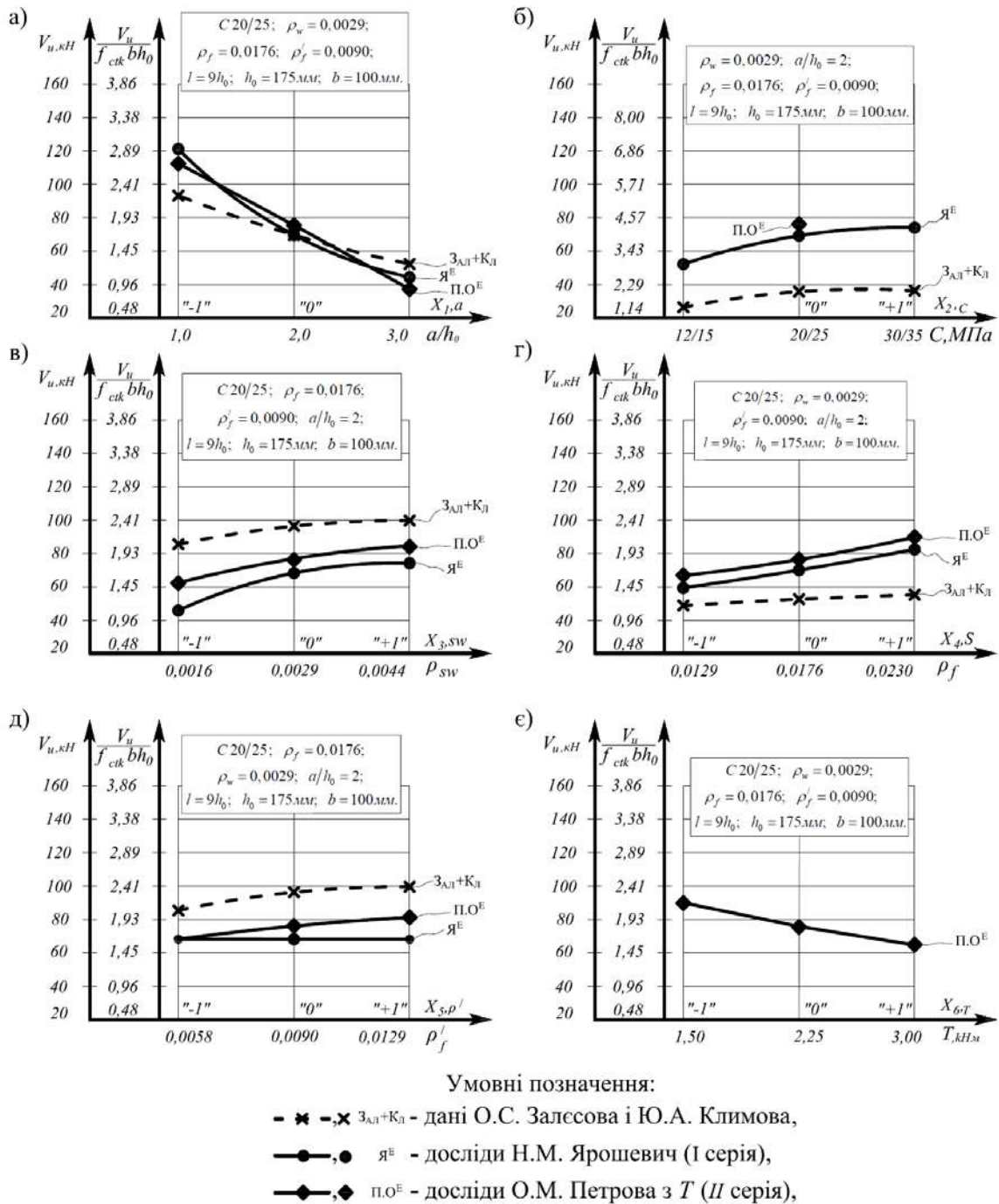


Рис. 5 Вплив конструктивних чинників (прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної (в), нижньої робочої (г), верхньої монтажної (д) арматури, а також величини крутного моменту (е) на міцність приопорних ділянок дослідних елементів

У четвертому розділі розглядається фізично нелінійна модель деформування залізобетонної балки прямокутного перерізу постійної за довжиною жорсткості, у розрахункових перерізах якої виникають наступні внутрішні зусилля: згинальний момент M_x у площині zoy (рис.6), тобто момент згину відносно осі x ; поперечна сила V_y , крутний момент T_{xy} у площині $хоу$, що відповідає складній деформації згину з крученням.

Стержень виготовлений з важкого бетону, тверднення якого відбувалося у нормальних природних умовах. Його армування довільне у вигляді системи ортогонально направлених стержнів робочої і монтажної арматури вздовж осі z , поперечної вздовж осей y і x арматури.

Задача на даному етапі досліджень – теоретичне визначення несучої здатності залізобетонного стержня з урахуванням його згину з вільним чи стисненим крученням, впливу конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії, нелінійних властивостей бетону й арматури.

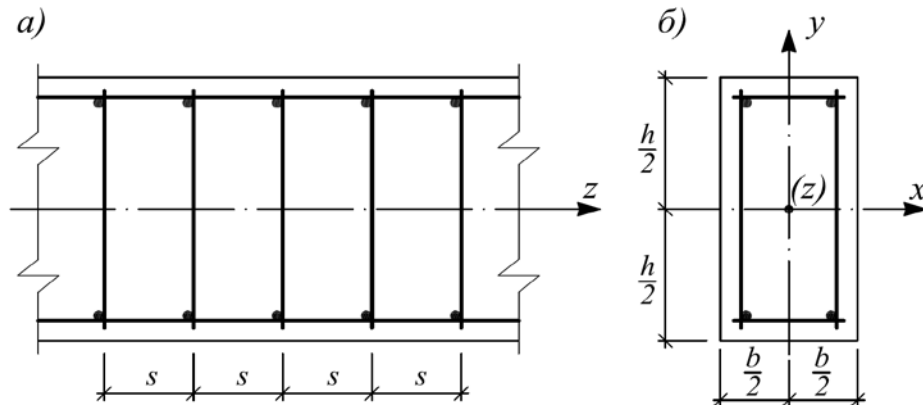


Рис. 6 Фрагмент поздовжнього розрізу (а) та поперечного перерізу (б) залізобетонного стержня з прив'язкою осей до його бокових граней

