

# Експериментальні дослідження багаторівневого утворення нормальних тріщин в залізобетонних елементах

Олександр Журавський<sup>1</sup>, Олена Ромашко-Майстрок<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037

<sup>2</sup>Національний університет водного господарства та природокористування  
11, вул. Соборна, Рівне, Україна, 33000

<sup>1</sup>[azhur@ua.fm](mailto:azhur@ua.fm), [orcid.org/0000-0001-7065-3312](https://orcid.org/0000-0001-7065-3312)

<sup>2</sup>[romashkoolena@gmail.com](mailto:romashkoolena@gmail.com), [orcid.org/0000-0003-3353-2268](https://orcid.org/0000-0003-3353-2268)

DOI: 10.32347/2522-4182.4.2019.28-38

**Анотація.** Дана стаття присвячена дослідженням реального процесу поетапного утворення та розкриття нормальних тріщин в залізобетонних елементах і конструкціях з позицій накопичення взаємних зміщень бетону і арматури. Підкреслено, що процес утворення нормальних тріщин в дійсності є багаторівневим та супроводжується поступовим порушенням взаємодії арматури з бетоном. Звернено увагу на те, що в більшості методик розрахунку тріщиностійкості залізобетонних елементів і конструкцій гіпотеза Томаса знаходить декларативне, а не реальне застосування. Наведено критичний аналіз останніх досліджень, присвячених розробці методів та способів розрахунку ширини розкриття тріщин в залізобетонних елементах за їх багаторівневого утворення. При цьому особлива увага приділена способам моделювання процесів зчеплення арматури з бетоном. Аналізується обґрунтованість та правомірність використання в розрахунках лінійного зв'язку між середніми напруженнями зчеплення арматури з бетоном та середніми значеннями нормальних напружень в арматурному стержні на всьому діапазоні деформування залізобетонного елемента.

Окреслено найважливіші завдання, які необхідно вирішити в ході експериментальних досліджень, щоб виявити реальний вплив зусиль та середніх напружень зчеплення арматури з бетоном на крок та ширину розкриття нормальних тріщин в залізобетонних елементах. Наведені програма та методика експериментальних досліджень, конструкція дослідних зразків та установок, основні характеристики бетону і арматури, використаних для їх виготовлення. Висвітлені основні результати випробування призмових елементів та залізобетонних балок. Виконано



**Олександр Журавський**  
завідувач кафедри  
залізобетонних та кам'яних  
конструкцій  
к.т.н., доц.



**Олена Ромашко-Майстрок**  
старший викладач кафедри  
основ архітектурного  
проектування, конструювання  
та графіки

порівняння експериментальних значень досліджуваних параметрів з результатами теоретичних розрахунків. Наведені найважливіші висновки з проведених досліджень та означені їх подальші перспективи.

**Ключові слова.** Залізобетон, елементи, зчеплення, арматура, тріщини, крок, ширина.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Максимально точне відтворення реального стану залізобетонних елементів і конструкцій у їх відповідних розрахунках завжди було одним із основних завдань теорії бетону та залізобетону. Його вирішення завжди прямо чи опосередковано пов'язувалось з процесом реального утворення та розкриття нормальних тріщин.

Досліди показують, що в залізобетонних елементах цей процес є багаторівневим та супроводжується поступовим порушенням взаємодії арматури з бетоном. Тому вкрай важливо, щоб загальна методика

розрахунку утворення та розкриття тріщин будувалась на основі деякої універсальної моделі зчеплення арматури з бетоном.

Розрахунок ширини розкриття нормальних тріщин за гіпотезою Томаса [1] у більшості випадків є декларативним. Його реальне виконання з позицій послідовного накопичення взаємних зміщень арматури і бетону

$$w_k = 2 \int_i^{0,5s_r} \varepsilon_\tau(z) dz, \quad (1)$$

і досі залишається вкрай складним.

Основна причина цього полягає в тому, що пряме інтегрування виразу (1) виконати практично неможливо, оскільки залежність взаємних зміщень арматури і бетону  $\varepsilon_\tau(z) = \varepsilon_s(z) - \varepsilon_{ct}(z)$  є доволі складною та не може бути описана єдиною функцією. Але зазначений розрахунок можна виконати і за спрощеною схемою, залишаючись на позиціях послідовного накопичення взаємних зміщень бетону і арматури. Для цього крок тріщин та ширину їх розкриття необхідно пов'язати з зусиллями зчеплення арматури з бетоном та врахувати, що процес утворення тріщин є багаторівневим. При цьому також необхідно виявити, якими реально є характер зусиль та функції середніх напружень зчеплення арматури з бетоном по відношенню до напружень в самій арматурі.

## АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Загалом розрахункам тріщиностійкості залізобетонних елементів і конструкцій присвячено дуже багато робіт. Однак лише окремі із них [2, 3, 4] присвячені побудові методик, що дозволяли б розраховувати основні параметри реального багаторівневого утворення нормальних тріщин з урахуванням зчеплення арматури з бетоном.

Розрахунок багаторівневого утворення нормальних тріщин можна було б виконувати числовими ітераційними способами [5, 6, 7, 8], які реалізуються програмно за допомогою методу скінчених елементів. Але всі вони, як правило, втрачають свою інженерну осяжність із-за

повного або часткового нівелювання фізичної сутності процесів зчеплення арматури з бетоном і, як наслідок, багаторівневого утворення тріщин в залізобетонному елементі.

Методика, що використовує спеціальний «двохконсольний» елемент [2, 3], загалом дозволяє розраховувати багаторівневе утворення нормальних тріщин. Однак її реалізація в практичних розрахунках навіть за допомогою спеціальних програмних комплексів теж залишається надзвичайно складною. Крім того, виникають певні застереження щодо обґрунтованості самого «двохконсольного» елемента та появи стискаючих напружень в зоні навколо досліджуваної тріщини.

