

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

**КОЗАК ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 624.012.46

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН, МІЦНІСТЬ ТА  
ТРИЩИНІСТІЙКІСТЬ ВУЗЛІВ МОНОЛІТНИХ РАМ ТА  
НЕРОЗРІЗНИХ БАЛОК З АРМАТУРОЮ НАПРУЖЕНОЮ НА БЕТОН**

05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі залізобетонних та кам'яних конструкцій Київського національного університету будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

кандидат технічних наук, доцент  
**Журавський Олександр Дмитрович**  
завідувач кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій  
Київський національний університет будівництва та архітектури, МОН України (м. Київ),

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, доцент  
**Кочкар'юв Дмитро Вікторович**  
професор кафедри міського будівництва і господарства  
Національний університет водного господарства та природокористування, МОН України (м. Рівне)

кандидат технічних наук, доцент  
**Мазурак Андрій Васильович**  
декан факультету будівництва та архітектури  
Львівський національний аграрний університет,  
МОН України (м. Дубляни)

Захист відбудеться «11» жовтня 2019 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.01 при Київському національному університеті будівництва та архітектури за адресою: 03037, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31, а. 319.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Київського національного університету будівництва та архітектури (03037, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31)

Автореферат розісланий «10» вересня 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук,  
доцент



Михайловський Д.В.

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** На сьогоднішній день напружено-деформований стан похилих перерізів залишається мало вивченим (в порівнянні з нормальними перерізами), підтвердження чого є відсутність єдиної методики розрахунку, яка б враховувала всі фактори, що впливають на роботу залізобетонних елементів при одночасній дії згинального моменту, поперечної та поздовжньої сили.

Проблемі міцності залізобетонних елементів, за поперечною силою, присвячено ряд робіт, в яких досліджується вплив різних факторів на міцність похилих перерізів. Проте найбільш невивченим фактором являється напружена арматура, вплив якої (на міцність похилих перерізів) в різних нормативних документах трактується по різному.

Попереднє напруження може здійснюватися як зі зчепленням напружуваної арматури з бетоном, так і без нього. Відмінність технології постнапруження від широко відомого попереднього напруження (здійснюваного в умовах заводу ЗБВ), полягає в тому, що напружувана арматура натягується після бетонування і набору бетоном достатньої передаточної міцності (приблизно 70-80% марочної міцності). Для забезпечення можливості натягу арматури, після твердіння бетону, вона повинна мати можливість вільного переміщення в бетоні. Для цього напружувана арматура поміщується в канали (із металевих або пластикових труб). Передача зусиль на бетон здійснюється за допомогою встановлених на кінцях елементів анкерних пристроїв. Як правило, для попереднього напруження використовуються арматурні канати, що влаштовуються в конструкціях між верхньою й нижньою сіткою арматур відповідно до форми епюри згинальних моментів (лінією головних розтягуючих зусиль). При натягу канатів виникають напруження обтиску бетону (від сили натягу  $P$ ) та розвантажувальне зусилля (реактивний тиск), що змінює свій напрямок на опорах в нерозрізних конструкціях.

Таким чином, зазначене вище, свідчить про актуальність досліджень, що пов'язані із визначенням впливу криволінійної напружуваної арматури на експлуатаційні якості (міцність, тріщиностійкість та деформативність) вузлів монолітних рам та нерозрізних балок.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота є складовою частиною науково-дослідних робіт тематики кафедри Залізобетонних та кам'яних конструкцій КНУБА на 2016...2020 рр. "Дослідження залізобетонних конструкцій при складних впливах", розділ III "Експериментально-теоретичні дослідження залізобетонних конструкцій" номер державної реєстрації 01971U005390. Автором виконані експериментальні та теоретичні дослідження напружено-деформованого стану вузлів монолітних рам та нерозрізних балок з криволінійною напружуваною арматурою.

### **Мета і задачі дослідження.**

Основною метою дисертаційного дослідження є удосконалення методів розрахунку міцності та тріщиностійкості похилих перерізів залізобетонних монолітних

рам та нерозрізних балок із урахуванням впливу криволінійної напруженої арматури без зчеплення з бетоном.

Основні задачі дослідження:

- виконати експериментальні дослідження напружено-деформованого стану вузлів нерозрізних балок та рам при дії поперечного навантаження;

- на основі експериментальних досліджень встановити характер руйнування, міцність, тріщиностійкість та деформації залізобетонних дослідних зразків, в залежності від наявності напруженої арматури, її кута нахилу та зусилля обтиску;

- дослідити значення оптимального кута нахилу напруженої арматури, при якому досягаються найкращі значення експлуатаційних якостей;

- на основі експериментальних досліджень, запропонувати удосконалену методику розрахунку міцності та тріщиностійкості опорних зон нерозрізних балок та рам із урахуванням криволінійної напруженої арматури;

- змодельовати дослідні зразки в розрахунковому комплексі “ПК ЛІРА-САПР 2018” та виконати порівняльний аналіз із експериментальними дослідженнями.

**Об’єктом досліджень** є залізобетонні вузли монолітних рам та нерозрізних балок із напруженою криволінійною арматурою без зчеплення з бетоном.

**Предметом досліджень** є міцність, тріщиностійкість та деформативність вузлів монолітних рам та нерозрізних балок із напруженою криволінійною арматурою без зчеплення з бетоном.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Під час дисертаційного дослідження були отримані наступні результати.

- на основі результатів експериментальних даних автора та інших дослідників, визначено вплив напруженої криволінійної арматури (без зчеплення з бетоном) на міцність та тріщиностійкість вузлів монолітних рам та нерозрізних балок при дії поперечного навантаження;

- проаналізовано характер руйнування опорних зон вузлів нерозрізних балок та рам із напруженою криволінійною арматурою (при різних кутах нахилу) та без неї;

- визначено оптимальний кут нахилу криволінійної напруженої арматури в опорних зонах нерозрізних балок та рам;

- запропонована удосконалена методика розрахунку міцності та тріщиностійкості вузлів нерозрізних балок та рам із врахуванням напруженої криволінійної арматури;

- отримані результати розрахунків досліджуваних вузлів в розрахунковому комплексі “ПК ЛІРА-САПР 2018”.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблені рекомендації щодо удосконалення розрахунків міцності та тріщиностійкості вузлів монолітних рам та нерозрізних балок (при дії поперечного навантаження) із врахуванням напруженої криволінійної арматури. Запропоновану методику може бути застосована при проектуванні нових та перевірних розрахунках існуючих залізобетонних конструкцій.

**Особистий внесок здобувача** полягає у наступному:

- виконані детальні експерименти із дослідження напружено-деформованого стану вузлів монолітних рам та нерозрізних балок із напруженою криволінійною арматурою без зчеплення з бетоном;

- запропоновано удосконалену методику розрахунків міцності та тріщиностійкості вузлів нерозрізних балок та рам із врахуванням напружуваної криволінійної арматури;

- запропоновано оптимальний кут нахилу криволінійної напружуваної арматури при проектуванні опорних зон нерозрізних балок та рам.

Результати роботи використовують у навчальному процесі при вивченні дисципліни «Спеціальні залізобетонні конструкції для будівель і споруд» для спеціальності «Промислове та цивільне будівництво».

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи обговорювались на V-й Всеукраїнській науково-практичній конференція студентів та молодих вчених «Комп'ютерні технології в архітектурно-будівельному проектуванні» (м. Київ, 2014 р.), 75-й науково-практичній конференції КНУБА (м. Київ, 2014 р.), науково-практичній конференції «Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції» (м. Київ, 2016 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Ефективні технології в будівництві» (м. Київ, 2016 р.), Науково-практичній конференції «Ефективне будівництво. Об'єкти, технології, конструкції та матеріали» (м. Одеса, 2016 р.), 10-th International Conference on Applied Mechanics (Bydgoszcz, Poland, 2018).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації становить: 184 сторінки, у тому числі 156 сторінок основного тексту, 17 таблиць, 108 рисунків, список використаних джерел із 198 найменувань на 22 сторінках і 6 сторінок додатків.

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 7 наукових статей, у тому числі дві статті в іноземних виданнях, одна з них в бібліографічній і реферативній базі даних SCOPUS.

Автор висловлює глибоку вдячність кандидату технічних наук, професору Мурашку Леоніду Андрійовичу за основоположні ідеї даної дисертації, а також за вагомий вклад у виконанні експериментальних досліджень та написанні даної роботи.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У *вступі* висвітлено стан проблеми міцності та тріщиностійкості похилих перерізів залізобетонних монолітних рам та нерозрізних балок з криволінійною напружуваною арматурою, обґрунтовано актуальність, визначено мету досліджень та завдання для її досягнення, показано наукову новизну, практичне значення та апробацію результатів роботи.

У *першому розділі* виконаний огляд літератури та проаналізовано методики розрахунків вузлів монолітних рам та нерозрізних балок з попередньо-напруженою

арматурою (без зчеплення з бетоном). За результатами аналізу розглянутої тематики сформульовано основні задачі експериментальних досліджень.

У *другому розділі* поставлені основні задачі та об'єм експериментальних досліджень, а також розроблена методика випробувань дослідних зразків.

В результаті випробувань планується отримати наступні результати:

- дані про несучу здатність, тріщиностійкості, деформації та характер руйнувань вузлів нерозрізних балок (монолітних рам) за поперечною силою із звичайним армуванням та із напруженою (криволінійною) арматурою на бетон без зчеплення з бетоном;
- вплив попереднього напруження арматури (на бетон) на міцність похилих перерізів;
- вплив кута нахилу попередньо напруженої криволінійної арматури (з натягом на бетон) на несучу здатність похилих перерізів.

Основні задачі експериментальних досліджень:

- дослідження впливу попередньо напруженої арматури з натягом на бетон та без зчеплення з бетоном на несучу здатність, тріщиностійкість та деформації похилих перерізів монолітних вузлів нерозрізних балок (рам) при короткочасному поперечному навантаженні дослідних зразків;
- дослідження впливу кута нахилу криволінійної попередньо напруженої арматури з натягом на бетон та без зчеплення з бетоном на напружено-деформований стан похилих перерізів монолітних вузлів нерозрізних балок (рам);
- дослідження характеру руйнування монолітних вузлів нерозрізних балок (рам) з напруженою арматурою на бетон без зчеплення з бетоном при дії поперечної сили.

Для проведення експерименту та визначення основних показників були запроєктовані та виготовлені монолітні проміжні вузли нерозрізної балки (вузол спряження балок з колоною). Виготовлені три серії зразків із різним розміщенням попередньо напруженої арматури:

- серія КБ-1 – без попередньо напруженої арматури;
- серія КБ-2 – із криволінійною напруженою арматурою (кут нахилу арматури  $\alpha=6^\circ$ );
- серія КБ-3 – із криволінійною напруженою арматурою (кут нахилу арматури  $\alpha=13^\circ$ ).

