

УДК 624.012.26 [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11\(21\)-11](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-11)

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ
ВУЗЛІВ МОНОЛІТНИХ РАМ І НЕРОЗРІЗНИХ БАЛОК ІЗ
КРИВОЛІНІЙНОЮ АРМАТУРОЮ, НАПРУЖЕНОЮ НА БЕТОН**

**EXPERIMENTAL STUDIES OF CRACK RESISTANCE OF UNIT SOF
MONOLITHIC FRAMES AND CONTINUOUS BEAMS WITH CURVED
REINFORCEMENT STRESSED ON CONCRETE**

**Козак О.В., к.т.н., доц., Андрусyak А.В., к.т.н., доц., Артym В.І.,
д.т.н., проф., Палійчук І.І., к.т.н., доц. (Івано-Франківський
національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ)**

**Kozak O.V., Ph.D., Associate Professor, Andrusyak A.V., Ph.D.,
Associate Professor, Artym V.I., Doctor of Engineering, Professor, Paliichuk
I.I., Ph.D., Associate Professor (Ivano-Frankivsk National Technical
University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk)**

Розрахунок міцності залізобетонних елементів за дії поперечних сил є важливою задачею, так як руйнування конструкції від цих сил може бути крихким, що є дуже небезпечно. Окрім міцності, важливими вимогами для залізобетонних конструкцій є забезпечення довговічності (корозійної стійкості), виконання функціонального призначення (недопущення надмірного розкриття тріщин) та дотримання естетичних вимог. Вплив попередньо напруженої криволінійної арматури (з натягом на бетон) на тріщиностійкість вузлів монолітних рам та нерозрізних балок є мало дослідженим і потребує додаткового вивчення із проведенням експериментальних досліджень.

The purpose of the experiment is to study and compare the stress-deformation state of the nodes of monolithic continuous beams without prestressing reinforcement and with curvilinear tension reinforcement (with different angles of inclination) under short-term loading, loaded by two concentrated forces equidistant from the support.

The design of the samples allows for analyzing the stress-strain state, the process of crack formation, and the load-bearing capacity depending on the different angles of inclination of the prestressed reinforcement with tension on the concrete (without adhesion to the concrete).

In the course of the experiments, the nature of cracking and destruction of the samples was investigated in detail. At each stage of loading the samples, the appearance of the first cracks was recorded visually, as well as with the help of strain gauges (and indicators).

During the study of the crack resistance of the experimental samples, it was established that the force of crack formation, as well as the nature of the development of cracks in all series of samples, is different.

Thus, in samples without prestressed reinforcement, a rather rapid appearance of a critical crack was observed, which subsequently developed and led to the destruction of the samples.

In the samples with curved tension reinforcement, with the angle of inclination of the reinforcement $\alpha=6^\circ$, the appearance of the slope of the crack was recorded at fairly late stages of loading and subsequently led to the sudden destruction of the samples.

In the samples with curved tension reinforcement, with the angle of inclination of the reinforcement $\alpha=13^\circ$, a whole system of inclined cracks was recorded, which also appeared at the late stages of loading, but critical cracks appeared suddenly and led to destruction.

According to the results of experimental studies, a comparative analysis of the average values of crack opening widths for samples without prestressed reinforcement and samples with curvilinear stressed reinforcement (with different angles of inclination) was obtained

Ключові слова: похилі перерізи, тріщиностійкість, ширина розкриття тріщин, попередньо-напружена арматура, криволінійна попередньо-напружена арматура, натяг на бетон.

Keywords: inclined sections, crack resistance, crack opening width, pre-stressed reinforcement, curved-stressed reinforcement, tension on concrete.

Напружено-деформований стан похилих перерізів з напруженням на бетон залишається мало вивченим. Підтвердженням цього є відсутність єдиної методики розрахунку, яка б урахувала всі фактори, що впливають на роботу перерізів залізобетонних елементів при одночасній дії згинального моменту, поперечної та поздовжньої сил. Найбільш невивченим фактором є напружена арматура (як з, так і без зчеплення з бетоном), вплив якої на міцність похилих перерізів у різних нормативних документах трактується по-різному [1,2].

Для дослідження тріщиностійкості (характеру руйнування) із подальшим удосконаленням методики розрахунку тріщиностійкості похилих перерізів проведені випробування проміжних вузлів монолітних залізобетонних нерозрізних балок. Основна мета експериментальних досліджень – визначення впливу попередньо напруженої криволінійної арматури (з натягом на бетон та без зчеплення з бетоном) на тріщиностійкість та характер руйнування похилих перерізів монолітних вузлів нерозрізних балок (рам) при короткочасному поперечному навантаженні.