Вся складність розрахунку багаторівневого утворення нормальних тріщин полягає в тому, що відтворення процесів зчеплення арматури з бетоном за допомогою діаграм їх взаємного зміщення теж є проблематичним. Безпосереднє інтегрування зазначених діаграм є практично неможливим, оскільки в процесі деформування залізобетонних елементів вони постійно змінюються [9, 10, 11, 12, 13]. Тому цілком виправданим можна вважати те, що в методиках розрахунку рівневого утворення нормальних тріщин взаємодію арматури з бетоном стараються моделювати за допомогою середніх напружень зчеплення [4]. Але у цьому випадку виникають серйозні застереження щодо обґрунтованості та правомірності використання лінійного зв'язку між середніми напруженнями зчеплення арматури з бетоном та середніми значеннями нормальних напружень в арматурному стержні на всьому діапазоні деформування залізобетонного елемента.

## МЕТА ТА ЗАВДАННЯ РОБОТИ

Дані дослідження спрямовані на виявлення впливу зусиль та середніх напружень зчеплення арматури з бетоном на крок та ширину розкриття нормальних тріщин в залізобетонних елементах.

Задля досягнення поставленої мети

ставилось завдання дослідити:

- характер зміни функції середніх напружень зчеплення арматури з бетоном шляхом висмикування арматурних стержнів з бетонних призмових зразків;
- процес утворення та розкриття нормальних тріщин в розтягнутих елементах шляхом випробування призмових зразків;
- процес рівневого утворення та розкриття нормальних тріщин в згинальних елементах при випробуваннях залізобетонних балок.

### ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Щоб розв'язати окреслені задачі, було вирішено виготовити наступні зразки: бетонні призми, арматурні стержні, залізобетонні центрально розтягнуті призматичні елементи та балки. Випробування основних зразків підпорядковано виявленню загальних закономірностей рівневого утворення нормальних тріщин в залізобетонних центрально розтягнутих та згинальних

елементах з урахуванням особливостей зчеплення арматури з бетоном.

Для контролю міцнісних та деформативних характеристик бетону і арматури в досліджуваних призматичних зразках та балках було передбачено виготовлення: бетонних призм з розмірами 10x10x40 см та 10x10x60 см і арматурних стержнів довжиною 50 см. Мета та об'єм випробування зразків кожного типу наведені в табл. 1.

В зразках типу ПА...з центральний арматурний стержень діаметром 10 мм з класу А500С був розрізаний посередині та обрамлений залізобетонною обіймою. Просторовий каркас цієї обійми утворений 4-ма стержнями діаметром 6 мм класу А240С та гнутими замкнутими хомутами діаметром 4 мм класу Вр-І, розміщеними з кроком 90 мм (рис. 1, а).

Призмові зразки типу ПА...р були армовані лише одним центрально розміщеним стержнем діаметром 10 мм класу А500С (рис. 1, б).

**Табл. 1.** Мета та об'єм експериментальних досліджень

**Table 1.** Purpose and scope of the experimental studies

№ з/п	Тип та розміри зразків	К-ть, шт.	Мета випробувань
1.	Призми ПС, 10x10x40 см	3	Призмova міцність та модуль пружності стиснутого бетону на момент випробування основних зразків (розтягнутих та згинальних залізобетонних елементів)
2.	Призми ПР, 10x10x60 см	3	Міцність бетону за осьового розтягу на момент випробування основних зразків
3.	Призмові елементи ПА...з, 10x10x50 см	3	Середні напруження зчеплення арматури з бетоном та тріщиностійкість розтягнутих залізобетонних елементів
4.	Призмові елементи ПА...р, 10x10x50 см	3	Багаторівневе утворення тріщин в розтягнутих елементах
5.	Балки Б, 20x10 см, l = 200 см	3	Багаторівневе утворення тріщин в згинальних залізобетонних елементах

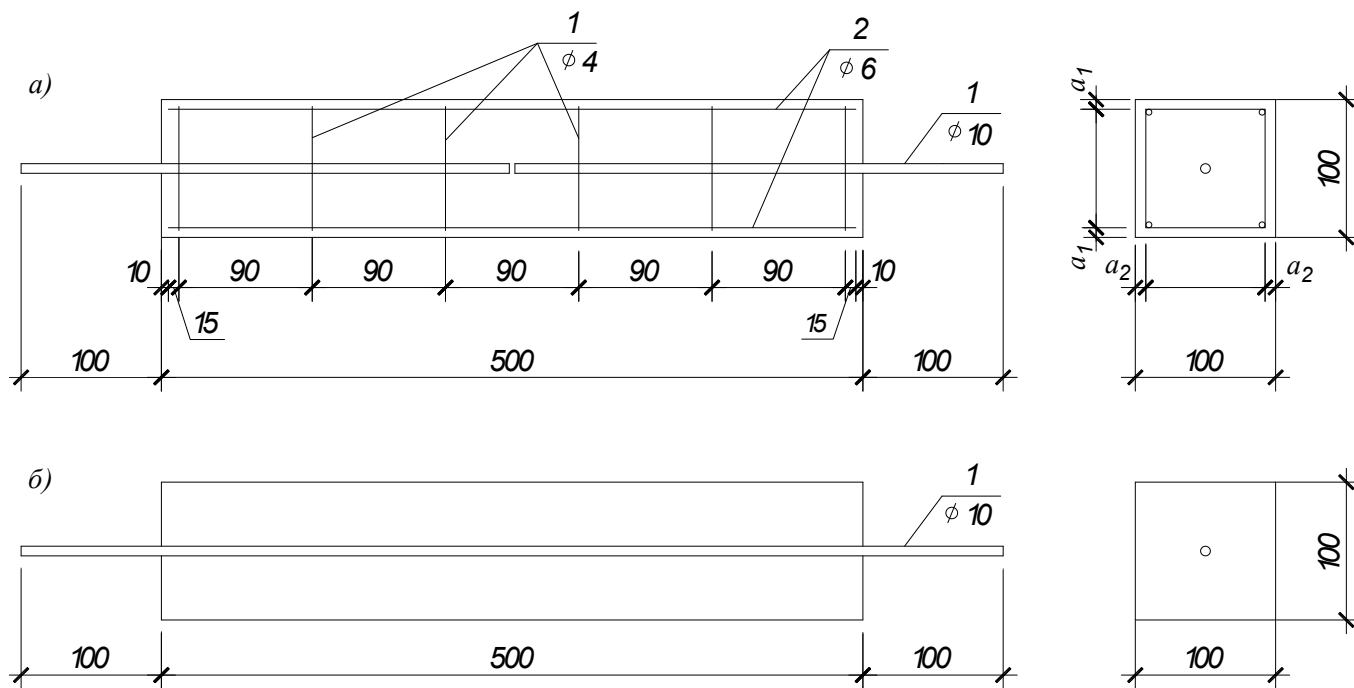
Всі зразки балок в розтягнутій зоні армовані двома поздовжніми стержнями діаметром 10 мм класу А500С. Поза зоною чистого згину на приопорних ділянках було встановлено поперечну арматуру у вигляді