Кожна серія мала по три зразки. Геометричні параметри зразків із розміщенням напруженої арматури зображені на рис.1:

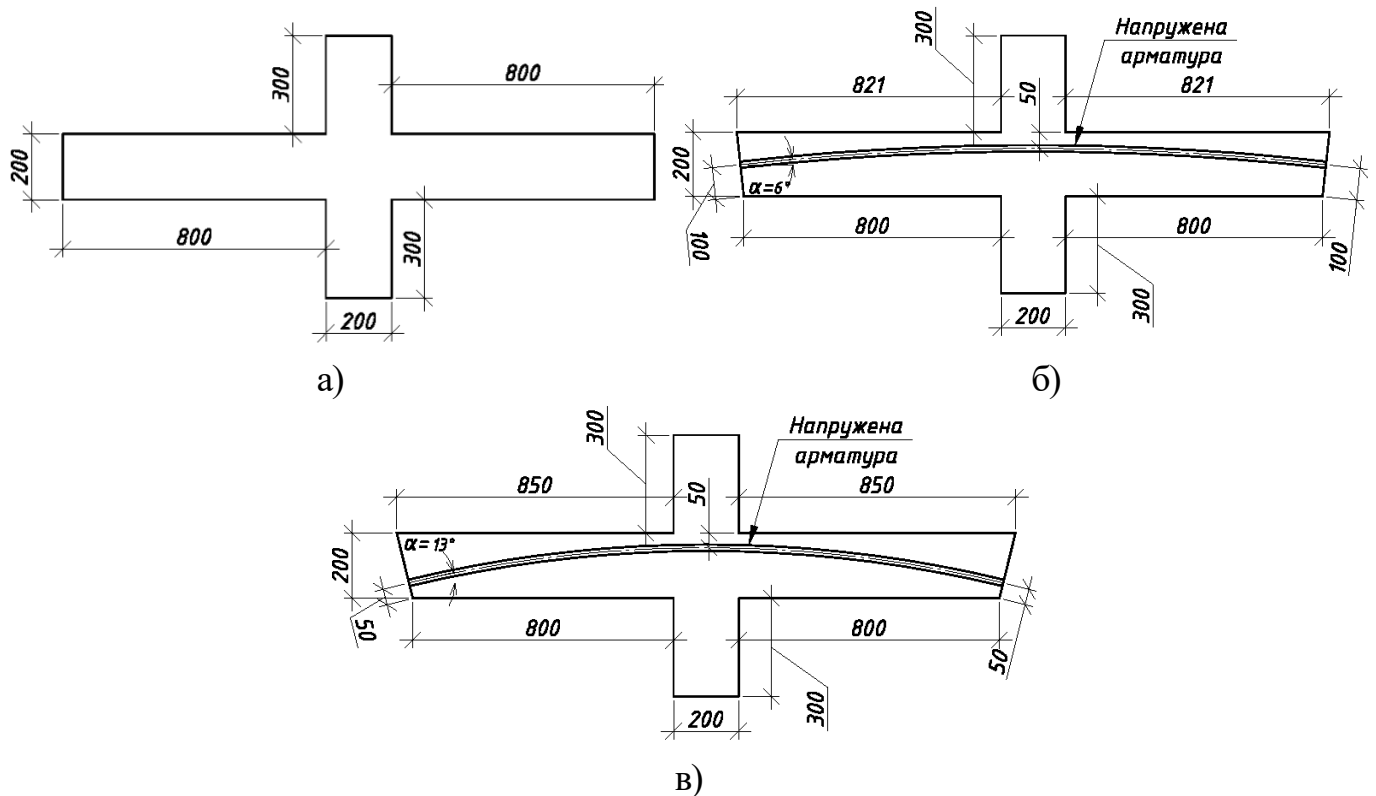


Рис. 1. Геометричні характеристики дослідних зразків (а - КБ-1; б - КБ-2; в - КБ-3)

Основне армування всіх серій зразків – ідентичне (рис.2). Просторовий каркас утворений двома горизонтальними та двома вертикальними плоскими каркасами. Поздовжня верхня (робоча) арматура зразків –  $\text{Ø}20\text{A}400\text{C}$ , конструктивна –  $\text{Ø}6\text{A}240\text{C}$ , поперечна арматура –  $\text{Ø}4\text{Bp}$ -з кроком 150 мм. Всі каркаси – зварні, виготовлені в заводських умовах. В якості напружуваної криволінійної арматури використовувався канат подвійної завивки  $\text{Ø}15$  мм згідно ГОСТ 7668-80. Канат поміщався в пластикову трубу ( $\text{Ø}20$  мм), попередньо забетоновану в зразку. Для забезпечення міцності зон анкерування попередньо-напруженої арматури, додатково (по обидва кінці напружуваної арматури) влаштовані пружні спіралі із арматури  $\text{Ø}4\text{Bp-I}$ .

В процесі експериментальних досліджень вимірювали та фіксували наступні значення:

- деформації бетону нижньої та верхньої грані бетону (в розтягнутій та стисненій зонах);
- зусилля в напружуваній арматурі;
- прогини на краях зразків;
- навантаження появи нормальних і похилих, ширина їх розкриття;
- руйнування зразків.

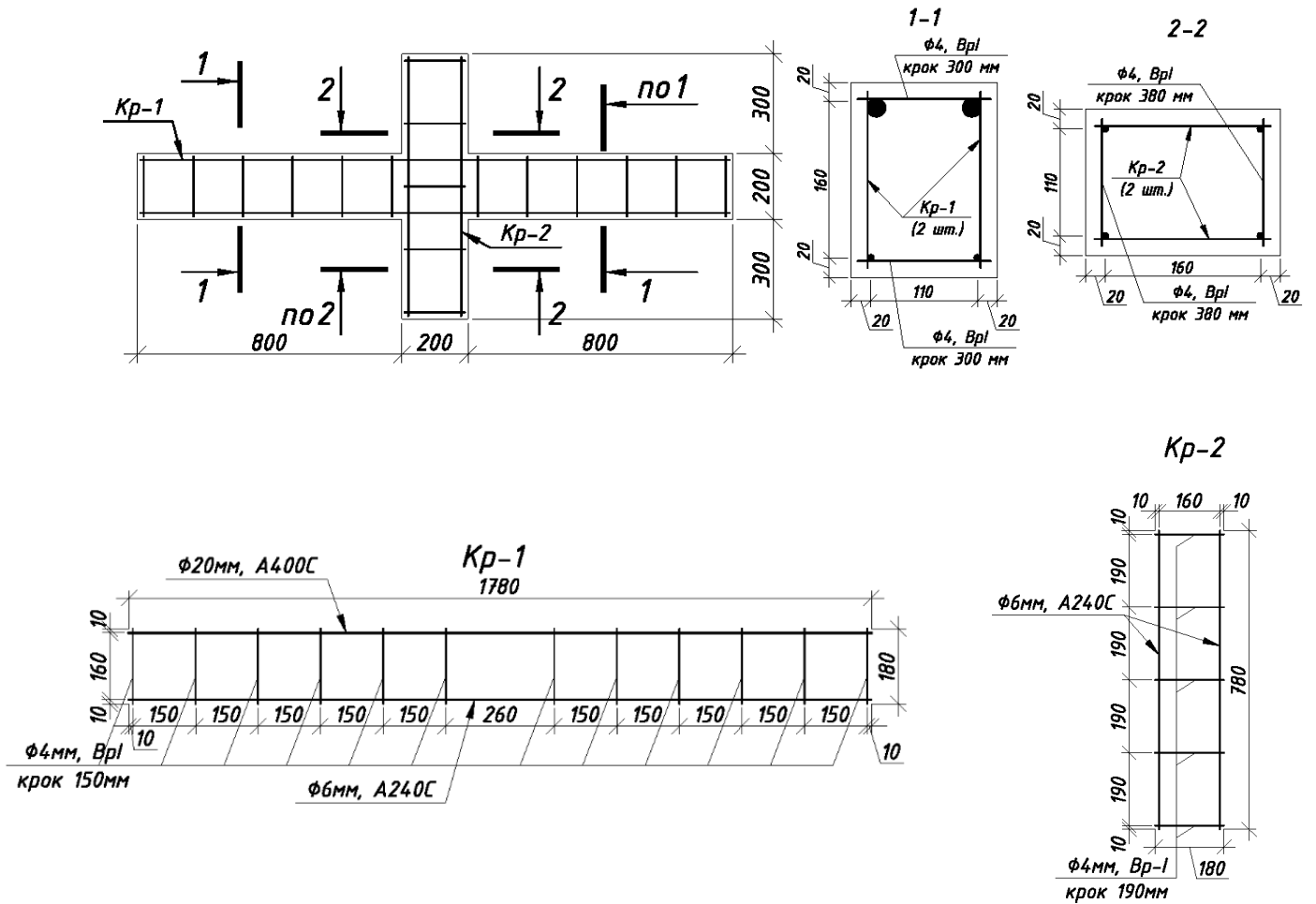


Рис. 2. Основне армування дослідних зразків

Для визначення вищезазначених параметрів на зразки встановлювалося вимірювальне обладнання в необхідних зонах (рис. 3).

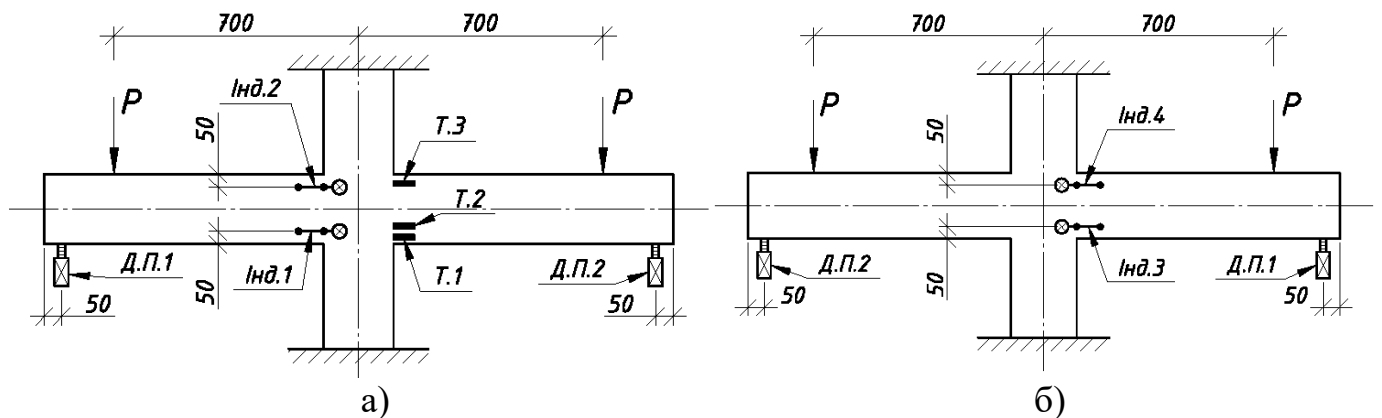


Рис. 3. Схема розміщення вимірюваного обладнання із переднього (а) та заднього (б) боків: 1...4 – індикатори годинникового типу зі шкалою поділки 0,001 мм та базою 50 мм; Т1...Т3 – тензорезистори (базою 50 мм); Д.П.1, 2 – датчики переміщень



Поперечне навантаження здійснювали за допомогою двох гідравлічних домкратів потужністю 50 кН кожен. Зусилля передавали на дві точки зразка через траверси, що закріплені до силової підлоги. Навантаження зразків проводили ступенями з кроком  $P=4$  кН з витримкою по 15 хв для зняття показників із обладнання.