Несуча здатність балок визначається традиційним способом за допомогою деформаційного методу з урахуванням рекомендацій М.І. Карпенка, О.Ф. Яременка, Ю.О. Школи, а також критерію міцності бетону В.М. Круглова. Поперечний переріз стержня умовно розбиваємо на малі елементи прямокутної форми (рис.7), розмір яких узгоджується з крупністю найбільшої фракції бетону. Кожному з цих елементів присвоюється відповідний номер. Для кожної n -ної частки бетону в розрахунковому перерізі фіксуються координати її центру ваги відносно центру осей симетрії перерізу x_{cn} , y_{cn} , площа A_{cn} , характеристична міцність бетону на стиск f_{ck} , розтяг f_{ctk} , початковий модуль пружності E_{cm} . Коефіцієнт Пуассона ($\nu_c=0,2$) приймається сталим.

Така фіксація міцнісних і деформаційних характеристик бетону для кожного елемента дозволяє розраховувати залізобетонні стержні складеного залізобетонного перерізу, бетонування або підсилення яких здійснювали за декілька етапів: бетонами різної міцності й деформативності, а також залізобетонні елементи, пошкоджені корозією, температурними та іншими впливами.

Розташування стержнів поздовжньої арматури приймається дискретним. Кожному поздовжньому арматурному стержню присвоюється свій номер j , вказується його діаметр d_{sj} , положення центру ваги відносно центру осей симетрії перерізу елемента x_{sj} , y_{sj} , характеристичне значення міцності на границі текучості f_{ykj} (або $f_{0,2kj}$), характеристичне значення відносних деформацій арматурної або попередньо напруженої сталі при максимальному навантаженні ε_{uk} , початковий модуль пружності E_{skj} та клас арматури. Коефіцієнт Пуассона ν_s приймається сталим для всіх стержнів поздовжньої арматури і таким, що дорівнює 0,25.

Розташування стержнів поперечної арматури в площині розрахункового перерізу приймається також дискретним.

Горизонтальні і вертикальні стержні поперечної арматури (хомути) умовно розбиваються на окремі ділянки, кожній з яких присвоюється номер i , фіксується її діаметр d_{swi} , площа поперечного перерізу A_{swi} , площа поверхні дотику з бетоном A_{cswi} та координати її центру ваги у площині розрахункового поперечного перерізу x_{swi} , y_{swi} відносно осей симетрії. Для всіх поперечних стержнів, що розташовані в площині перерізу, задаються міцнісні та деформаційні характеристики: характеристичне

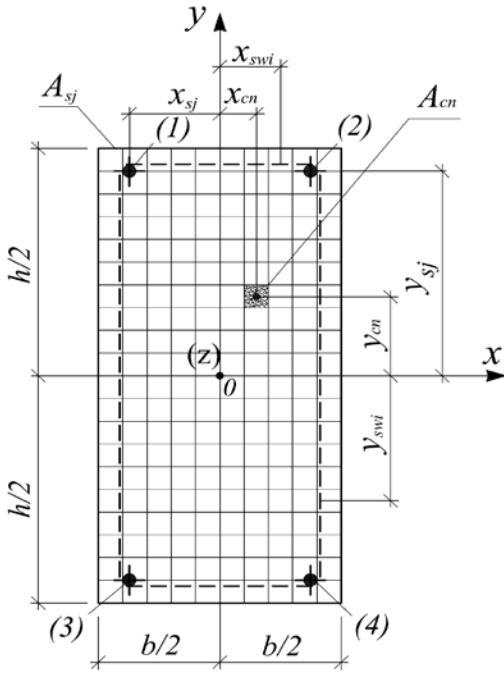


Рис.7 Складові частки розрахункового поперечного перерізу

значення міцності на границі текучості f_{ywk} , характеристичне значення міцності на розтяг f_{twk} , модуль пружності E_{sw} , коефіцієнт Пуассона $\nu_{sw}=0,25$, характеристичне значення відносних деформацій ε_{uwk} , границя або рівень пружності та клас поперечної арматури.

По довжині залізобетонного елемента (вздовж осі z) поперечна арматура для вказаного на рис.7 перерізу ураховується у вигляді розподіленого на його грані шару погонної площі

$$A_{zswi} = \pi d_{swi}^2 / (4s_i), \quad (1)$$

де s_i – крок поперечних стержнів у поздовжньому напрямку.

Рівняння рівноваги. На основі гіпотез рівняння рівноваги у розрахунковому перерізі прогінного залізобетонного елемента можна представити у вигляді:

$$M_x = \sum_{n=1}^k A_{cn} \sigma_{zcn} Y_{cn} + \sum_{j=1}^m A_{sj} \sigma_{zsj} Y_{sj}, \quad (2)$$

$$V_y = \sum_{n=1}^k A_{cn} \tau_{zycn} + \sum_{j=1}^m A_{sj} \tau_{zysj} + \sum_{i=1}^{l_{yswi,1-4,2-3}} A_{yswi} \sigma_{yswi}, \quad (3)$$

$$T_{xy} = \sum_{n=1}^k A_{cn} (\tau_{zycn} X_{cn}^{tor} - \tau_{zxcn} Y_{cn}^{tor}) + \sum_{j=1}^m A_{sj} (\tau_{zysj} X_{sj}^{tor} - \tau_{zxsj} Y_{sj}^{tor}) + \sum_{i=1}^{l_{yswi,1-4}} A_{swi} (\sigma_{yswi} X_{swi}^{tor} - \sigma_{xswi} Y_{swi}^{tor}), \quad (4)$$

Нормальні та дотичні напруження σ_{zcn} , σ_{zsj} , τ_{zxcn} , τ_{zycn} , τ_{zxsj} , τ_{zysj} , σ_{xswi} , σ_{yswi} В рівняннях (2)-(4) визначаються за допомогою повних діаграм деформування бетону і арматури та прийнятих гіпотез за наступними формулами:

- для n-ої частки бетону поперечного перерізу:

$$\begin{aligned} \sigma_{zcn} &= E_{cnn} \zeta_{cn} \varepsilon_{zcn}; & \tau_{zxcn} &= G_{cnn} \vartheta_{zxcn} \gamma_{zxcn}; \\ \tau_{zycn} &= G_{cnn} \vartheta_{zycn} \gamma_{zycn}; & \tau_{xycn} &= G_{cnn} \vartheta_{xycn} \gamma_{xycn} \end{aligned} \quad (5)$$

де ζ_{cn} – коефіцієнт зміни січного модуля пружності бетону E_{cn} .