гнутих замкнутих хомутих діаметром 4 мм класу Вр-І, розміщених з кроком 100мм. Такою ж була в зазначеній зоні і верхня конструктивна арматура (рис. 2).

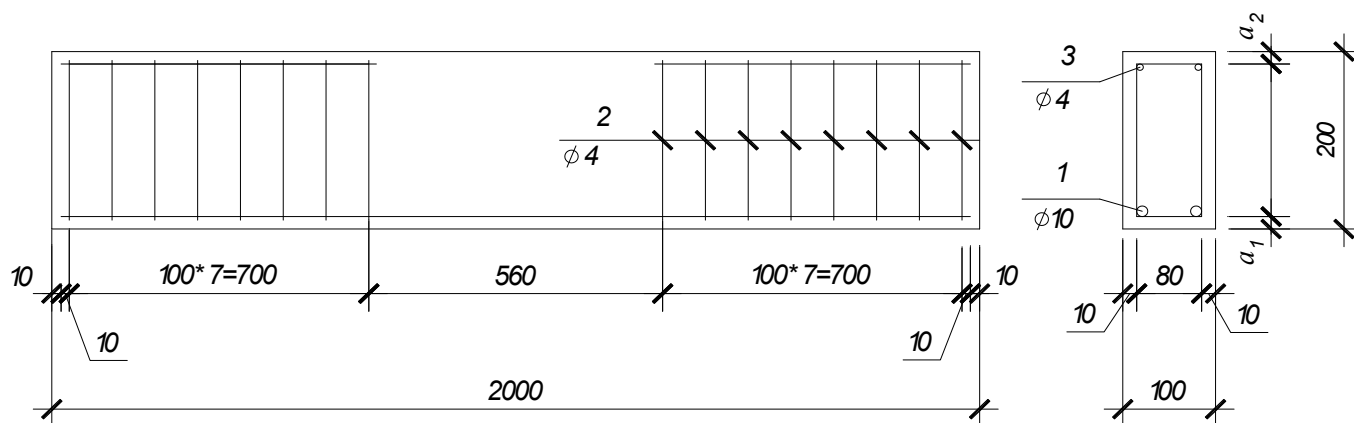
Всі основні залізобетонні та допоміжні

бетонні зразки були виготовлені з бетонної суміші однакового складу (табл. 2). Важкий бетон класу С20/25 отриманий за допомогою: в'язучого – шлакопортландцементу марки 500 Здолбунівського ПАТ «Волинь-цемент»;

крупного заповнювача – щебеню фракцій 5...10 мм Вирівського кар'єру Рівненської області; дрібного заповнювача – кварцового піску з модулем крупності 1,6...1,9 Полянського кар'єру Славутського району Хмельницької області.



**Рис. 1.** Конструкція та схеми армування дослідних зразків: а) призм ПА...з; б) призм ПА...р  
**Fig. 1.** Design and reinforcement schemes of prototypes: a) prism PA...p; b) prism PA...t



**Рис. 2.** Конструкція та схеми армування дослідних залізобетонних балок Б  
**Fig. 2.** Design and reinforcement schemes of reinforced concrete beams B

**Табл. 2.** Склад бетону дослідних зразків  
**Table 2.** Concrete composition of prototypes

Компоненти	Цемент, кг	Пісок, кг	Щебінь, кг	Вода, л
Витрати на м <sup>3</sup>	330	700	1180	210

Виготовлення бетонної суміші та бетонування дослідних зразків проводилося в лабораторних умовах. Для одночасного виготовлення всіх основних та допоміжних зразків були використані спеціальні металеві форми. Бетонування дослідних зразків балок та призм типу ПС виконувалося в горизонтальному положенні, а всіх інших призмових зразків – у вертикальному положенні. Бетонна

суміш ущільнювалася на спеціальному вібромайданчику. Твердіння бетону проходило за нормальних умов в науковій лабораторії кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд НУВГП. Підготовка дослідних зразків до випробувань розпочалася при досягненні ними 28 денного віку.

Найважливіші характеристики основних дослідних зразків наведені в табл. 3.