Напруження арматури (в зразках серій КБ-2 та КБ-3) здійснювали за допомогою гідравлічного домкрата потужністю 150 кН.

У *третьому розділі* наведені результати експериментальних досліджень.

В ході виконання експериментів детально досліджувався характер тріщиноутворення та руйнування зразків. На кожному етапі завантаження зразків візуально, а також за допомогою тензодатчиків (та індикаторів), фіксували появу перших тріщин.

Рівень навантаження, при якому фіксували перші тріщини, а також сам характер тріщиноутворення в кожній серії були різними.

Загальні результати тріщиностійкості дослідних зразків наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Серія зразків	Зразок	Зусилля тріщиноутворення $P_{cr}$ , кН		Рівень виникнення похилої тріщини, $P_{cr}/P_u$		Довжина проєкції похилої тріщини $l_k$ , см	
		одного зразка	середнє	одного зразка	середнє	одного зразка	середнє
КБ-1	КБ-1.1	28,10	28,1	0,50	0,50	47,40	48,0
	КБ-1.2	28,40		0,50		48,00	
	КБ-1.3	27,90		0,51		48,60	
КБ-2	КБ-2.1	36,00	36,0	0,53	0,53	30,10	30,0
	КБ-2.2	36,40		0,53		29,50	
	КБ-2.3	35,70		0,53		30,40	
КБ-3	КБ-3.1	40,20	40,2	0,53	0,53	44,70	44,0
	КБ-3.2	40,40		0,53		44,00	
	КБ-3.3	40,00		0,53		43,40	

Таким чином, в ході дослідження тріщиностійкості експериментальних зразків встановлено, що зусилля тріщиноутворення, а також характер розвитку тріщин в зразках трьох серій різний.

Так в зразках серії КБ-1 спостерігалась досить швидка поява критичної тріщини, яка в подальшому розвивалася і призвела до руйнування зразків.

В зразках серії КБ-2 поява похилих тріщин фіксувалася на досить пізніх ступенях навантаження та в подальшому призводила до раптового руйнування зразків.

В зразках серії КБ-3 фіксувалася ціла систем похилих тріщин, що також появлялися на пізніх етапах навантажень, однак критичні тріщини з'являлись раптово та призводили до руйнування.

Графіки середніх значень ширини розкриття тріщин по зразкам серії КБ1, КБ-2 та КБ-3 наведені на рис. 4.

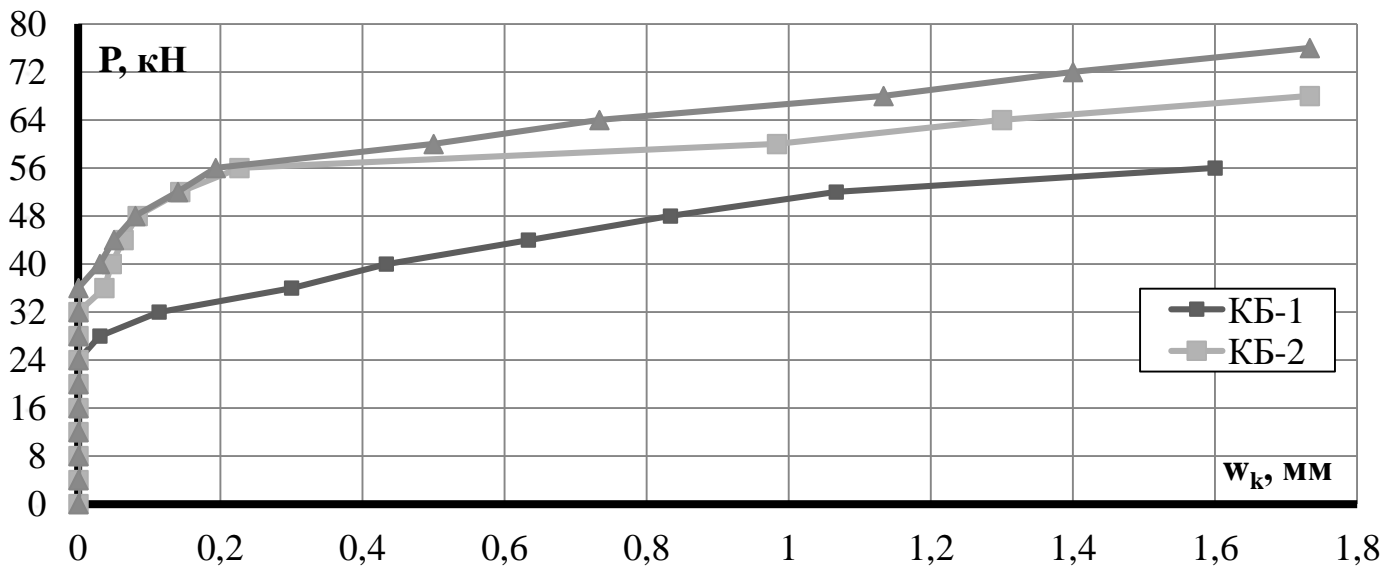


Рис. 4. Графік середніх значень ширини розкриття тріщин дослідних зразків серій КБ-1, КБ-2 та КБ-3

В ході виконання експериментальних випробувань також досліджували деформації бетону зразків. Для визначення відносних деформацій бетону використовувалися тензорезистори з базою 50 мм, а також індикатори годинникового типу зі шкалою поділки 0,001 мм та базою 50.

Для зняття показників з тензодатчиків використовувався прилад СИИТ-3. Принцип роботи цього пристрою ґрунтується на використанні мостової вимірювальної схеми. Отримані вимірювання дали змогу обчислити відносні деформації за формулою:

$$\varepsilon_i = m(N_i - N_0) \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

де:  $N_0$  і  $N_i$  – відповідно покази приладу для незавантаженого зразка та за дії певного ступеня навантаження;  
 $m$  – коефіцієнт тензочутливості.

Для більш детального аналізу, фіксували значення індикаторів та визначали відносні деформації за наступною формулою:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta_i - \Delta_0}{B}, \quad (2)$$

де  $\Delta_0$  і  $\Delta_i$  – відповідно покази індикатора для незавантаженого зразка та за дії певного ступеню навантаження;

$B$  – величина бази виміру індикатора.

Після збору даних показників тензодатчиків та індикаторів виконані розрахунки та отримані графіки відносних деформацій стиснутого та розтягнутого бетону (рис. 5 та рис.6, відповідно) зразків серій КБ-1, КБ-2 та КБ-3.

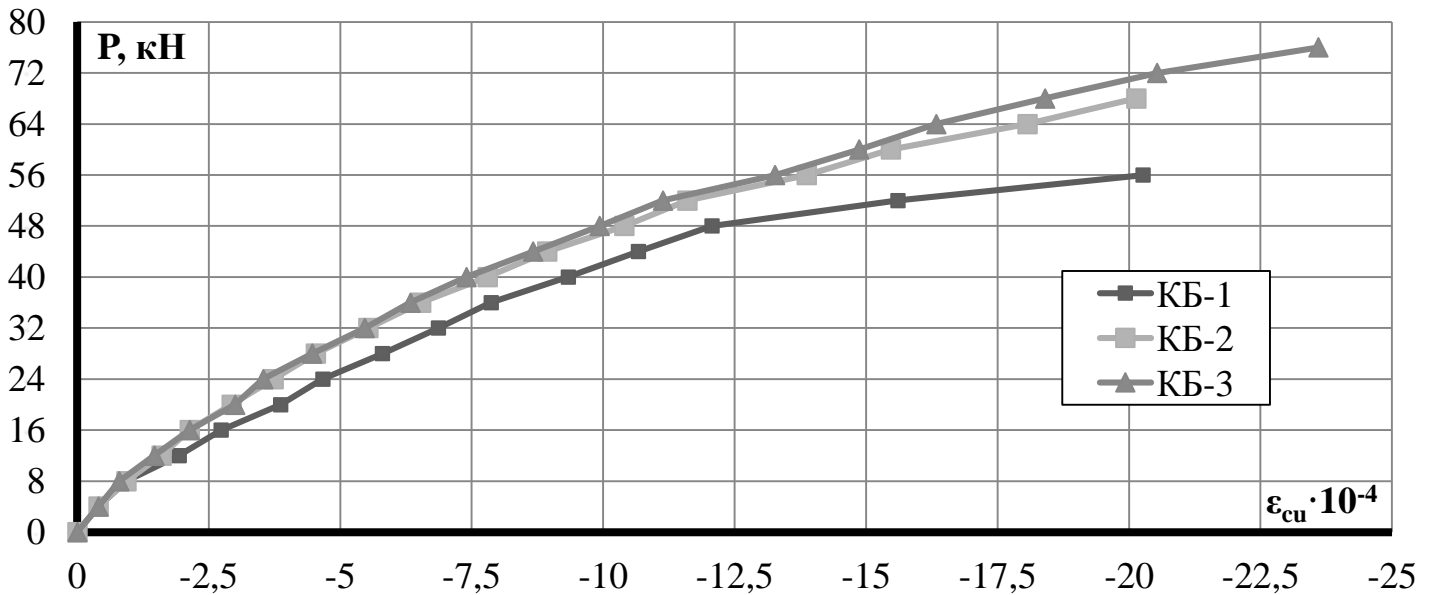


Рис. 5. Графік середніх значень відносних деформацій стиснутої зони бетону дослідних зразків серії КБ-1, КБ-2 та КБ-3