ϑ_{zxcn} , ϑ_{zycn} , ϑ_{xycn} – коефіцієнти зміни січного модуля пружності при зсуві бетону

- для j-го стержня поздовжньої арматури:

$$\begin{aligned} \sigma_{zsj} &= E_{sj} \zeta_{zsj} \varepsilon_{zsj}; & \tau_{zxsj} &= G_{sj} \vartheta_{zxsj} \gamma_{zxsj}; \\ \tau_{zysj} &= G_{sj} \vartheta_{zysj} \gamma_{zysj}; & \tau_{xysj} &= G_{sj} \vartheta_{xysj} \gamma_{xysj}, \end{aligned} \quad (6)$$

де ζ_{zsj} – коефіцієнт зміни січного модуля пружності сталі E_{sj} .

- для окремих елементів стержнів поперечної арматури нормальні напруження, що виникають в них, знаходимо з умови її сумісної роботи з бетоном. Для вертикальних і горизонтальних стержнів отримаємо, відповідно:

$$\sigma_{yswi} = E_{swi} \zeta_{yswi} \varepsilon_{yswi}^*, \quad \sigma_{xswi} = E_{swi} \zeta_{xswi} \varepsilon_{xswi}^*, \quad (7)$$

де $\zeta_{yswi}, \zeta_{xswi}$ – коефіцієнти зміни січного модуля пружності для сталі поперечних стержнів.

Узагальнені лінійні та кутові деформації. Узагальнені лінійні та кутові деформації визначаються з урахуванням гіпотези плоских перерізів, розв'язків теорії пружності Х. Хана для поперечного згину, функцій розподілу напружень Ю.А. Школи при стисненому крученні та рекомендацій Сен-Венана при вільному крученні:

- для і-тої частки бетону поперечного перерізу:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{zcn} &= \varepsilon_0 + \chi_x X_{cn} + \beta_z \theta_z \varphi(X_{cn}^{tor}, Y_{cn}^{tor}) \\ \gamma_{zxcn} &= K_y h_{ycn} + \theta_z f_{zxcn}, \\ \gamma_{zycn} &= K_y g_{ycn} - \theta_z f_{zycn}, \\ \gamma_{xycn} &= -\theta_z f_{xycn},\end{aligned}\quad (8)$$

де ε_0 – осьова відносна деформація по лінії поздовжньої осі (z) елемента;

χ_x – кривизна згину у площині дії згинального моменту M_x ;

β_z – коефіцієнт депланації перерізу;

z – відстань по довжині стержня від розрахункового перерізу до найближчого жорсткого закріплення;

θ_z – відносний (погонний) кут закручування одиниці довжини стержня (рад/м);

$\varphi(X_{cn}^{tor}, Y_{cn}^{tor})$ – функція кручення Сен-Венана;

$X_{cn}^{tor}, Y_{cn}^{tor}$ – координати елементарної площинки, що розглядається, відносно центру кручення;

K_y , – кривизна зсуву в площині дії поперечної сили V_y ;

g_{ycn}, h_{ycn} – функції розподілу кутових деформацій у бетоні при поперечному згині.

$$f_{zxcn} = \frac{\tau_{zxcn}}{(\theta_z \cdot G_{cn})}, \quad f_{zycn} = \frac{\tau_{zycn}}{(\theta_z \cdot G_{cn})}, \quad f_{xycn} = \frac{\tau_{xycn}}{(\theta_z \cdot G_{cn})} - \text{функції розподілу}$$

дотичних напружень по бетонному поперечному перерізу.

- для j-ого стержня повздовжньої арматури узагальнені лінійні та кутові деформації визначаються аналогічно(8);

- для окремих ділянок стержнів поперечної арматури:

відносні осьові деформації $\varepsilon_{yswi}^*, \varepsilon_{xswi}^*$, відповідно, окремих ділянок вертикального і горизонтального стержнів поперечної арматури (хомутів):

$$\begin{aligned}\varepsilon_{yswi}^* &= \gamma_{zycn}^* = \gamma_{zyswi,c} \left\{ 1 + \left[d_{sw} E_{sw} \zeta_{yswi} (1 + \nu_c) / (2l_{ysw} E_{cmn} \varrho_{zycn}) \right] \right\}^{-1}, \\ \varepsilon_{xswi}^* &= \gamma_{zxcn}^* = \gamma_{zxswi,c} \left\{ 1 + \left[d_{sw} E_{sw} \zeta_{xswi} (1 + \nu_c) / (2l_{xsw} E_{cmn} \varrho_{zxcn}) \right] \right\}^{-1},\end{aligned}\quad (9)$$

де узагальнені кутові деформації бетону, прилеглого до і-тої ділянки поперечної арматури визначаються:

$$\begin{aligned}\gamma_{zxswi,c} &= K_y h_{yswi,c} + \theta_z f_{zxswi,c}; \\ \gamma_{zyswi,c} &= K_y g_{yswi,c} - \theta_z f_{zyswi,c},\end{aligned}\quad (10)$$

Фізичні співвідношення. Використовуючи рівняння рівноваги (2)÷(4), узагальнені лінійні та кутові деформації, діаграми деформування матеріалів, загальні фізичні співвідношення для розрахункового поперечного перерізу залізобетонного стержня

можна представити у вигляді:

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ V_y \\ T_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & D_{13} \\ 0 & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \chi_x \\ K_y \\ \theta \end{Bmatrix} \text{ або } \{N\} = [D]\{\varepsilon\}, \quad (11)$$