**Табл. 3.** Геометричні характеристики основних зразків  
**Table 3.** Geometric characteristics of the main prototypes

Зразки		$L$ , мм	$b$ , мм	$h$ , мм	$a_1$ , мм	$a_2$ , мм	$A_s$ , см <sup>2</sup>
тип	шифр						
Призми	ПА-1з	500	102	102	11	12	0,785 (1,13*)
	ПА-2з		102	102	13	12	
	ПА-3з		102	101	12	14	
Призми	ПА-1р	500	102	101	–	–	0,785
	ПА-2р		101	103	–	–	
	ПА-3р		102	102	–	–	
Балки	Б-1	2000	101	199	14	13	1,57
	Б-2		104	200	12	14	
	Б-3		102	198	12	12	

Випробування основних призмових зразків проводились в універсальній розривній машині УИМ-50. Деформування розтягнутого бетону контролювали за допомогою 4-х індикаторів 1МИГ, встановлених з базою вимірювань 200 мм на бокових гранях дослідних зразків.

Експериментальні дослідження залізобетонних балок проводили в спеціальній рамній установці 2 (рис. 3). Зазначені зразки з прольотом 180 см випробовували за розрахунковою схемою однопролітної шарнірно обпертої на опорах балки. Задля влаштування зони чистого згину їх завантаження здійснювали двома зосередженими силами в середній третині розрахункового прольоту через розподільну траверсу 4. Навантаження створювалось за допомогою 15-ти тонного гідравлічного домкрату 5 та

контролювалось відтарованим кільцевим динамометром 3.

Для вимірювання прогину балки та контролю за її осіданням на опорах використовували прогиноміри 6 типу БПАО. Деформації бетону стиснутої зони вимірювали за допомогою індикаторів 7 типу 1МИГ, встановлених в середній частині балки з базою вимірювань 200 мм. Деформації арматури контролювали за допомогою тензометрів Гугенбергера 8, що були встановлені на кожному з розтягнутих стержнів також на середині балки.

При випробуваннях бетонних призм на осьовий стиск використовували гідравлічний прес П-250. Випробування арматурних стержнів та бетонних призм на осьовий розтяг здійснювали в розривній машині УИМ-50.

Випробування бетонних призм

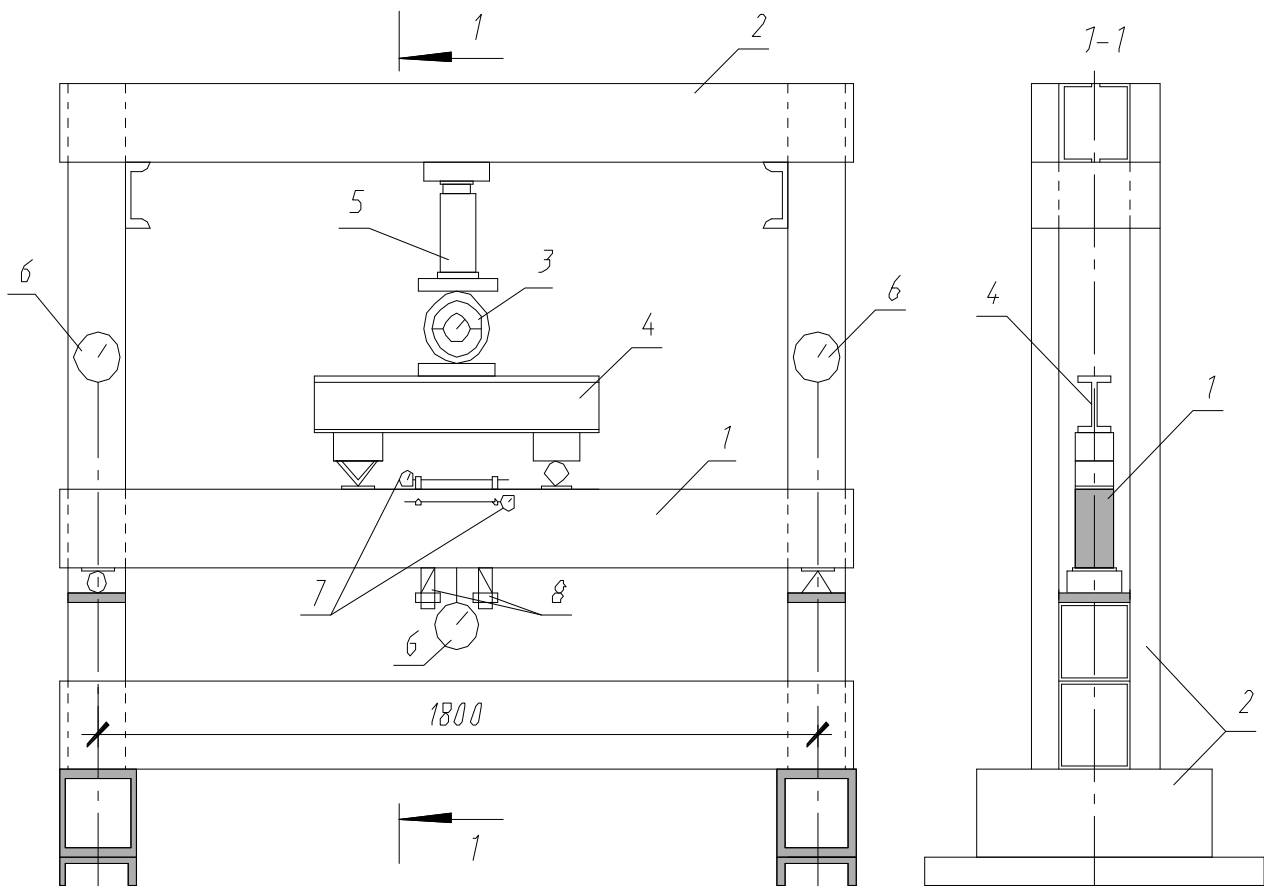
проводили у віці 36-ти діб, що відповідало моменту завантаження основних зразків. Навантаження на них прикладали ступенями 10% від очікуваного руйнівного зі швидкістю  $(0,6 \pm 0,04)$  МПа/с. Поздовжні деформації стиснутого та розтягнутого бетону контролювали за допомогою 4-х індикаторів ІМІГ, встановлених з базою вимірювань 200 мм на бокових гранях призм. Результати цих випробувань наведені в табл. 4.