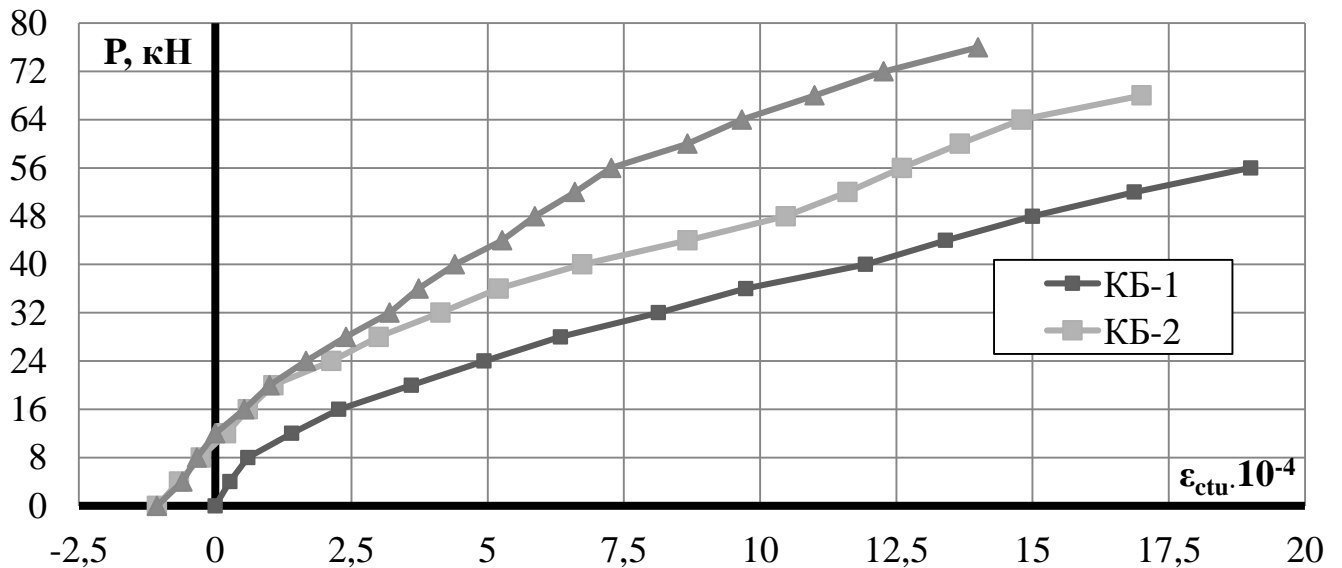


Рис. 6. Графік середніх значень відносних деформацій розтягнутої зони бетону дослідних зразків серії КБ-1, КБ-2 та КБ-3

В ході виконання експериментальних досліджень всі зразки були доведені до руйнування.

Руйнування зразків усіх серій відбувалось за похилими перерізами. Руйнування зразків серій КБ-2 та КБ-3 мало раптовий характер. Розриву поздовжньої, поперечної та напруженої арматури – не спостерігалось. У результаті досліджень було отримано класичну форму руйнування перерізів похилих до поздовжньої осі (зсув). Загальні експериментальні дані руйнівного навантаження дослідних зразків наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Серія зразків	Зразок	Руйнівне зусилля $P_u$ , кН	
		одного зразка	середнє
КБ-1	КБ-1.1	56,10	56,0
	КБ-1.2	57,00	
	КБ-1.3	55,00	
КБ-2	КБ-2.1	68,30	68,1
	КБ-2.2	68,60	
	КБ-2.3	67,50	
КБ-3	КБ-3.1	76,00	76,0
	КБ-3.2	76,70	
	КБ-3.3	75,40	

Ескізи зруйнованих зразків із зазначеними тріщинами та їх проєкціями наведені на рис. 7...9:

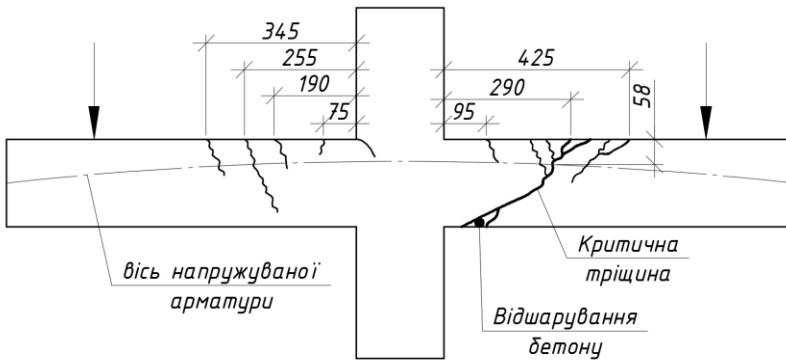


Рис. 7. Ескіз зруйнованого зразка серії КБ-1

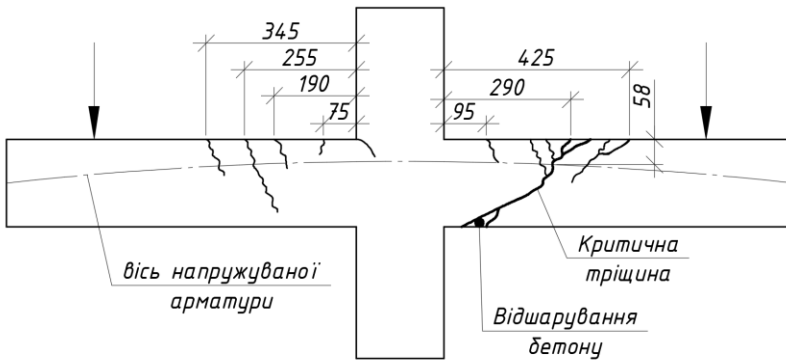


Рис. 8. Ескіз зруйнованого зразка серії КБ-2

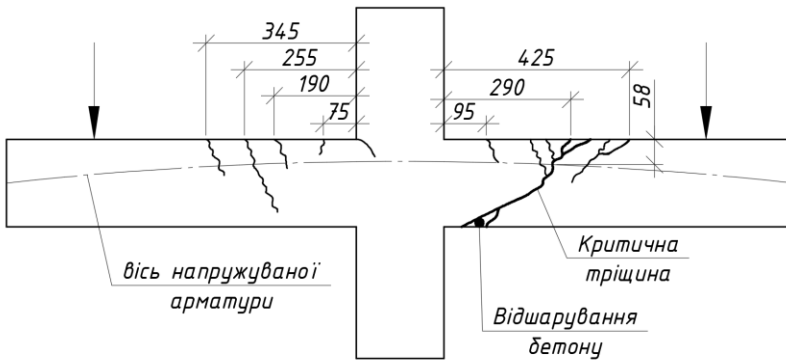


Рис. 9. Ескіз зруйнованого зразка серії КБ-3

Для визначення значень прогинів дослідних зразків, а також для аналізу впливу криволінійної попередньо напруженої арматури на їх деформативність, під час випробувань вимірювали переміщення (прогини) на консолях зразків. Схема із розміщення точок, де визначалися прогини, наведена на рис. 10.

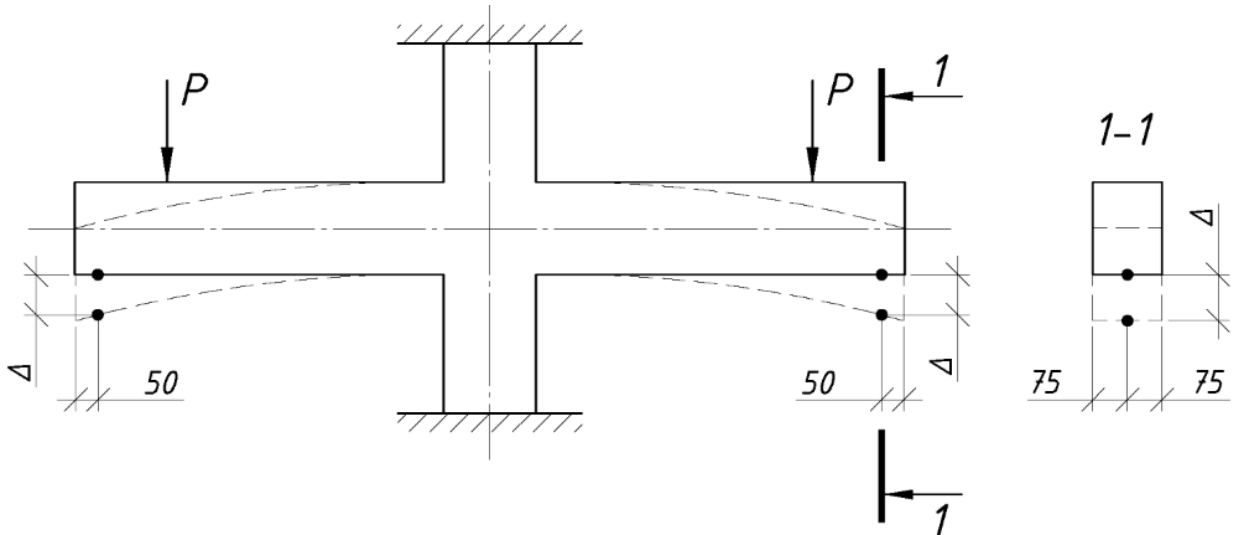


Рис. 10. Схема експериментального визначення переміщень ( $\Delta$ )

Для порівняння середніх значень прогинів всіх трьох серій дослідних зразків, побудований графік залежності переміщень від навантаження (рис. 11).