Для проведення експерименту та визначення основних показників були запроєктовані та виготовлені монолітні проміжні вузли нерозрізної балки, що відповідає типовим проектним рішенням монолітної каркасної будівлі. Виготовлені три серії зразків із різним розміщенням попередньо напруженої арматури[3,4]:

- 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 $\alpha=13^\circ$).

Геометричні параметри зразків із розміщенням напруженої арматури зображені на рис. 1.

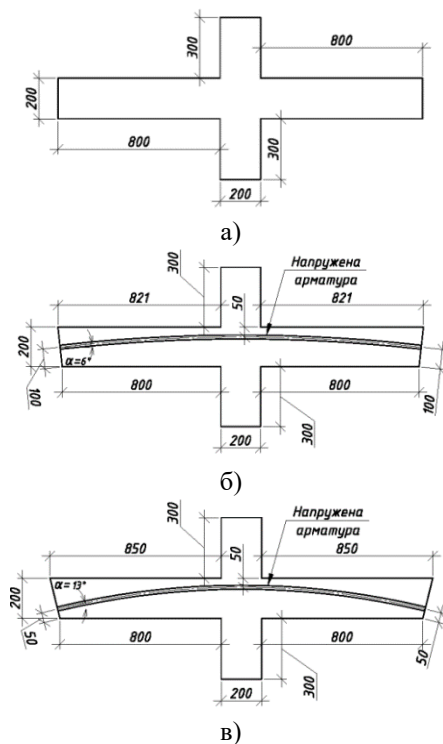


Рисунок 1 – Геометричні характеристики дослідних зразків:
а) серія КБ-1; б) серія КБ-2; в) серія КБ-3

У процесі експериментальних досліджень вимірювали та фіксували такі значення:

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

Для визначення вищезазначених параметрів на зразки встановлювалося вимірювальне обладнання у необхідних зонах (рис. 2).

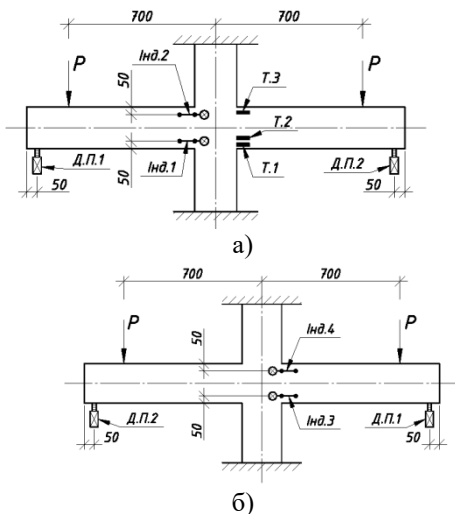


Рисунок 2 – Схема розміщення вимірюваного обладнання із переднього (а) та заднього (б) боків:

Інд. 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

Деформації бетону визначали за допомогою тензодатчиків з базою 50 мм та за допомогою індикаторів годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм.

Контроль значення навантаження на зразок та зусилля в напружуваній арматурі здійснювався за допомогою датчиків тиску рідини ADZ-SML 10.0.

Прогини по краях зразків визначалися потенціометричними датчиками переміщення CLP13-25.

Вимірювальне обладнання (окрім індикаторів та тензорезисторів) було підключено до автоматичної реєструючої апаратури із програмним забезпеченням. Загальний принцип реєструючої апаратури полягає в тому, що аналоговий сигнал від обладнання (датчиків тиску рідини та датчиків переміщення) через аналогово-цифровий передавач (АЦП) надходить до електронно-обчислювальної машини (ЕОМ), де за допомогою програмного забезпечення виводяться цифрові значення показників обладнання.

Дослідження напружено-деформованого стану бетону проводилося згідно тензометричного методу, що є найбільш розповсюдженим для вимірювання деформацій. Рівень сигналів тензорезисторів реєструвався за допомогою вимірювальної тензометричної системи типу СИИТ- 3.

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 у кожній серії були різними. Загальні результати тріщиностійкості дослідних зразків наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Загальні результати випробувань зразків на тріщиностійкість

Серія	Зразок	Зусилля утв. тріщ. P_{cr} , кН		Рівень виникнення пох. тріщ., P_{cr}/P_u		Довжина проекції пох. тріщ. l_k , см	
		зразка	сер-не	зразка	сер-не	зразка	сер-не
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	

За результатами експериментальних випробувань, при ідентичних умовах навантажень, руйнування всіх серій зразків відбувалося по похилій тріщині. В результаті досліджень отримано класичну форму руйнування перерізів, похилих до поздовжньої осі (зеув).