Фізико-механічні характеристики арматури визначалися за результатами випробування трьох стержнів довжиною 50 см у розривній машині УІМ-50. Вони

занесені до табл. 5.

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проведені експериментальні дослідження підтвердили, що процес утворення нормальних тріщин і в розтягнутих (рис. 4 і 5), і в згинальних елементах (рис. 6) є багаторівневим. При цьому в розтягнутих елементах тріщини 1-го рівня появлялись з кроком 140...170 мм на 3...4 ступенях, 2-го рівня – переважно на 8-му ступені завантаження з кроком 60...90 мм.



**Рис. 3.** Схема дослідної установки та розташування вимірювальних приладів: 1 – балка; 2 – установка; 3 – динамометр; 4 – траверса; 5 – домкрат; 6 – прогиноміри 6ПАО; 7 – індикатори ІМІГ; 8 – тензометри Гугенберга

**Fig. 3.** Scheme of experimental installation and arrangement of measuring instruments: 1 – beam; 2 – installation; 3 – dynamometer; 4 – traverse; 5 – jack; 6 – 6PAG deflectors; 7 – IMIG indicators; 8 – Gugenberger tensometers

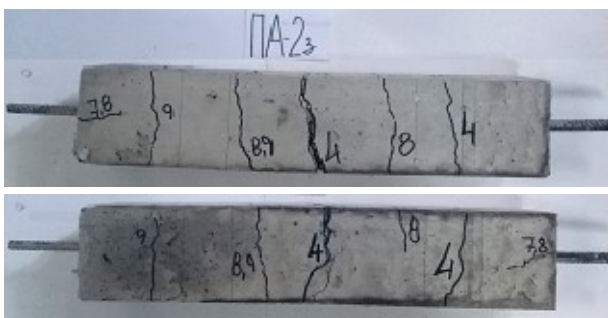
**Табл. 4.** Механічні характеристики бетону  
**Table 4.** Mechanical characteristics of concrete

Шифр зразків	Розміри перерізу, мм	Характеристичне значення міцності бетону, МПа		Значення модуля пружності бетону, МПа	
		по зразках	середнє	по зразках	середнє
на стиск					
ПС-1	10,0*10,1	19,6	19,92	24753	24151
ПС-2	10,0*10,2	20,29		22741	
ПС-3	10,2*10,1	19,87		24960	
на розтяг					
ПР-1	10,2*10,2	1,39	1,39	–	–
ПР-2	10,2*10,1	1,46		–	
ПР-3	10,2*10,1	1,31		–	

**Табл. 5.** Механічні характеристики арматури  
**Table 5.** Mechanical characteristics of reinforcement

Клас арматури	Кількість зразків, шт.	Площа перерізу $A_s$ , см <sup>2</sup>	Межа текучості $\sigma_y$ , МПа	Модуль пружності $E_s$ , МПа	Тимчасовий опір розриву $\sigma_{su}$ , МПа
A500 С	3	0,785	521	194000	647
A240 С	3	0,283	323	209000	491

В переважній більшості розтягнутих призових зразків тріщин 3-го рівня не було виявлено аж до текучості арматури. В обрамлених призмах ПА...з, переважно на 8-му рівні, почали появлятися поздовжні тріщини (рис. 4), характерні для проковзування арматури.



**Рис. 4.** Схема (розгортка) утворення і розвитку тріщин в призмі ПА-2з при висмикуванні арматури  
**Fig. 4.** The scheme (scanning) of cracks formation and development in the prism PA-2p by pulling reinforcement



**Рис. 5.** Схема (розгортка) утворення і розвитку тріщин в призмі ПА-1р за розтягу арматури  
**Fig. 5.** The scheme (scanning) of cracks formation and development in the prism PA-1t during tensile reinforcement

В згинальних елементах (рис. 6) тріщини 1-го рівня появлялися з кроком 80...130 мм переважно на 4-му ступені, 2-го рівня – переважно на 7...8-му ступенях завантаження з кроком 50...70 мм, 3-го рівня – переважно на 11...12-му ступенях

завантаження з кроком 30...40 мм.

Було вирішено порівняти дослідні значення ширини розкриття нормальних тріщин балок з теоретичними значеннями, отриманими за різними методиками.

Авторська методика [14] розроблена на основні узагальненої моделі зчеплення арматури з бетоном [15, 16] в рамках деформаційно-силової моделі [17]. В ній відстань між тріщинами розраховувалась за виразом

$$s_{ri} = \frac{\sigma_s}{4 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot (\sigma_{si} / f_{yk})^{1-1/\eta_s} \cdot \rho_{l,t}}, \quad (2)$$

тобто за середніми напруженнями

зчеплення арматури з бетоном

$$\tau_{bmi} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctk} \cdot (\sigma_{si} / f_{yk})^{1-1/\eta_s} \quad (3)$$

з урахуванням індексу зчеплення Рема [18].

Для порівняння розрахунків виконувався за нормативною методикою [19, 20] та методикою [4], де разом з гіпотезою «лінійності» жорсткості використана лінійна функція середніх напружень зчеплення арматури з бетоном.

Графіки експериментальних та теоретичних значень ширини розкриття тріщин показані на рис. 7, а статистичні характеристики їх порівняння наведені в табл. 6.