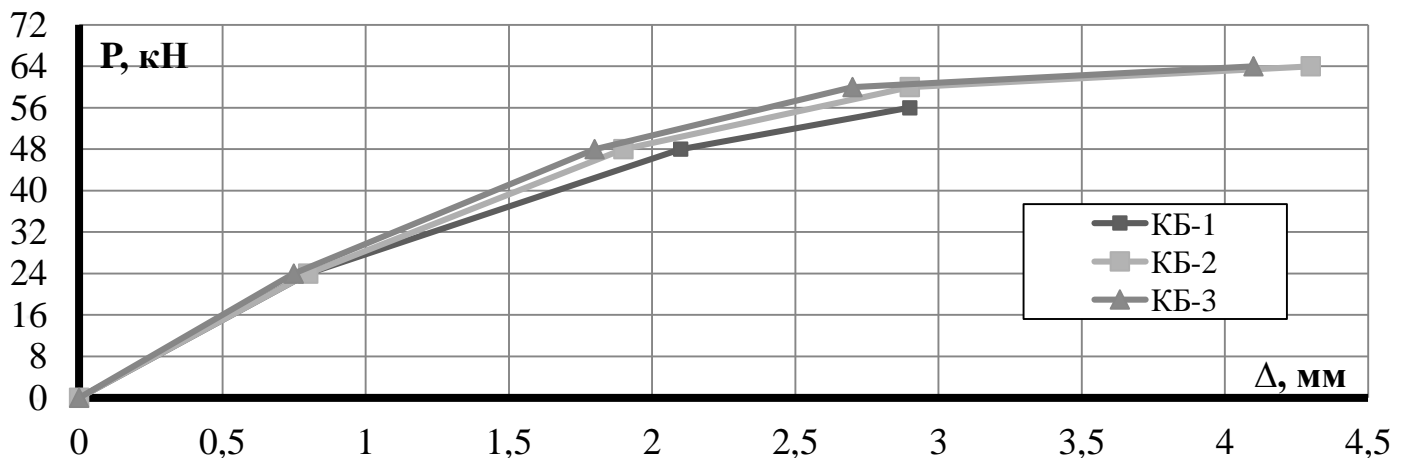


Рис. 11. Графік залежності переміщень від навантаження дослідних зразків серії КБ-1, КБ-2 та КБ-3

Для аналізу напружено-деформованого стану криволінійної напруженої арматури, в зразках серії КБ-2 та КБ-3 фіксувалися значення натягу канатів в ході виконання експериментальних досліджень. Зусилля натягу вимірювали на кожній ступені навантаження, за допомогою датчика тиску рідини, що був підключений безпосередньо до домкрату (рис. 12).

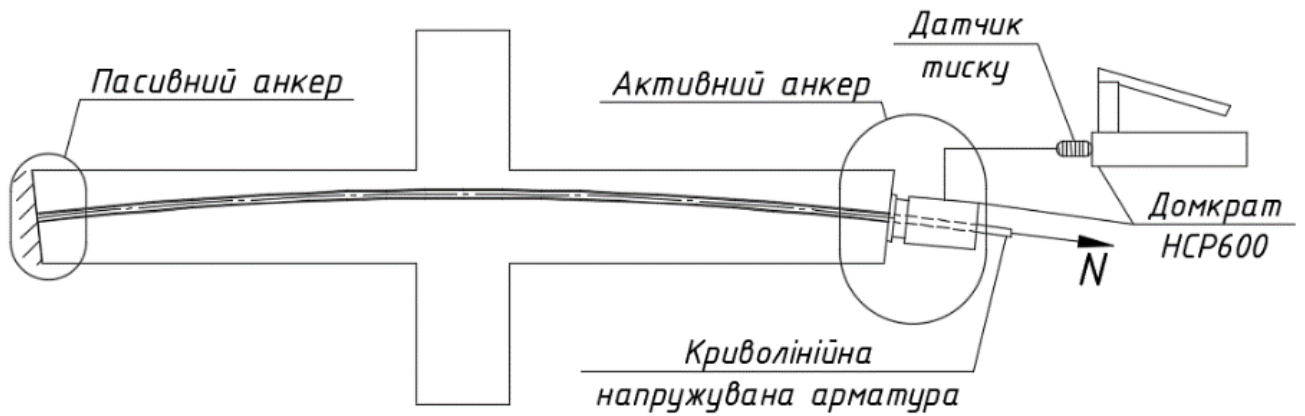


Рис. 12. Схема дослідження напружено-деформованого стану криволінійної напруженої арматури

Для порівняння напружено-деформованого стану криволінійної попередньо напруженої арматури (без зчеплення з бетоном із різним кутом нахилу) зразків серій КБ-2 та КБ-3, побудовано спільний графік середніх значень зусилля натягу напружуваної арматури (рис. 13).

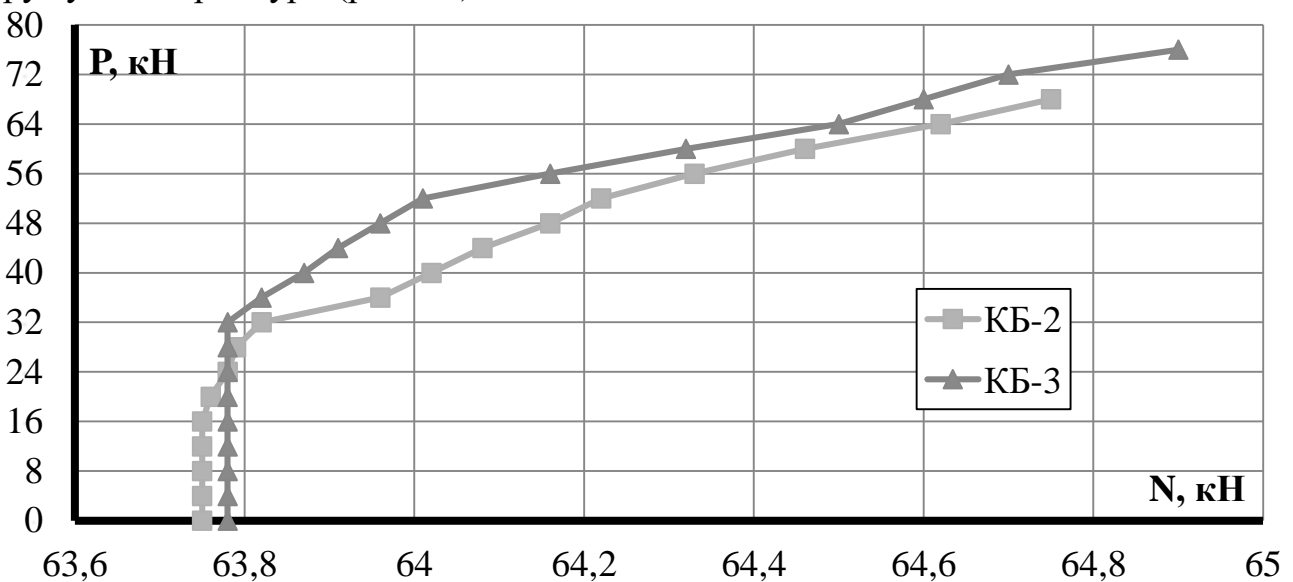


Рис. 13. Графік середніх значень зусилля натягу напружуваної арматури в зразках серій КБ-2 та КБ-3

В *четвертому розділі* запропоновані удосконалені методики розрахунків міцності, тріщиностійкості та ширини розкриття тріщин похилих перерізів з урахуванням криволінійної напруженої арматури, напруженої на бетон.

Для залізобетонних елементів з попередньо-напруженою криволінійною арматурою опір зсуву пропонується визначати за рівнянням:

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{dis} , \quad (3)$$

де:  $V_{Rd,c}$  – опір зсуву, що сприймає бетон;

$V_{Rd,s}$  – опір зсуву, що сприймає поперечна арматура;

$V_{dis}$  – вертикальна розвантажувальна сила від криволінійної попередньо-напруженої арматури (рис. 14).

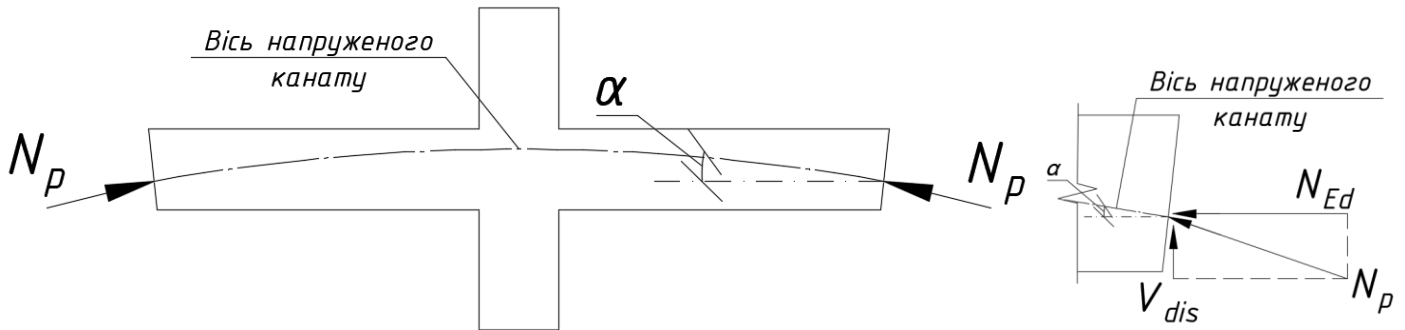


Рис. 14. Схема обтиску зразка попередньо-напруженою арматурою

Значення  $V_{Rd.c}$  та  $V_{Rd.s}$  визначається згідно чинних норм:

$$V_{Rd.c} = [C_{Rd.c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w \cdot d, \quad (4)$$

$$V_{Rd.s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta, \quad (5)$$

Вертикальна розвантажувальна сила  $V_{dis}$ , яка виникає на кінцях елементів в місцях анкерування напруженої арматури. Її значення визначається:

$$V_{dis} = N_p \sin \alpha, \quad (6)$$

де:  $N_p$  – сила обтиску бетону вздовж осі попередньо-напруженої арматури на кінці анкера (рис. 14);  $\alpha$  - кут нахилу попередньо-напруженої арматури до горизонтальної осі елемента (для зразків серії КБ-2  $\alpha=6^\circ$ , а для зразків серії КБ-3  $\alpha=13^\circ$ ).

Порівняння експериментальної та теоретичної несучої здатності приведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Серія	Опір зсуву, що сприймає бетон, $V_{Rd.c}$ , кН	Опір зсуву, що сприймає поперечна арматура, $V_{Rd.s}$ , кН	Розвантажувальна вертикальна сила, $V_{dis}$ , кН	Сумарна несуча здатність за поперечною силою, $V_{Rd}$ , кН	Експериментальна несуча здатність (руйнівна сила) $V_{Ed}$ , кН
КБ-1	35,52	18,48	-	54,00	56,0
КБ-2	42,76	11,20	5,58	59,54	68,1
КБ-3	42,66	9,4	11,11	63,16	76,0

Розрахунок тріщиностійкості рекомендовано виконувати на основі рівняння рівноваги згинаючих моментів зовнішніх сил відносно точки, у якій прикладена рівнодіюча зусилля у бетоні стиснутої зони над похилою тріщиною, із врахуванням розвантажувального моменту від складової напруженої арматури (рис. 15).