Середнє значення несучої здатності зразків серії КБ-1 (без попередньо напруженої арматури) становить 56 кН. Середнє значення зусилля тріщиноутворення – 28,1 кН. Руйнування відбувалося по похилій тріщині із проекцією на горизонтальну вісь 480 мм. Загальний вигляд тріщиноутворення зразків серії КБ-1 (перед руйнуванням) наведений на рис. 3.

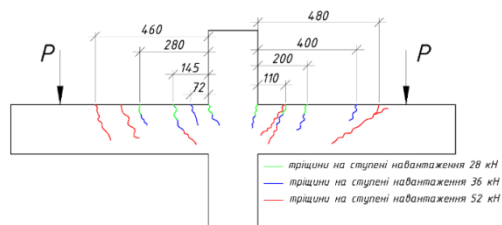


Рисунок 3 – Загальний вигляд тріщиноутворення зразків серії КБ-1

Середнє значення несучої здатності зразків серії КБ-2 (із попередньо напруженою криволінійною арматурою середнього кута нахилу) – 68,1 кН (у 1,22 рази більше, ніж зразків серії КБ-1). Середнє значення зусилля тріщиноутворення – 36,0 кН (у 1,28 рази більше, ніж КБ-1). Руйнування відбувалося по похилій тріщині із проекцією на горизонтальну вісь 300 мм. Загальний вигляд тріщиноутворення зразків серії КБ-2 (перед руйнуванням) наведений на рис. 4.

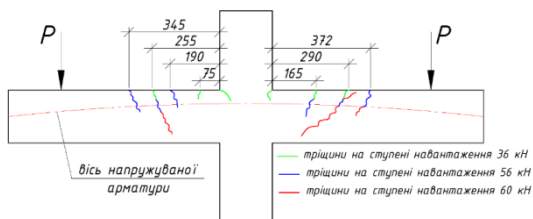


Рисунок 4 – Загальний вигляд тріщиноутворення зразків серії КБ-2

Середнє значення несучої здатності зразків серії КБ-3 (із попередньо напруженою криволінійною арматурою максимального кута нахилу) становить 76,0 кН (у 1,36 рази більше, ніж КБ-1 та в 1,12 рази більше, ніж КБ-2). Середнє значення зусилля тріщиноутворення – 40,2 кН (у 1,43 рази більше, ніж КБ-1 та в 1,12 рази більше, ніж КБ-2). Руйнування відбувалося по похилій тріщині із проекцію на горизонтальну вісь 440 мм. Загальний вигляд тріщиноутворення зразків серії КБ32 (перед руйнуванням) наведений на рис. 5.

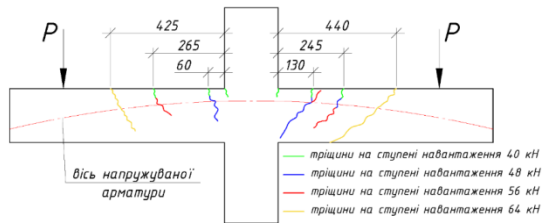


Рисунок 5 – Загальний вигляд тріщиноутворення зразків серії КБ-3

Таким чином, у ході дослідження тріщиностійкості експериментальних зразків встановлено, що зусилля тріщиноутворення, а також характер розвитку тріщин в усіх серіях зразків різний.

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

У зразках серії КБ-2 поява похилих тріщини фіксувалася на досить пізніх ступенях навантаження і в подальшому призводила до раптового руйнування зразків.

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

Графіки середніх значень ширини розкриття тріщин за зразками серії КБ1, КБ-2 та КБ-3 наведені на рис. 6.

Висновки

1. Отримані результати експериментальних досліджень дозволили встановити схеми руйнування опорних зон нерозрізних балок.