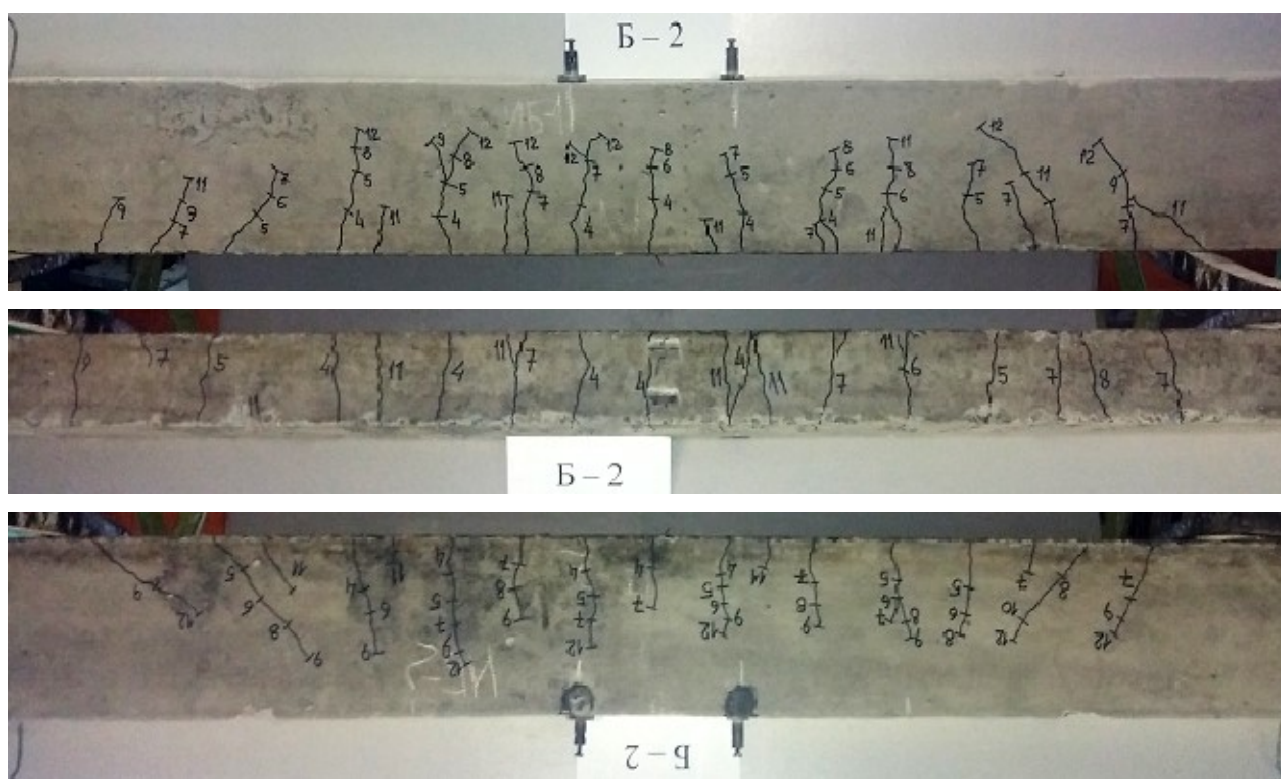


Рис. 6. Схема (розгортка) утворення та розвитку тріщин в залізобетонній балці Б-2

Fig. 6. The scheme (scanning) of cracks formation and development in the reinforced concrete beam B-2

### ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Завдяки результатам проведених досліджень можна зробити ряд наступних висновків:

1. Реальний процес утворення тріщин як в розтягнутих, так і в згинальних залізобетонних елементах є багаторівневим.

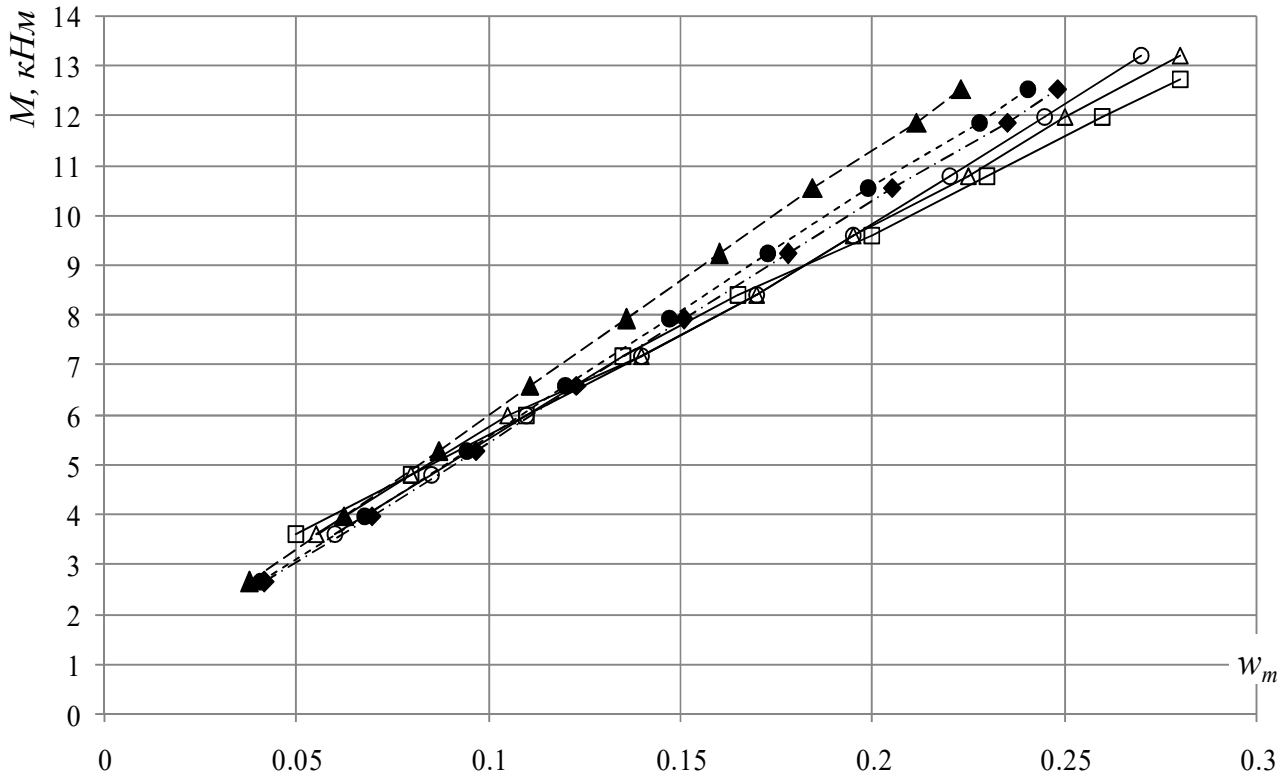
2. Методики розрахунку, побудовані з допомогою основних закономірностей

зчеплення арматури з бетоном, дозволяють більш точно визначати параметри утворення та розкриття нормальних тріщин.