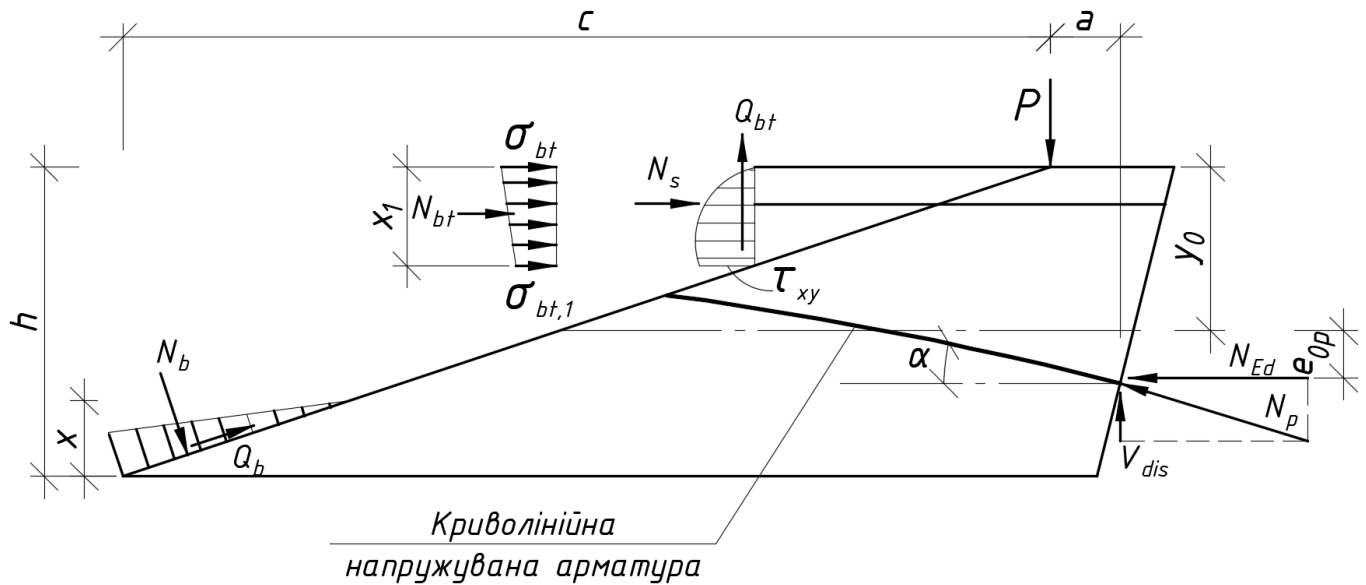


Рис. 15. Розрахункова модель граничного стану на стадії утворення похилих тріщин в елементах із криволінійною напружуваною арматурою без зчеплення з бетоном

$$M_r \leq M_{crc} + M_{rp1} + M_{rp2} \quad (7)$$

де:  $M_{rp1}$  – згинальний момент, що створює зусилля попереднього обтиску

$$M_{rp1} = P(h - y_0 - x/3 - e_{op}), \quad (8)$$

$e_{op}$  – ексцентриситет зусилля попереднього стиску відносно осі, яка проходить через центр ваги зведеного перерізу елемента.

$M_{rp2}$  – згинальний момент, що створює розвантажувальна сила  $V_{dis}$  (див. рис. 15)

$$M_{rp2} = V_{dis}(c + a), \quad (9)$$

Згинальний момент, який сприймає похилий переріз  $M_{crc}$ , у випадку, що розглядається, дорівнює алгебричній сумі моментів  $M_{bt}$ ,  $M_{bc}$  та  $M_s$ , які створюють відповідно зусилля у бетоні розтягнутої, стиснутої зон та поздовжній арматурі (рис. 15).

Відповідно вищезазначеним рекомендаціям, виконані перевірни розрахунки тріщиностійкості дослідних зразків та виконані порівняння із експериментальними даними (див. табл. 4).

Таблиця 4

Серія зразків	Експериментальне значення $P_{crc}^e$ , кН	Теоретичне значення $P_{crc}$ , кН
КБ-1	28,1	26,4
КБ-2	36,0	34,6
КБ-3	40,2	33,8

Згідно ДСТУ ширина тріщин  $w_k$  може визначатись за виразом:

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (10)$$



Значення ( $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ ) рекомендовано визначати за виразом ДСТУ із урахування напруження в поперечній арматурі ( $\sigma_{sw}$ ) та обтиску від криволінійної напруженої арматури ( $\sigma_{cp}$ ):

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_{sw} - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff}) - \sigma_{cp}}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (11)$$

де:  $\sigma_{sw}$  – напруження в поперечній арматурі:

$$\sigma_{sw} = \frac{Q}{A_{sw} d} s; \quad (12)$$

$\sigma_{cp}$  – напруження стиску в бетоні:

$$\sigma_{cp} = \frac{NEd}{A_c} < 0,2 f_{cd}; \quad (13)$$

В таблиці 5 наведено порівняння теоретичних та експериментальних значень ширини розкриття тріщин.

Таблиця 5

Серія зразків	Навантаження Р, кН	Значення ширини розкриття тріщин	
		$w_k$ , мм	
		Експериментальне	Теоретичне
КБ-1	32...36	0,16...0,3	0,2...0,237
КБ-2	52...56	0,24...0,3	0,31...0,36
КБ-3	52...56	0,23...0,29	0,313...0,362

Також для порівняння результатів експериментальних досліджень із теоретичними, виконаний розрахунок дослідних зразків в «ПК ЛІРА-САПР 2018» з урахуванням фізичної нелінійності. Порівняльні графіки напружень та переміщень наведені на рис. 16...21.

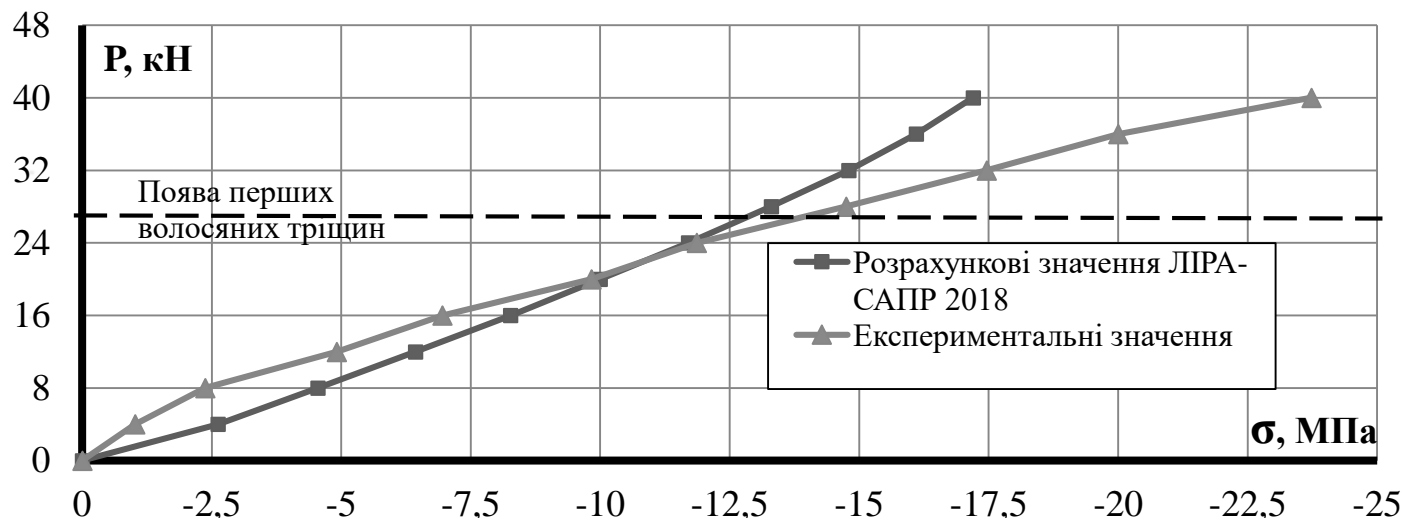


Рис. 16. Графік середніх значень напружень стиснутої зони бетону дослідних зразків серії КБ-1

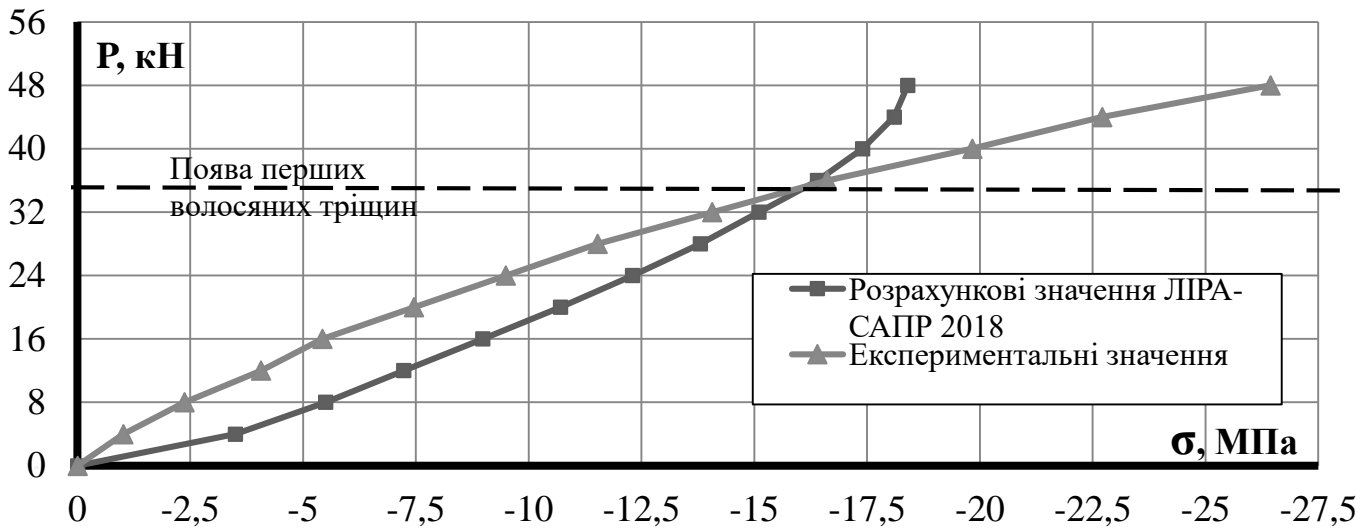


Рис. 17. Графік середніх значень напружень стиснутої зони бетону дослідних зразків серії КБ-2