де D_{11} – згинальна жорсткість в площині zoy :

$$D_{11} = \sum_{n=1}^k A_{cn} E_{cnn} \zeta_{cn} Y_{cn}^2 + \sum_{j=1}^m A_{sj} E_{sj} \zeta_{zsj} Y_{sj}^2 / \psi_{sj}, \quad (12)$$

D_{22} – жорсткість зсуву в площині zoy від дії поперечної сили:

$$D_{22} = \sum_{n=1}^k \frac{A_{cn} E_{cnn} \mathcal{G}_{zycn} g_{ycn}}{[2(1+\nu_c)]} + \sum_{j=1}^m \frac{A_{sj} E_{sj} \mathcal{G}_{zysj} g_{ysj}}{[2(1+\nu_s)]} + \sum_{i=1}^{l_{sw,y}} A_{swi} E_{sw} \zeta_{swi} g_{yswi,c}; \quad (13)$$

D_{13} – жорсткість впливу крутного моменту T_{xy} на кривизну згину в площині zoy :

$$D_{13} = D_{31} = \sum_{n=1}^k A_{cn} E_{cnn} \zeta_{cn} \beta_z \varphi(X_{cn}^{tor}, Y_{cn}^{tor}) + \sum_{j=1}^m A_{sj} E_{sj} \zeta_{zsj} \beta_z \varphi(X_{sj}^{tor}, Y_{sj}^{tor}) / \psi_{sj}, \quad (14)$$

D_{23} – жорсткість впливу крутного моменту T_{xy} на зсув у площині zoy та поперечної сили V_y на зсув в площині xoy :

$$D_{23} = D_{32} = \sum_{n=1}^k \frac{A_{cn} E_{cnn} \mathcal{G}_{zxcn} f_{zxcn}}{[2(1+\nu_c)]} + \sum_{j=1}^m \frac{A_{sj} E_{sj} \mathcal{G}_{zxsj} f_{zxsj}}{[2(1+\nu_s)]} + \sum_{i=1}^{l_{sw,x}} A_{swi} E_{sw} \zeta_{xswi} f_{zxswi,c}, \quad (15)$$

D_{33} – жорсткість при крученні стержня в площині xoy :

$$D_{33} = \sum_{n=1}^k \frac{A_{cn} E_{cnn} \mathcal{G}_{xycn}}{[2(1+\nu_c)]} (f_{zycn} X_{cn}^{tor} - f_{zxcn} Y_{cn}^{tor}) + \sum_{j=1}^m \frac{A_{sj} E_{sj} \mathcal{G}_{xysj}}{[2(1+\nu_s)]} (f_{zysj} X_{sj}^{tor} - f_{zxsj} Y_{sj}^{tor}) + \sum_{i=1}^{l_{sw,y} + l_{sw,x}} A_{swi} E_{sw} \zeta_{xyswi} (f_{zyswi} X_{swi}^{tor} - f_{zxswi} Y_{swi}^{tor}), \quad (16)$$

де ψ_{sj} – коефіцієнт В. І. Мурашева, який може бути визначений згідно з російськими нормами за формулою:

$$\psi_{sj} = 1 - \omega \sigma_{sj,cr} / \sigma_{sj}, \quad (17)$$

де $\sigma_{sj,cr}$ – напруження в j -тому стержні в момент виникнення тріщин;

σ_{sj} – поточне напруження в j -тому стержні повздовжньої арматури на рівні навантаження, що розглядається;

ω – коефіцієнт повноти епюри розтягнутого бетону, $\omega = 0,7$.

Вважаємо, що фізичні співвідношення (11)÷(16) є справедливими на всіх стадіях напружено-деформованого стану стержневих залізобетонних елементів прямокутного перерізу при простому пропорційному їх навантаженні.

Вони є частиною алгоритму визначення міцності та деформативності їхніх окремих розрахункових перерізів.

При сталому співвідношенні зовнішніх силових факторів на будь-якій стадії навантаження вектор деформацій має вид:

$$\{\varepsilon\} = [D]^{-1} \{N\}, \quad (18)$$

У п'ятому розділі виконано порівняння експериментальних величин несучої здатності з результатами розрахунків, виконаних за старими СНиП 2.03.01-84*, вітчизняним ДСТУ Б В.2.6.-156-2010, російськими СНиП 52.101-03: СП 63.13330-2012, європейськими EUROCODE-2, американськими АСІ 318-14, японськими АІЈ Code,

2007, канадськими CSA A 23.3-04 та німецькими DIN 1045-1.12.2008 нормами. Побудова загальної розрахункової моделі, яка змогла б адекватно змодельовати напружено-деформований стан та достовірно описати опір конструкції дії зрізу в комбінації зі згином, розтягом, стиском та крученням, є однією з найбільш складних задач у теорії залізобетону. У зв'язку з цим у практичних розрахунках міцності плоских і просторових похилих перерізів залізобетонних елементів фахівці користуються умовними моделями, так званими, інженерними методиками, побудованими, як правило, на софістських аналогіях.

Аналіз отриманих результатів показав, що раніше діючі вітчизняні норми СНиП 2.03.01-84* мали найкращу серед національних норм проектування збіжність (коефіцієнт варіації $v=30\%$) розрахункових і експериментальних даних несучої здатності просторових перерізів дослідних елементів тому, що вони краще від інших зарубіжних норм відображали фізичну картину їх роботи під навантаженням. Проте розрахункові формули СНиП 2.03.01-84* показали також і найменшу їх надійність у порівнянні з іншими нормами, оскільки для значної кількості зразків розрахункові значення міцності на 10% і більше перевищували реальну їх несучу здатність. Нові російські норми СНиП 52.101-03 в цьому відношенні виявилися найбільш безпечними тому, що в них з деякими спрощеннями був закладений додатковий запас міцності.

Єдині європейські норми (ЕС-2) та національні норми проектування розвинених країні, що базуються на використанні модифікованих фермової аналогії та теорії полів стиску, показують ще більшу розбіжність розрахункових та дослідних даних ($v=78\%$ за німецькими нормами DIN 1045.1.12.2008). При цьому, розрахункові формули ЕС-2 та інших зарубіжних національних норм проектування створюють більший запас міцності у порівнянні зі старими вітчизняними нормами.