3. Функція середніх напружень зчеплення арматури з бетоном все ж таки є нелінійною відносно напружень в самій арматурі.

В подальшому варто було б дослідити вплив попереднього напруження на процес багаторівневого утворення та розкриття нормальних тріщин. Цілком очевидно, що це потребує окремого дослідження.





**Рис. 7.** Графіки розкриття тріщин: експериментальні в залізобетонних балках □ – В-1, Δ – В-2, ○ – В-3; теоретичні за методиками ▲ – [19, 20], ◆ – [14], ● – [4]

**Fig. 7.** Crack opening graphs: experimental in reinforced concrete beams □ – В-1, Δ – В-2, ○ – В-3; theoretical by methods ▲ – [19, 20], ◆ – [14], ● – [4]

**Табл. 6.** Статистична оцінка різних методів розрахунку ширини розкриття тріщин  
**Table 6.** The statistical evaluation of different methods for calculating crack opening width

Методика розрахунку	Середньо арифметичне відхилення $\Delta_w, \%$	Середньо квадратичне відхилення $\sigma_w, \%$	Коефіцієнт варіації $\nu_w, \%$
Нормативна [19, 20]	21,2	4,49	5,7
Авторська [14]	11,7	3,63	4,12
[4]	14,9	4,95	5,82

#### ЛІТЕРАТУРА

1. **Thomas F. G.** Cracking in Reinforced Concrete. *The Structural Engineer*. July 1936. Vol. 14, No. 7. P. 298-320.
2. **Бондаренко В. М., Колчунов В. И.** Расчётные модели силового сопротивления железобетона: монография. Москва: «АСВ», 2004. 472 с.
3. **Яковенко І. А.** Моделі деформування залізобетону на засадах механіки руйнування: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.23.01. Полтава, 2018. 44 с.
4. **Кочкаръов Д. В.** Нелінійний опір залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Полтава, 2018. 44 с.
5. **Карпенко Н. И.** Общие модели механики железобетона. Москва: Стройиздат, 1996. 416 с.
6. **Веселов А. А.** Нелинейная теория сцепления арматуры с бетоном и ее приложения: дис. д-ра техн. наук: 05.23.01 / Санкт-Петербургский гос. арх.-строит. ун-т. Санкт-Петербург, 2000. 320 с.
7. Конечно-элементное моделирование процессов неупругого деформирования и разрушения элементов железобетонных конструкций / **А. В. Бенин** и др. *Морские*

- интеллектуальные технологии. 2011. №3. С. 105-108.
8. Process of cracking in reinforced concrete beams (simulation and experiment) / **I. N. Shardakov** et al. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016. Vol. 38. P. 339-350.
  9. **Mirza S. A. and Houde J.** Study of Bond-Slip Relationships in Reinforced Concrete. *ACI Journal*. January 1979. Vol. 76, No.1. P. 19-46.
  10. **Eligehausen R., Popov E. P. and Bertero V. V.** Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations: Report No. UCB/EERC-83/23. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center of California University, 1983. 169 p.
  11. **Shima H., Chou L.-L. and Okamura H.** Micro and macro models for bond in reinforced concrete. *Journal of the Engineering Faculty of Tokyo University*. 1987. Vol. XXXIX, No. 2. P. 133-194.
  12. **Gambarova P. G., Rossati G. P. and Zasso B.** Steel-Concrete Bond after Concrete Splitting: Test Results. *Materials and Structures*. 1989. Vol. 22. P. 35-47.
  13. **Harajli M. H., Hout M.A. and Jalkh W.** Local bond stress-slip behavior of reinforced bars embedded in plain and fiber concrete. *ACI Materials Journal*. 1995. Vol. 92, No. 4. P. 343-353.
  14. **Ромашко В. М., Ромашко О. В.** Розрахунок тріщиностійкості залізобетонних елементів з урахуванням рівнів утворення нормальних тріщин. *Зб. наук. праць УДУЗТ*. 2018. Вип. 181. С. 58-65.
  15. **Ромашко О. В., Ромашко В. М.** Щодо оцінювання зчеплення арматури з бетоном. *Зб. наук. праць УДУЗТ*. 2018. Вип. 179. С. 92-99.
  16. **Ромашко О. В., Ромашко В. М., Журавський О. Д.** Узагальнена модель зчеплення арматури з бетоном. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць*. Рівне: НУВГП, 2019. Вип. 37. С. 214-221.
  17. **Ромашко В. М.** Деформаційно-силова модель опору бетону і залізобетону: монографія. Рівне: О. Зень, 2016. 424 с.
  18. **Rehm G.** The fundamental law of bond. *Proceedings of the symposium on bond and crack formation in reinforced concrete*. Stockholm: RILEM. 1957. Vol. 2. P. 491-498.
  19. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний від 01.06.11]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с. (Національний стандарт України).
  20. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. [Final Draft, December 2004]. Brussels: CEN. 2004. 225 p. (Європейський стандарт).