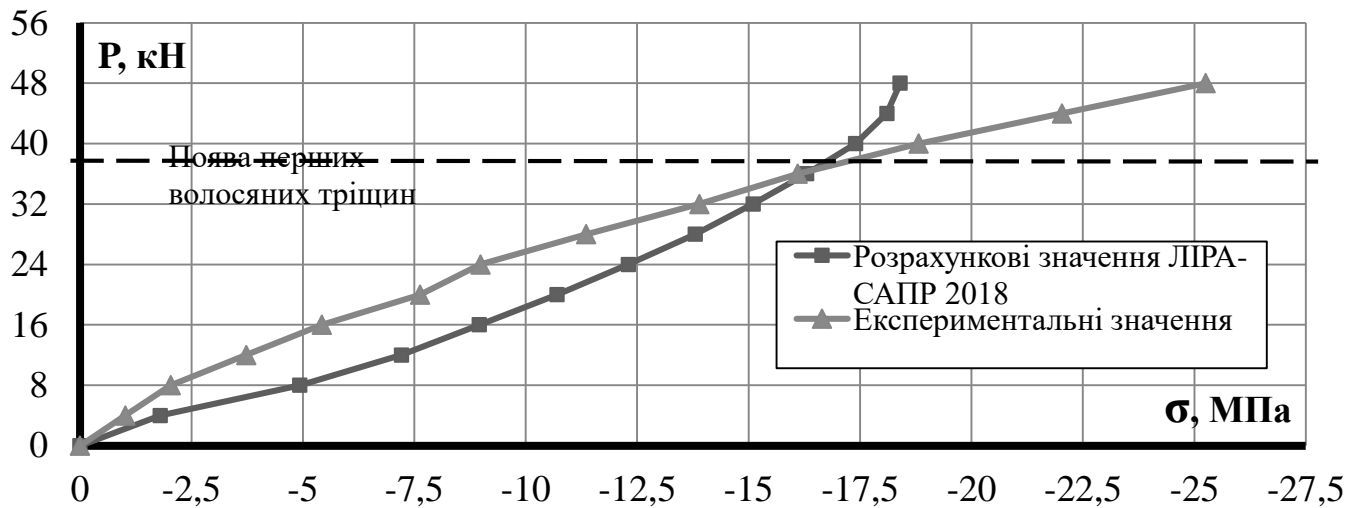


Рис. 18. Графік середніх значень напружень стиснутої зони бетону дослідних зразків серії КБ-3

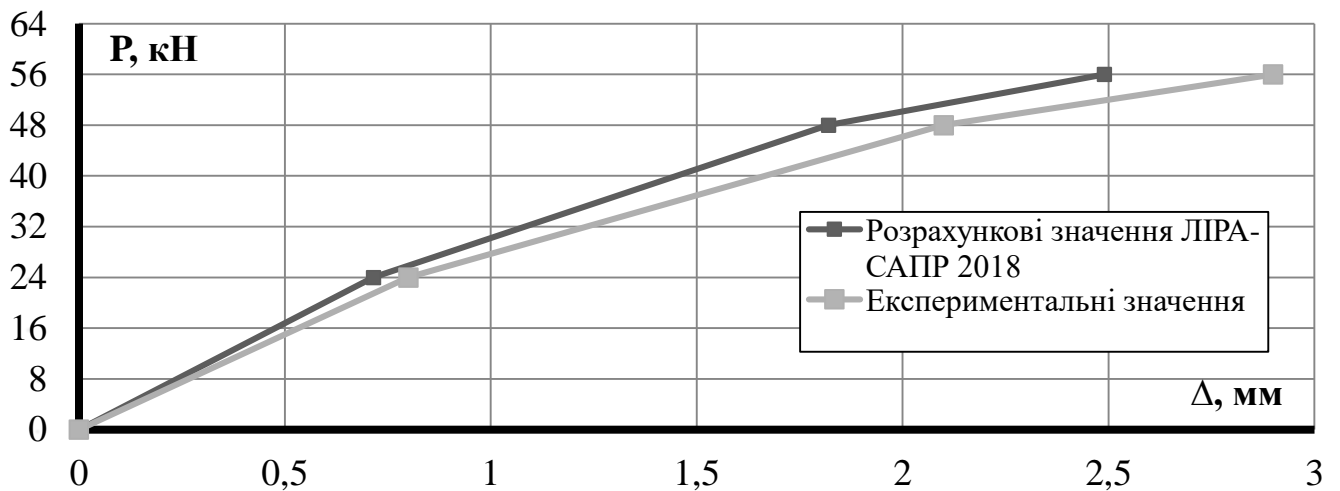


Рис. 19. Графік середніх значень прогинів (переміщень) дослідних зразків серії КБ-1

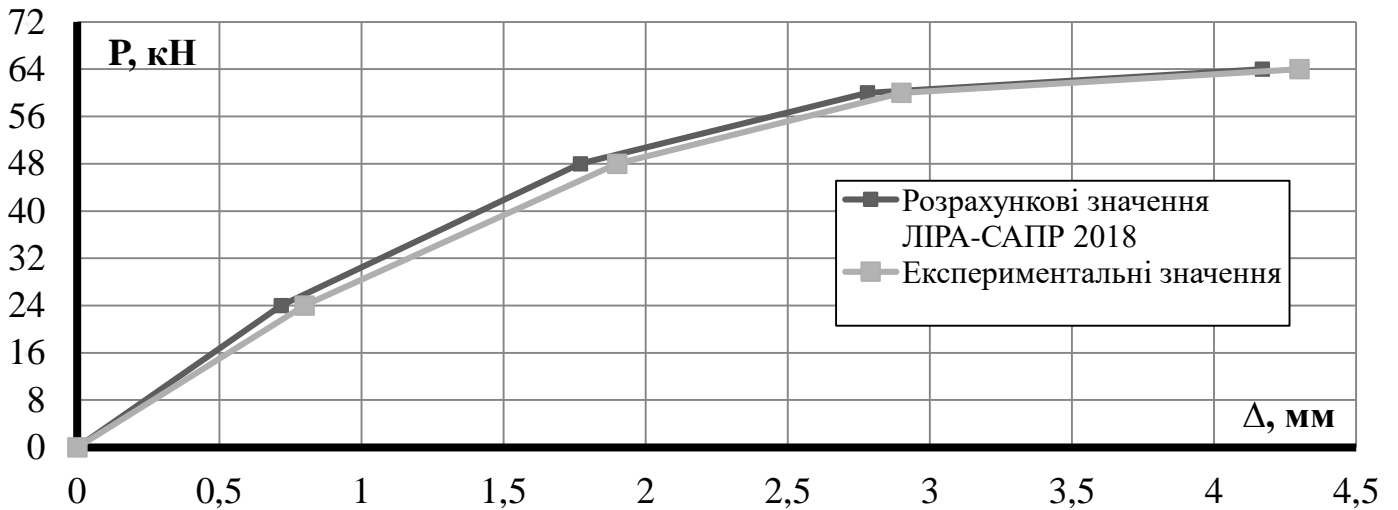


Рис. 20. Графік середніх значень прогинів (переміщень) дослідних зразків серії КБ-2

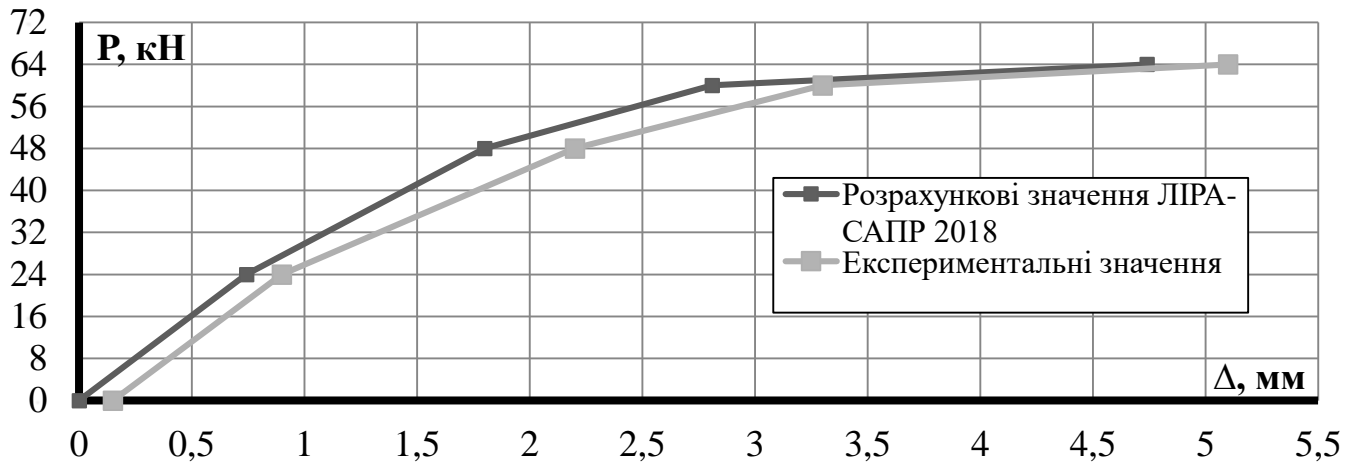


Рис. 21. Графік середніх значень прогинів (переміщень) дослідних зразків серії КБ-3

## ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень можна зробити наступні висновки та рекомендації:

1. Методики розрахунку (згідно чинних норм) міцності та тріщиностійкості похилих перерізів вузлів нерозрізних балок та рам з попередньо напруженою криволінійною арматурою (без зчеплення з бетоном) є не досить досконалими та не враховують окремих факторів, що впливають на міцність перерізів.

2. Для вирішення поставлених задач запроєктовані та виготовлені дослідні зразки, конструкція яких дозволяє аналізувати напружено-деформований стан, процес тріщиноутворення та несучу здатність в залежності від різного кута нахилу попередньо-напруженої арматури з натягом на бетон (без зчеплення з бетоном).

3. Експериментально досліджено, що наявність попередньо-напруженої криволінійної арматури (без зчеплення з бетоном) суттєво впливає на форму

руйнування, характер тріщиноутворення та загальну несучу здатність приопорних ділянок монолітних нерозрізних балок та рам.

4. На основі діючих норм запропоновано вдосконалений метод розрахунку міцності похилих перерізів елементів з попередньо напруженою криволінійною арматурою, що враховує вертикальну розвантажувальну силу від криволінійної попередньо-напруженої арматури  $V_{dis}$ .

5. Запропонована вдосконалена методика розрахунку тріщиностійкості досліджуваних вузлів, що додатково враховує згинальний момент, що створює розвантажувальна сила  $V_{dis}$  від криволінійної попередньо-напруженої арматури.

6. Запропонована методика розрахунку ширини розкриття тріщин згідно діючих норм з урахуванням напруження стиску в бетоні від попередньо-напруженої арматури ( $\sigma_{cp}$ ).

8. Виконаний теоретичний розрахунок дослідних зразків в «ПК ЛПА-САПР 2018» з урахуванням фізичної нелінійності. Результати розрахунку дали достатньо добру збіжність з експериментальними даними. Проте після появи тріщин «ПК ЛПА-САПР 2018» дає дуже занижені значення напружень в бетоні стиснутої зони та в напруженій арматурі.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Козак О.В. Порівняльний аналіз розрахунку перерізів згинальних елементів за поперечною силою // Теорія і практика будівництва, №11, 2013 р.