Порівняння результатів розрахунків несучої здатності просторових перерізів дослідних елементів, визначених за різними авторськими методами, показало кращу, в цілому, збіжність з експериментальними даними у порівнянні із зарубіжними нормами та їх використання для окремих видів напруженого стану.

Виконане в цьому ж розділі *модельовання складного напруженого стану* (рис.8) дослідних залізобетонних елементів шляхом нелінійних скінчено-елементних розрахунків з використанням реальних діаграм стану матеріалів, сучасних феноменологічних критеріїв міцності дає можливість чисельно відтворити результати експерименту за допомогою сучасного обчислювального комплексу «Лира-САПР» із задовільною для практичних розрахунків точністю ($v<12\%$).

Інженерний розрахунок на спільну дію крутних і згинальних моментів, а також крутних моментів і поперечних сил пропонується здійснювати, виходячи з рівнянь взаємодії між відповідними силовими чинниками, по аналогії за СНиП 52.101.2003 за виразом (19)

$$V = V_o \left(1 - \frac{T}{T_o}\right) k, \quad (19)$$

де V - поперечна сила від зовнішнього навантаження в нормальному перерізі;

T – діючі значення крутного моменту;

V_o - гранична поперечна сила, що сприймається бетоном між похилими перерізами;

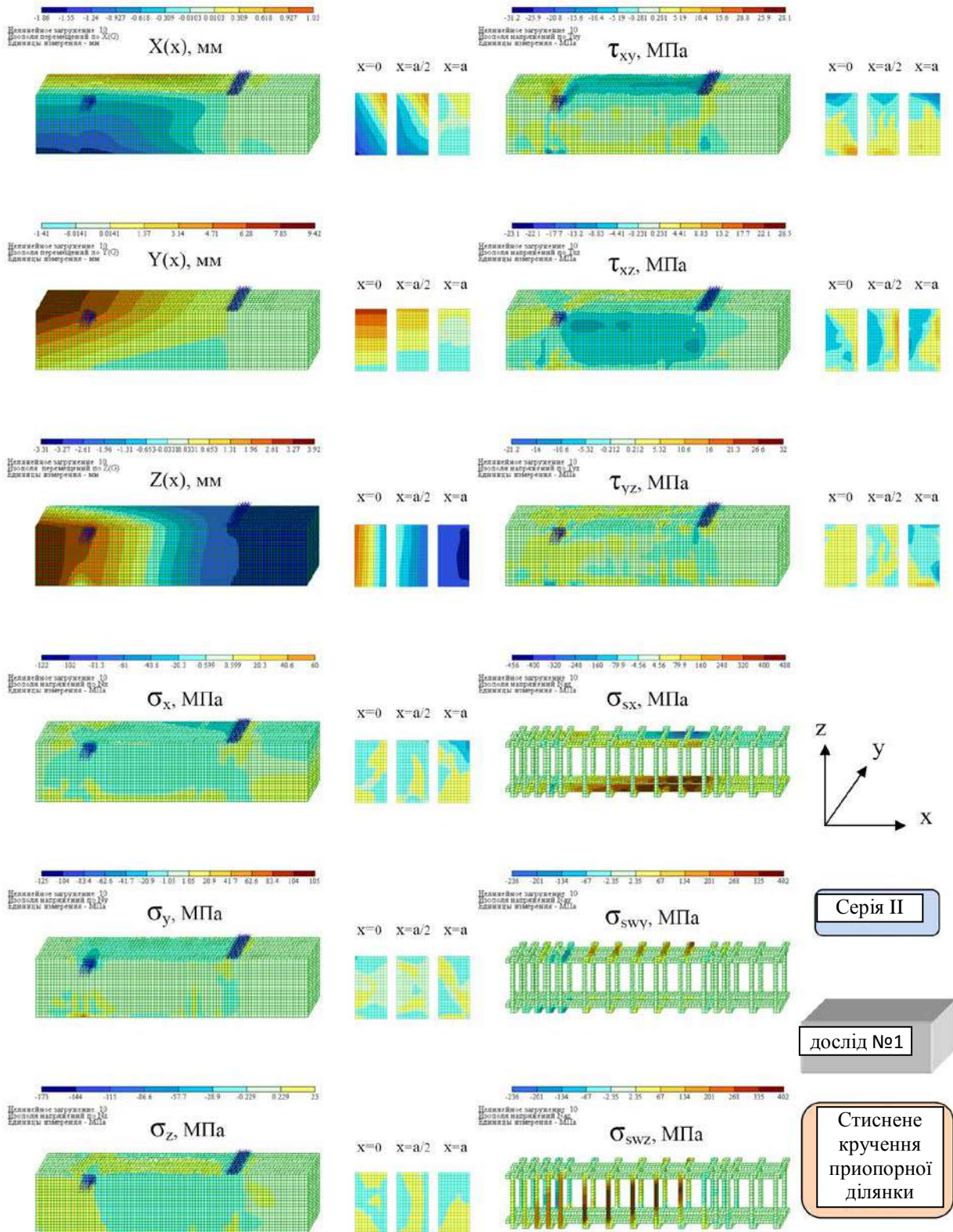


Рис. 8 Ізополя переміщень і напружень прогінного елемента зі стисненим крученням припорної ділянки та руйнуванням її за складним просторовим перерізом

$$V_o = \varphi_{e1} \cdot f_{cd} \cdot b \cdot h_o, \tag{20}$$

де φ_{e1} – коефіцієнт, що дорівнює 0,3;

T_o – граничний крутний момент, що сприймається елементом між просторовими перетинами;

$$T_o = 0,1f_{cd} \cdot b^2 \cdot h, \quad (21)$$

b і h - відповідно, менший і більший розміри поперечного перерізу елемента.