## REFERENCES

1. **Thomas F. G., 1936.** Cracking in Reinforced Concrete. *The Structural Engineer*. Vol. 14, No. 7, 298-320.
2. **Bondarenko V. M., Kolchunov V. I., 2004.** Raschyotny'e modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona: monografi`ya. Moskva: «ASV», 472. (in Russian)
3. **Yakovenko I. A., 2018.** Modeli deformuvannya zalizobetonu na zasadakh mekhaniky ruinuvannya: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia d-ra tekhn. nauk: 05.23.01. Poltava, 44. (in Ukrainian)
4. **Kochkarov D. V., 2018.** Neliniyni opir zalizobetonnykh elementiv i konstruktssii sylovym vplyvam: avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.23.01. Poltava, 44. (in Ukrainian)
5. **Karpenko N. I., 1996.** Obshhie modeli mekhaniki zhelezobetona. Moskva: Strojizdat, 416. (in Russian)
6. **Veselov A. A., 2000.** Nelinejnaya teoriya sचेpleniya armatury` s betonom i ee prilozheniya: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.23.01 / Sankt-Peterburgskij gos. arkh.-stroit. un-t. Sankt-Peterburg, 320. (in Russian)
7. Konechno-e`lementnoe modelirovanie processov neuprugogo deformirovaniya i razrusheniya e`lementov zhelezobetonny`kh konstrukcij / **A. V. Benin** i dr. *Morskije intellektual`ny`e tekhnologii*. 2011. No. 3, 105-108. (in Russian)
8. Process of cracking in reinforced concrete beams (simulation and experiment) / **I. N. Shardakov** et al. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016. Vol. 38, 339-350.
9. **Mirza S. A. and Houde J., 1979.** Study of Bond-Slip Relationships in Reinforced Concrete. *ACI Journal*. Vol. 76, No.1, 19-46.
10. **Eligehausen R., Popov E. P. and Bertero V. V., 1983.** Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations: Report No. UCB/EERC-83/23. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center of California University, 169 p.

11. **Shima H., Chou L.-L. and Okamura H., 1987.** Micro and macro models for bond in reinforced concrete. *Journal of the Engineering Faculty of Tokyo University*. Vol. XXXIX, No. 2, 133-194.
12. **Gambarova P. G., Rossati G. P. and Zasso B., 1989.** Steel-Concrete Bond after Concrete Splitting: Test Results. *Materials and Structures*, Vol. 22, 35-47.
13. **Harajli M. H., Hout M.A. and Jalkh W., 1995.** Local bond stress-slip behavior of reinforced bars embedded in plain and fiber concrete. *ACI Materials Journal*. Vol. 92, No. 4, 343-353.
14. **Romashko V. M., Romashko O. V., 2018.** Rozrakhunok trishchynosti kosti zalizobetonnykh elementiv z urakhuvanniam rivniv utvorennia normalnykh trishchyn. *Zb. nauk. prats UDUZT*. Vyp. 181, 58-65. (in Ukrainian)
15. **Romashko O. V., Romashko V. M., 2018.** Shchodo otsiniuvannia zchepлення armatury z betonom. *Zb. nauk. prats UDUZT*. Vyp. 179, 92-99. (in Ukrainian)
16. **Romashko O. V., Romashko V. M., Zhuravskiy O. D., 2019.** Uzahalnena model zchepлення armatury z betonom. *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy: zb. nauk. prats*. Rivne: NUVHP, Vyp. 37, 214-221. (in Ukrainian)
17. **Romashko V. M., 2016.** Deformatsiino-sylova model oporu betonu i zalizobetonu: monohrafiia. Rivne: O. Zen, 424. (in Ukrainian)
18. **Rehm G., 1957.** The fundamental law of bond. *Proceedings of the symposium on bond and crack formation in reinforced concrete*. Stockholm: RILEM. Vol. 2, 491-498.
19. DSTU B V.2.6-156: 2010. Konstruksii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruksii z vazhkoho betonu. Pravyly proektuvannia. [Chynnyi vid 01.06.11]. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2011, 123 (Natsionalnyi standart Ukrainy). (in Ukrainian)
20. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. [Final Draft, December 2004]. Brussels: CEN. 2004, 225.

## Experimental studies of multilevel formation of normal cracks in reinforced concrete elements

*Olexandr Zhuravsky, Olena Romashko-Maistruk*

**Summary.** This article is devoted to the study of the real process of gradual formation and disclosure of normal cracks in reinforced concrete elements and structures from the standpoint of accumulation of concrete and reinforcement mutual displacements. It is emphasized that the process of normal cracks formation is in fact multilevel and is accompanied by a gradual disruption of the interaction of reinforcement with concrete. It is pointed out that in most methods of calculating the fracture toughness of reinforced concrete elements and structures, the Thomas hypothesis finds declarative rather than real application. A critical analysis of recent studies devoted to the development of methods and ways for calculating the crack opening width in reinforced concrete elements by their multilevel formation is given. At the same time, special attention is paid to the methods of modeling the processes of reinforcement with concrete coupling. The validity and regularity of the use in the calculations of linear coupling between the average adhesion stresses of reinforcement with concrete and the average values of normal stresses in the reinforcing rod over the entire range of reinforced concrete element deformation are analyzed.

The most important problems that need to be solved in the course of the experimental studies are outlined to reveal the real influence of the forces and average stresses of reinforcement with concrete adhesion on the step and width of the normal cracks opening in reinforced concrete elements. The program and methodology of experimental studies, design of prototypes and installations, the main characteristics of concrete and reinforcement used for their manufacture are presented. The basic results of testing of prism elements and reinforced concrete beams are illuminated. The experimental values of the studied parameters are compared with the results of theoretical calculations. The most important conclusions from the conducted researches are given and their further perspectives are indicated.

**Key words.** Reinforced concrete, elements, adhesion, reinforcement, cracks, step, width.