2. Корнієнко М.В., Мурашко Л.А., Диптан Т.В., Козак О.В. Проектування центрально завантажених фундаментів під окремі колони за сучасними нормами // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). Вип. 3(38). Т2. - 2013.-ПолтНТУ.

3. Мурашко Л.А., Журавський О.Д., Козак О.В. Експериментальні дослідження впливу криволінійної арматури без зчеплення з бетоном на несучу здатність похилих перерізів при натязі на бетон // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Вип. 28. - Рівне, 2014, С. 267-275.

4. Козак О.В., Журавський О.Д. Експериментально-теоретичні дослідження приопорних ділянок монолітних залізобетонних балок з криволінійною попередньо-напруженою арматурою // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. –К., КНУБА, -Вип. 61., 2016, С. 392-401.

5. Козак О.В., Журавський О.Д. Міцність і тріщиностійкість приопорних ділянок залізобетонних балок з криволінійною попередньо-напруженою арматурою // Будівельні конструкції. Теорія і практика: Збірник наукових праць. –К., КНУБА, -Вип. 1., 2017, С. 187-192.

6. O. Kozak, O. Zhuravskyi. Experimental research of the influence of curved reinforcement steel without adhesion to the concrete on the bearing capacity of inclined sections at post-tensioning // USEFUL online journal, vol. 2, no. 2, pp. 34–41, Jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.32557/useful-2-2-2018-0004>.

7. O.Kozak, O.Zhuravskyi, M.Delyavskyy. Effect of the pre-stressed reinforcement curvature on the bearing capacity of inclined sections of monolithic beams // AIP Conference Proceedings 2077, 020027 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5091888> Published Online: 21 February 2019.

## АНОТАЦІЯ

**Козак О.В. Напружено-деформований стан, міцність та тріщиностійкість вузлів монолітних рам та нерозрізних балок з арматурою напруженою на бетон.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.23.01 «будівельні конструкції, будівлі та споруди». – Київський національний університет будівництва і архітектури; Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2019.

Дисертація присвячена дослідженню напружено-деформованого стану, міцності та тріщиностійкості вузлів монолітних рам та нерозрізних балок з криволінійною арматурою, напруженою на бетон.

В даній роботі виконаний огляд літератури та проаналізовано методики розрахунків вузлів монолітних рам та нерозрізних балок з попередньо-напруженою арматурою (без зчеплення з бетоном).

Для визначення впливу криволінійної напруженої арматури на міцність (тріщиностійкість) вузлів нерозрізних балок та рам були запроєктовані та виготовлені дослідні зразки, конструкція яких дозволила аналізувати напружено-деформований стан, процес тріщиноутворення та несучу здатність в залежності від різного кута нахилу попередньо напруженої арматури з натягом на бетон (без зчеплення з бетоном).

Після обробки отриманих результатів експериментальних досліджень, на основі діючих нормативних документів, запропоновано вдосконалений метод розрахунку міцності похилих перерізів елементів з попередньо напруженою криволінійною арматурою, що враховує вертикальну розвантажувальну силу від криволінійної попередньо-напруженої арматури  $V_{dis}$ . Також представлена вдосконалена методика розрахунку тріщиностійкості похилих перерізів, яка додатково враховує згинальний момент, що створює розвантажувальна сила  $V_{dis}$ , від криволінійної попередньо-напруженої арматури. Запропонована методика розрахунку ширини розкриття тріщин на основі діючих норм з урахуванням напруження стиску в бетоні від попередньо-напруженої арматури ( $\sigma_{cp}$ ). Запропоновані методи розрахунків дозволяють більш точно врахувати напружено-деформований стан вузлів монолітних нерозрізних балок та рам з попередньо-напруженою криволінійною арматурою (без зчеплення з бетоном), а їх результати є більш наближеними до реальної роботи конструкції.

Виконаний теоретичний розрахунок дослідних зразків в «ПК ЛІРА-САПР 2018» з урахуванням фізичної нелінійності, результати якого дали достатньо добру збіжність з експериментальними даними.

*Ключові слова:* похилі перерізи, несуча здатність, тріщиностійкість, ширина розкриття тріщин, попередньо-напружена арматура, криволінійна попередньо-напружена арматура, натяг на бетон, без зчеплення з бетоном, нерозрізні балки, монолітні рами.

## ABSTRACT

**Kozak O.V. Stress-strain state, strength and crack resistance of nodes of monolithic frames and continuous beams with reinforcement stressed on concrete.** – Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) in specialty 05.23.01 "Building Structures, Buildings and Structures". – Kyiv National University of Construction and Architecture; Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the study of the stress-strain state, strength and crack resistance of nodes of monolithic frames and continuous beams with curved reinforcement steel, stressed on concrete.

This paper reviews the literature and analyzes the methods of calculating the nodes of monolithic frames and continuous beams with pre-stressed reinforcement (without adhesion to concrete). On the basis of the conducted analysis it is established that the methods of calculation (according to current norms) of strength and crack resistance of inclined sections of nodes of continuous beams and frames with pre-stressed curved reinforcement steel (without adhesion with concrete) are not sufficiently perfect and do not take into account the individual faults.

To determine the effect of pre-stressed curved reinforcement steel on the strength (crack resistance) of nodes of continuous beams and frames, prototypes were designed and constructed, which allowed to analyze the stress-deformed state, the process of cracking and bearing capacity, depending on the different tilt angle of the pre-stressed reinforcement (without adhesion to concrete). The developed test procedure of the test specimens made it possible to obtain the necessary strength and deformation characteristics.

According to the results of experimental studies, the presence of pre-stressed curved reinforcement steel (without adhesion to concrete) significantly affects the shape of fracture, the nature of cracks and the overall bearing capacity of the supporting sections of monolithic continuous beams and frames.

After processing the results of the experimental studies, based on the current normative documents, an improved method of calculating the strength of the inclined sections of the elements with pre-stressed curved reinforcement steel is proposed, taking into account the vertical unloading force from the pre-stressed reinforcement  $V_{dis}$ . Also presented is an advanced technique for calculating the fracture toughness of inclined sections, which additionally takes into account the bending moment, which creates the unloading force  $V_{dis}$ , from pre-stressed curved reinforcement steel. A method for calculating the crack opening width based on the current norms is proposed, taking into account the compressive stress in

concrete from pre-stressed reinforcement ( $\sigma_{cp}$ ). The proposed calculation methods allow to take more accurate account of the stress-strain state of the nodes of monolithic continuous beams and frames with pre-stressed curved reinforcement steel (without adhesion with concrete), and their results are closer to the real work of the structure.

The theoretical calculation of the prototypes in the "LIRA PC" was performed, taking into account the physical nonlinearity, the results of which gave a fairly good convergence with the experimental data.

In general, experimental and theoretical studies have confirmed the effectiveness of the use of pre-stressed curved reinforcement steel (without adhesion to concrete) at the nodes of monolithic continuous beams and frames. The use of pre-stressed curved reinforcement steel allows to increase the bearing capacity and the crack resistance of the inclined sections of the support units.

*Key words:* inclined sections, bearing capacity, crack resistance, crack opening width, pre-stressed reinforcement, pre-stressed curved reinforcement steel, post-tensioning, without adhesion to concrete, continuous beam, monolithic frames.

## АННОТАЦИЯ

**Козак А.В. Напряженно-деформированное состояние, прочность и трещиностойкость узлов монолитных рам и неразрезных балок с арматурой, напряженной на бетон.** - Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.23.01 «строительные конструкции, здания и сооружения». - Киевский национальный университет строительства и архитектуры; Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, 2019.

Диссертация посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния, прочности и трещиностойкости узлов монолитных рам и неразрезных балок с криволинейной арматурой, напряженной на бетон.

В данной работе выполнен обзор литературы и проанализированы методики расчетов узлов монолитных рам и неразрезных балок с предварительно напряженной арматурой (без сцепления с бетоном). На основе проведенного анализа установлено, что методики расчета (согласно действующих норм) прочности и трещиностойкости наклонных сечений узлов неразрезных балок и рам с предварительно напряженной криволинейной арматурой (без сцепления с бетоном) не достаточно совершенными и не учитывают отдельных факторов, влияющих на прочность сечений.

Для определения влияния криволинейной напряженной арматуры на прочность (трещиностойкость) узлов неразрезных балок и рам были запроектированы и изготовлены опытные образцы, конструкция которых позволила анализировать напряженно-деформированное состояние, процесс трещинообразования и несущую способность в зависимости от различного угла наклона предварительно напряженной арматуры с натяжением на бетон (без сцепления с бетоном), а разработанная методика

испытаний опытных образцов позволила получить необходимые прочностные и деформативные характеристики.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что наличие предварительно напряженной криволинейной арматуры (без сцепления с бетоном) существенно влияет на форму разрушения, характер трещинообразования и общую несущую способность приопорных участков монолитных неразрезных балок и рам.

После обработки полученных результатов экспериментальных исследований, на основе действующих нормативных документов, предложено усовершенствованный метод расчета прочности наклонных сечений элементов с предварительно напряженной криволинейной арматурой, учитывающий вертикальную разгрузочную силу от криволинейной предварительно напряженной арматуры  $V_{dis}$ . Также представлена усовершенствованная методика расчета трещиностойкости наклонных сечений, которая дополнительно учитывает изгибающий момент, создает разгрузочная сила  $V_{dis}$ , от криволинейной предварительно напряженной арматуры. Предложенная методика расчета ширины раскрытия трещин на основе действующих норм с учетом напряжения сжатия в бетоне от предварительно напряженной арматуры ( $\sigma_{cp}$ ). Предложенные методы расчетов позволяют более точно учесть напряженно-деформированное состояние узлов монолитных неразрезных балок и рам с предварительно напряженной криволинейной арматурой (без сцепления с бетоном), а их результаты более приближенными к реальной работе конструкции.

Выполнен теоретический расчет опытных образцов в «ПК ЛИРА-САПР 2018» с учетом физической нелинейности, результаты которого дали достаточно хорошую сходимость с экспериментальными данными.

В общем, выполнены экспериментально-теоретические исследования подтвердили эффективность использования криволинейной напрягаемой арматуры (без сцепления с бетоном) в узлах монолитных неразрезных балок и рам. Использование криволинейной предварительно напряженной арматуры позволяет увеличить несущую способность и трещиностойкость наклонных сечений опорных узлов.

*Ключевые слова:* наклонные сечения, несущая способность, трещиностойкость, ширина раскрытия трещин, предварительно напряженная арматура, криволинейная предварительно напряженная арматура, натяжение на бетон без сцепления с бетоном, неразрезные балки, монолитные рамы.