k – уточнюючий коефіцієнт впливу конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії на несучу здатність приопорних ділянок дослідних елементів, математична модель якого за дослідними даними має вид:

$$\hat{Y}(k) = 1,01 - 0,51X_1 + 0,12X_2 + 0,22X_3 + 0,16X_4 + 0,08X_5 + 0,02X_2^2 + 0,04X_3^2 - 0,14X_1X_2 - 0,05X_1X_4 + 0,06X_2X_3 + 0,04X_2X_4, \mathcal{R} = 5,2\% \quad (22)$$

Емпіричний вираз для коефіцієнта k , отриманий з математичної моделі (22) шляхом заміни кодованих змінних на натуральні значення дослідних факторів, може бути представлений виразом:

$$\begin{aligned} k = & 1,01 - 0,51 \left(\frac{a/h_0 - 2}{1} \right) + 0,12 \left(\frac{T - 2,25кНм}{0,75кНм} \right) + 0,22 \left(\frac{\rho_w - 0,0029}{0,00145} \right) + \\ & + 0,16 \left(\frac{\rho_f - 0,0176}{0,00505} \right) + 0,08 \left(\frac{\rho'_f - 0,0090}{0,00355} \right) + 0,02 \left(\frac{T - 2,25кНм}{0,75кНм} \right)^2 + \\ & + 0,04 \left(\frac{\rho_w - 0,0029}{0,00145} \right)^2 - 0,14 \left(\frac{a/h_0 - 2}{1} \right) \left(\frac{T - 2,25кНм}{0,75кНм} \right) - \\ & - 0,05 \left(\frac{a/h_0 - 2}{1} \right) \left(\frac{\rho_f - 0,0176}{0,00505} \right) + 0,06 \left(\frac{T - 2,25кНм}{0,75кНм} \right) \left(\frac{\rho_w - 0,0029}{0,00145} \right) + \\ & + 0,04 \left(\frac{T - 2,25кНм}{0,75кНм} \right) \left(\frac{\rho_f - 0,0176}{0,00505} \right). \end{aligned} \quad (23)$$

Вираз (23) є справедливим у межах зміни представлених в табл. 1 конструктивних чинників та фактора зовнішньої дії T з допустимою їх екстраполяцією на 25% від величини інтервалу зміни за вказаними в табл. 1 межами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Експериментально-теоретичними дослідженнями вперше встановлено, що крутний момент величиною до $0,6T_u$ не тільки радикально (до 2^x разів) зменшує несучу здатність прогінних залізобетонних елементів при стисненому крученні їх приопорних ділянок, а й підвищує їх прогини до 70% та сприяє обертанню опорного перерізу до 10° .

2. Вперше встановлено, що руйнування приопорних ділянок при їх згині зі стисненим крученням бере початок від опори і виклинюється на поверхню балки в самому кінці прольоту зрізу. При цьому, якщо довжина проекції руйнуючої просторової тріщини на тій вертикальній грані, де дотичні напруження від T і V збігаються за напрямком, близька до традиційної, то на протилежній грані довжина утвореної перед руйнуванням балки перехресної тріщини дорівнює прольоту зрізу.

3. Прийнята методика проведення експериментів з використанням теорії планування дозволила дослідити вплив кожного конструктивного чинника та фактора зовнішньої дії на основні параметри працездатності випробуваних залізобетонних елементів як зокрема, так і у взаємодії, що дає змогу приймати обґрунтовані рішення при їх проектуванні, зокрема визначати величину уточнюючого коефіцієнта k в інженерній

методиці розрахунку міцності.

4. Адаптована автором нелінійна деформаційна модель залізобетонної балкової конструкції, що зазнає згину з крученням, дозволяє з єдиних позицій механіки залізобетону ураховувати особливості сумісної роботи бетону і арматури на всіх стадіях, включаючи руйнування.

5. Моделювання складного напружено-деформованого стану дослідних елементів шляхом нелінійного скінчено-елементного розрахунку з використанням реальних діаграм стану матеріалів та сучасних феноменологічних критеріїв міцності показало можливість відтворювати їх дійсний характер роботи на усіх етапах, включаючи руйнування, зокрема, за допомогою ПК «Ліра-САПР».

6. Порівняння результатів розрахунку міцності просторових перерізів за нормативними методами розвинених країн світу з несучою здатністю дослідних зразків-балок показало незадовільну їх збіжність внаслідок відмінностей закладених в них розрахункових моделей від реального механізму їх деформування, тріщиноутворення та руйнування, а також недооцінки впливу на ці процеси конструктивних чинників та крутного моменту.

7. Вдосконалена автором інженерна методика розрахунку міцності просторових перерізів прогінних залізобетонних конструкцій дозволяє здійснювати достовірний прогноз їх несучої здатності у визначеному діапазоні зміни дослідних факторів.

Результати експериментально-теоретичних досліджень дисертаційної роботи впроваджені в практику проектування об'єктів: підсиленні фундаментів і надземних прогінних конструкцій м'ясо-молочного корпусу, комплексної забудови території Нового Ринку (концерн «Веселка», м. Одеса), а також в навчальний процес Одеської державної академії будівництва та архітектури при підготовці спеціалістів та магістрів будівельного профілю.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

1. Карпюк В.М. Міцність, деформативність та тріщиностійкість прогінних залізобетонних елементів при їх згині з крученням (монографія) / В.М.Карпюк, О.М. Петров – Одеса: ОДАБА, «Оптимум», 2016. – 267с., іл. ISBN 978-966-344-668-4.

(Виконання експериментальних досліджень, обробка та аналіз отриманих результатів, формулювання висновків)

Статті у наукових фахових виданнях України

2. Дорофеев В. С. Исследование прочности приопорных участков железобетонных элементов при совместном действии поперечных сил, изгибающих и крутящих моментов / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, А. Н. Петров // Зб. наук. праць "Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди". – Рівне : НУВГП, 2006. – Вип. 14. – С. 183–187.