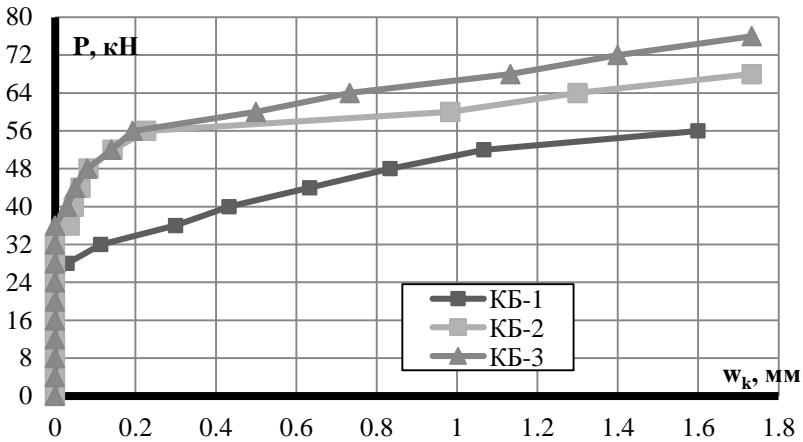


Рисунок 6 – Графік середніх значень ширини розкриття тріщин дослідних зразків серій КБ-1, КБ-2 та КБ-3

2. Наявність попередньо напруженої криволінійної арматури суттєво впливає на форму руйнування, характер тріщиноутворення та загальну несучу здатність дослідних зразків.
3. Руйнування зразків серії КБ-1 відбувалося по похилій тріщині, поява якої фіксувалася практично перед самим руйнуванням зразка, що розвивалася від опори до місця прикладення навантаження.
4. Руйнування зразків серії КБ-2, як і в зразках серії КБ-1, відбувалося по похилій тріщині, поява якої фіксувалася практично перед самим руйнуванням зразка, однак критична тріщина, в порівнянні із КБ-1, мала практично в 2 рази меншу проекцію на горизонтальну вісь (тріщина розвивалася на половину відстані між опорою та місцем прикладення навантаження).
5. У зразках серії КБ-3 спостерігалась зовсім інша картина. При випробовуванні дослідних зразків спостерігався розвиток декількох похилих тріщин: фіксувалася похила тріщина максимально близько до опори (на відстані 120..130 мм від грані колони), в подальшому фіксувалася похила тріщина ближче до місця прикладення навантаження (на відстані 240..250 мм від грані колони), а в результаті, як і в зразках серії КБ-1, відбувалося руйнування по похилій тріщині, поява якої фіксувалася практично перед самим руйнуванням зразка, що розвивалася від опори майже до місця прикладення навантаження (значення проекції на горизонтальну вісь фіксувалось дещо меншим, ніж у КБ-1).

6. Отримані залежності розкриття тріщин від значення поперечної сили (зрізу) дозволяють удосконалити методику розрахунку тріщиностійкості похилих перерізів, із врахування криволінійної попередньо напруженої арматури, залежно від її кута нахилу.

References

1. Kozak O., Zhuravskiy O., Delyavskyy M. Effect of the pre-stressed reinforcement curvature on the bearing capacity of inclined sections of monolithic beams. AIP Conference Proceedings 2077, 020027 (2019); Published Online: 21 February 2019 <https://doi.org/10.1063/1.5091888>
2. Kozak O., Zhuravskiy O. 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 (SCIENTIFIC JOURNAL, 2018 - #2).
3. Kozak O.V. Calculation of units of monolithic frames with tension reinforcement on concrete in the calculation complex "LIRA-SAPR" //Building structures. Theory and practice: coll. of science pr. Kyiv, KNUBA, 2019. Issue 5. P. 32-38.
4. Smorkalov D.V. Monolithic reinforced concrete structures with pre-tensioned ropes // Building structures. Theory and practice. KNUBA. - issue 10, 2022. P. 136-142.

Література

1. Козак О., Журавський О., Делявський М. Вплив кривизни попередньо напруженої арматури на несучу здатність похилих перерізів монолітних балок. AIP Conference Proceedings 2077, 020027 (2019); Опубліковано онлайн: 21 лютого 2019 <https://doi.org/10.1063/1.5091888>
2. Козак О., Журавський О. Експериментальне дослідження впливу криволінійної арматури без адгезії до бетону на несучу здатність похилих перерізів при донапруженні. //USEFUL (SCIENTIFIC JOURNAL, 2018 - #2).
3. Козак О.В. Розрахунок вузлів монолітних рам з напружуваною арматурою на бетон в розрахунковому комплексі «ЛІРА-САПР» //Будівельні конструкції. Теорія і практика: зб. наук. пр. Київ, КНУБА, 2019. Вип. 5. С. 32-38.
4. Смorkалов Д.В. Монолітні залізобетонні конструкції з попередньо напруженими канатами // Будівельні конструкції. Теорія і практика. КНУБА.- вип.10,2022р. С. 136-142.