(Розробка методики експериментальних досліджень)

3. Крантовская Е.Н. Постановка эксперимента по исследованию напряженно-деформированного состояния неразрезных железобетонных балок в местах смены знака и величины изгибающего момента / Е. Н. Крантовская, Н. Н. Петров, А. Н. Петров // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: ОДАБА, 2006. Вип. №22. – С. 156-162. *(Узгоджено план експерименту)*

4. Дорофеев В. С. Прочность наклонных сечений неразрезных железобетонных балок / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, Е. Н. Крантовская, Н. Н. Петров, А. Н. Петров // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Вип. 24. – Одеса: ТОВ «Зовнішрекламсервіс». 2006, – С. 85–94. *(Проведення експериментальних досліджень)*

5. Дорофеев В. С. Вдосконалення інженерного методу розрахунку несучої здатності похилих перерізів нерозрізних залізобетонних балок / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, О. М. Крантовська, М. М. Петров, О. М. Петров // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Вип. 26. – Одеса: ТОВ «Зовнішрекламсервіс». 2007,– С. 164–171.

(Вдосконалено інженерний метод розрахунку несучої здатності похилих перерізів)

6. Дорофеев В. С. Прочность приопорных участков железобетонных балок при совместном действии поперечных сил, изгибающих и крутящих моментов / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, А. Н. Петров, О. С. Кожокар // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Вип. 34. – Одеса : ТОВ "Зовнішрекламсервіс", 2009. – С. 418–427.

(Проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз отриманих результатів)

7. Дорофеев В. С. Міцність та тріщиностійкість приопорних ділянок залізобетонних балок при сумісній дії поперечних сил, згинальних та крутних моментів / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, О. М. Петров та ін. // Наук. техн. зб. ["Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві" №2], (Вінниця, листопад, 2010 р). – Вінниця, 2010. – № 2 (9). – С. 6–14.

(Визначення картини тріщиноутворення, деформування та руйнування дослідних елементів за просторовими тріщинами)

8. Дорофеев В. С. Несуча здатність приопорних ділянок залізобетонних елементів при поперечному згині зі стисненням та вільним крученням / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, М. М. Петров, О. М. Петров, А.Н. Хабібুলін // Будівельні конструкції: міжвідомч. наук.-техн. зб. наук. праць (буд-во)/ ДП «ДНДІБК» Мін. регіон. розв. та буд-ва України.- Вип. 74: В 2-х кн.: Книга 1. – Київ: ДП НДІБК, 2011. – С.118-133.

(Виконання числового експерименту за узгоджуваним планом)

9. Дорофеев В. С. Розрахункова модель стержневої залізобетонної конструкції з урахуванням її складного напружено-деформованого стану /В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, О. М. Петров, М. М. Петров//Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика//зб. наук. праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. №3. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2012. – с.45–55 (індексується базою Google Scholar).

(Визначення феноменологічних критеріїв міцності дослідних елементів, розробка загальних фізичних співвідношень)

10. Карпюк В.М. Розрахунок залізобетонного стержня у загальному випадку напружено-деформованого стану / В. М. Карпюк, М. М. Петров, О. М. Петров// Комунальне господарство міст // наук. - техн. зб. Харківської національної академії міського господарства. - Вип. 105. Серія: технічні науки та архітектура. - Харків: ХНАМГ, 2012. - С.83-99 (індексується базою Google Scholar).

(Вибір діаграм деформування матеріалів складення рівнянь рівноваги, узагальнених лінійних та кутових деформацій)

11. Дорофеев В. С. Тріщиностійкість стержневих залізобетонних конструкцій / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, О. М. Крантовська, М. М. Петров, О. М. Петров// Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Вип. 52.ч.1 – Одеса: ТОВ «Зовнішрекламсервіс». 2014,– С. 156–169.

(Формування та систематизація картин тріщиноутворення прогінних залізобетонних конструкцій, виявлення механізму та схем їх руйнування)

Статті за кордоном та у виданнях, включених до міжнародних науково-метричних баз даних:

12. Dorofeyev V. Strength calculation of support areas in reinforced concrete beam structures / Dorofeyev V.,Karpyuk V.,Krantovskaya E, Petrov N., Petrov A., // Научно-технический журнал по строительству и архитектуре «Вестник МГСУ». - Вип. 12. - Москва (Россия): Изд-во МИСИ - МГСУ, 2013. - С.55-67. (індексується в РИНЦ, UlrichsWeb Global Serials Directory, DOAJ, EBSCO).

(Розробка інженерного методу розрахунку дослідних елементів)

13. Karpyuk V. Загальний інженерний метод розрахунку міцності приопорних ділянок плосконапружених прогонових залізобетонних елементів / Karpyuk V., Krantovskaya E., Petrov N., Petrov A., // Collection of scientific works of the National Academy of sciences of Ukraine Karpenko

PHYSICO-MECHANICAL INSTITUTE [FRACTURE MECHANICS AND PHYSICS OF CONSTRUCTION MATERIALS AND STRUCTURES] – Issue 10. – Lviv: Kamenjar, 2014. – С. 41-54. (Входить до НМБД Google Scholar).

(Виконана систематизація та оформлення загального інженерного методу розрахунку)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

14. Dorofyeyev V. IMPROVED DEFORMATION MODEL OF THE REINFORCED CONCRETE BAR STRUCTURE FOR THE GENERAL CASE OF STRESSED STATE / Dorofyeyev V., Karpyuk V., Krantovskaya E, Petrov N., Petrov A., // Міжнародний науковий вісник. International scientific herald. Збірник наукових статей за матеріалами XXVII Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи розвитку європейського університету в контексті широкої інноваційної стратегії» Ужгород-Будапешт, 26-29 листопада 2013 року – Ужгород: ДВНЗ «УжНУ», 2014. – Вип. 8(27). - С. 51-64 (*індексується базою Google Scholar*).

(Виконана систематизація існуючих методик розрахунку несучої здатності та підготовка узагальненої методики розрахунку міцності приопорних ділянок прогінних залізобетонних конструкцій)

15. Dorofyeyev V. Analysis of experimental researches of crack resistance of run-out reinforced concrete elements / Dorofyeyev V., Karpyuk V., Krantovskaya E, Petrov N., Petrov A., // International scientific herald. The Eighth International Conference on Material Technologies and Modeling MMT – 2014, Ariel University Ariel, Israel, July 28-August 01, 2014, volume 1, 3-41 – 3-52. (*індексується базою Google Scholar*).

(Підготовка вихідних даних та переклад статті на англійську мову)

16. Петров О.М. Тріщиноутворення та характер руйнування залізобетонних елементів при згині з крученням // Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник «Будівництво в сейсмічних районах України». Вип.82. – Київ ДП НДІБК. – 2015, с. 507-518.

(Розроблена методика виконання експериментальних досліджень, обробка і аналіз отриманих експериментально-теоретичних результатів)

АНОТАЦІЯ

Петров О.М. Міцність, деформативність та тріщиностійкість прогінних залізобетонних елементів при їх згині з крученням.-На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» (19 – Архітектура та будівництво). – Одеський національний морський університет, Одеса, 2018.

Дисертація присвячена експериментально - теоретичному дослідженню складного напружено-деформованого стану прогінних залізобетонних конструкцій з урахуванням дії крутного моменту, вивченню впливу конструктивних чинників та зазначеного фактора зовнішнього впливу на їх тріщиностійкість, деформативність та міцність; виявленню нових схем руйнування вказаних конструкцій за складними просторовими перерізами та встановленню їх залежності від відповідного співвідношення дослідних факторів; розробці нової інженерної методики розрахунку міцності просторових перерізів балкових конструкцій при їх згині з крученням; розвитку нелінійної деформаційної моделі залізобетонної конструкції, яка дозволяє урахувувати особливості сумісної роботи бетону й арматури на всіх стадіях, включаючи руйнування за одночасної дії поперечної сили, згинального і крутного моментів; експериментальній перевірці можливості та умов застосування найбільш розповсюджених методів розрахунку для перевірки міцності просторових перерізів дослідних елементів; моделюванню складного напружено-деформованого стану вказаних конструкцій шляхом нелінійних скінчено-елементних розрахунків з використанням сучасного

програмного комплексу, упровадженню результатів досліджень у будівельну практику і навчальний процес ВНЗ будівельного профілю.

Ключові слова: прогінні (балкові) залізобетонні конструкції, напружено-деформований стан, просторові похилі перерізи, несуча здатність, розрахункові моделі.

АННОТАЦІЯ

Петров А.Н. Прочность, деформативность и трещиностойкость пролетных железобетонных элементов при их изгибе с кручением. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» (19 - Архитектура и строительство). - Одесский национальный морской университет, Одесса, 2018.

Диссертация посвящена разработке расчетных моделей балочных железобетонных конструкций, работающих на изгиб с кручением, с использованием реальных диаграмм состояния материалов, современных феноменологических критериев прочности бетона и арматуры, результатов системных натурных и численных исследований.

Во **введении** раскрыта сущность и состояние научной проблемы, обоснована актуальность, изложена цель, задачи и рабочая гипотеза исследований, которые проводились; охарактеризована научная новизна, практическая ценность работы и сведения о ее апробации; дана общая характеристика диссертации.

В **первой** главе сделан обзор отечественных и зарубежных литературных источников, сделан критический анализ опубликованных работ в области исследований сложного напряженно-деформированного состояния конструкций, работающих на изгиб с кручением.

Во **втором** разделе диссертации изложена методика выполнения системных натурных и численных экспериментов, основанных на теории планирования, использовании специального лабораторного оборудования; описана конструкция и армирования опытных образцов-балок.

В **третьем** разделе работы раскрыты основные закономерности и особенности деформирования, трещинообразования и разрушения пролетных железобетонных конструкций, работающих на изгиб со сжатым и свободным кручением; определено системное влияние исследовательских факторов на их несущую способность, обнаруженный механизм и новые схемы их разрушения по пространственным сечениям.

В **четвертом** разделе диссертации получила развитие в общем виде нелинейная деформационная модель стержневой железобетонной конструкции, в расчетных сечениях которой с единых позиций механики железобетона учитываются особенности совместной работы бетона и арматуры на всех стадиях, включая ее разрушения, при совместном действии поперечных сил, изгибающих и крутящих моментов.

В **пятом** разделе диссертационной работы приведены результаты сравнения исследовательских и расчетных данных прочности пространственных наклонных сечений испытанных образцов-балок, исчисленных в соответствии с рекомендациями национальных норм проектирования развитых стран мира, которые, в целом, показали неудовлетворительную их сходимость, а также моделирование их сложного напряженно-деформированного состояния с помощью нелинейных конечно-элементных расчетов, которое показало возможность численного воспроизведения результатов экспериментов и достоверного прогноза их прочности. Предложена новая,

экспериментально обоснованная инженерная методика расчета прочности пространственных наклонных сечений таких конструкций, которые базируется на СНиП 52.101-2003 с использованием коэффициента k , который интегрально учитывает комплексное влияние на нее всех исследовательских факторов.

Ключевые слова: пролетные (балочные) железобетонные конструкции, напряженно-деформированное состояние, пространственные наклонные сечения, несущая способность, расчетная модель.

ABSTRACT

Petrov O.M. Strength, deformability and crack resistance of prefabricated reinforced concrete elements at their bending with twisting. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (Doctor of Philosophy) in specialty 05.23.01 "Building constructions, buildings and structures" (19 - Architecture and construction). - Odessa National Maritime University, Odessa, 2018.

The dissertation is devoted to the experimental and theoretical investigation of complex stress-strain state of span reinforced concrete structures considering the torque action, the study of the influence of constructive factors and the mentioned factor of external impact onto their crack resistance, deformability and strength; discovery of new destruction schemes of these structures on complex spatial sections and their dependence on the corresponding ratio of research factors; working out of a new engineering method for calculating the spatial sections strength of beam structures at their bending with torsion; development of a nonlinear deformation model of the reinforced concrete structure, which allows to take into account the peculiarities of concrete and reinforcement monolithic behavior at all stages, including destruction under the simultaneous action of transverse force, bending moment and torque; experimental verification of possibility and conditions for applying the most common calculation methods to check the spatial sections strength of investigated elements; modeling of complex stress-strain state of the above-mentioned structures by means of nonlinear finite element calculations using the modern software, introduction of research results into construction practice and educational process of higher education institutions with a building profile.

Keywords: span (beam) reinforced concrete structures, stress-strain state, spatial oblique sections, load-bearing capacity, calculation models.