

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

НІНІЧУК Микола Володимирович



УДК 624.012.45

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАННИЙ СТАН ТА РОЗРАХУНОК
КОМБІНОВАНО-АРМОВАНИХ НЕРОЗРІЗНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК**

05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

РІВНЕ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Луцькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент,
АНДРІЙЧУК Олександр Валентинович,
Луцький національний технічний університет,
професор кафедри будівництва та цивільної інженерії.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
КЛИМЕНКО Євгеній Володимирович,
Одеська державна академія будівництва та архітектури,
завідувач кафедри залізобетонних конструкцій та
транспортних споруд;

кандидат технічних наук, доцент,
СМОРКАЛОВ Дмитро Володимирович,
Київський національний університет будівництва і
архітектури, доцент кафедри залізобетонних та
кам'яних конструкцій.

Захист відбудеться 25 лютого 2021 року о 14:00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради К 47.104.06 в Національному університеті водного господарства та природокористування за адресою: 33028, м. Рівне, вул. Чорновола, 49, ауд. 673.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету водного господарства та природокористування за адресою: 33028, м. Рівне, вул. О. Новака, 75 та на сайті університету www.nuwm.edu.ua.

Автореферат розісланий «23» січня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої
ради К 47.104.06
к.т.н., доцент



О.М. Бордюженко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Особливе місце в дослідженні і вдосконаленні роботи та розрахунку залізобетонних конструкцій займають статично-невизначені конструкції, зокрема нерозрізні багатопролітні балки. Вони мають низку переваг порівняно зі збірними чи розрізними монолітними конструкціями, так як у них найбільш раціонально використовуються в роботі їх складові матеріали – бетон і арматура. Такі балки широко застосовуються у складі перекриттів будівель промислового та цивільного призначення, мостових конструкціях, естакадах і т.д.

Характерною особливістю роботи нерозрізних балок є перерозподіл зусиль у їх перерізах. За мірою збільшення діючого навантаження, в залізобетонних конструкціях розвиваються суттєві непружні деформації, викликані виникненням і розвитком тріщин у розтягнутій зоні, порушенням зчеплення арматури з бетоном, повзучістю бетону тощо. Вони призводять до значного перерозподілу напружень у перерізах статично-невизначених конструкцій, тому, під час їхнього проектування, доцільно враховувати пластичні характеристики матеріалів і штучно перерозподіляти та регулювати зусилля в них.

Потрібно також відзначити, що нерозрізні балки є основними елементами мостових конструкцій і шляхопроводів. Під впливом погодно-кліматичних факторів та вібраційних коливань на поверхні мостових балок відбуваються локальні руйнування, що призводять до утворення тріщин, вибоїн, вилущування бетону, руйнування захисного шару бетону тощо. Тому важливим є пошук способів підвищення їх тріщиностійкості, жорсткості, ударної міцності та інших характеристик.

Одним із варіантів розв'язання даної проблеми є застосування дисперсно-армованого бетону в конструкції нерозрізних балок, зокрема сталевібробетону (СФБ). Ефективність застосування СФБ в будівельних конструкціях досягається шляхом зниження трудовитрат на арматурні роботи, суміщення технологічних операцій на приготування, армування, укладання та ущільнення сталевібробетонної суміші і зниження витрат на різні види поточного ремонту.

Не зважаючи на ряд якісних переваг, СФБ є ще відносно новим і не повністю вивченим матеріалом. Накопичений значний експериментальний та лабораторний досвід використання сталевібробетону в несучих залізобетонних конструкціях. Широко досліджується вплив дисперсного армування на їх несучу здатність, жорсткість і тріщиностійкість. Однак, мало досліджена робота статично-невизначених конструкцій із дисперсним і комбінованим армуванням, а також є маловивченим вплив дисперсного армування на перерозподіл зусиль у них.

Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану комбіновано-армованих нерозрізних залізобетонних балок, порівняння отриманих даних із результатами випробувань типових залізобетонних балок і виявлення переваг та недоліків під час застосування дисперсно-армованого бетону в конструкції нерозрізних балок є актуальною та доцільною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в рамках науково-дослідної держбюджетної теми Луцького національного технічного університету «Розробка дорожніх конструкцій і жорстких

покриттів на автомобільних дорогах із використанням дисперсного армування» (державний реєстраційний номер 0119U002265), а також виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри будівництва та цивільної інженерії Луцького національного технічного університету.

Мета і задачі дослідження. Метою є встановлення особливостей роботи нерозрізних комбіновано-армованих балок при дії короточасних одноразових навантажень і розроблення ефективних методів їх розрахунку.

Для досягнення мети в роботі поставлені такі задачі:

- обґрунтувати можливість і доцільність використання нерозрізних комбіновано-армованих балок із дисперсним армуванням сталевую фібру;
- провести експериментальні дослідження роботи нерозрізних залізобетонних (типових), сталевібробетонних та комбіновано-армованих балок при дії одноразових навантажень і встановити їх дійсний напружено-деформований стан;
- встановити особливості перерозподілу внутрішніх зусиль у нормальних перерізах нерозрізних комбіновано-армованих балок на всіх стадіях їх роботи;
- виконати числовий експеримент із моделюванням роботи комбіновано-армованих балок за одноразових навантажень методом скінченних елементів;
- удосконалити методику визначення параметрів напружено-деформованого стану і несучої здатності нормальних перерізів комбіновано-армованих нерозрізних балок на основі деформаційної моделі із врахуванням повних діаграм роботи СФБ;
- розробити інженерну методику розрахунку несучої здатності нормальних перерізів нерозрізних комбіновано-армованих залізобетонних балок.

Об'єкт досліджень – робота нерозрізних комбіновано-армованих залізобетонних балок в умовах короточасного одноразового навантаження.

Предмет досліджень – напружено-деформований стан, несуча здатність, характер тріщиноутворення, перерозподіл внутрішніх зусиль у нерозрізних комбіновано-армованих залізобетонних балках при дії короточасних одноразових навантажень і методи їх розрахунку.

Методи досліджень: аналіз опублікованих наукових праць; експериментальні дослідження роботи комбіновано-армованих балок за спеціально розробленою програмою; статистичний аналіз результатів досліджень; комп'ютерне моделювання за допомогою методу скінченних елементів; порівняння теоретичних і дослідних даних.

Наукова новизна одержаних результатів:

- отримано нові експериментальні дані про роботу нерозрізних комбіновано-армованих залізобетонних балок, що дали можливість виявити особливості їх напружено-деформованого стану, деформативності та характеру тріщиноутворення;
- одержано експериментальні дані, що допомогли встановити характер перерозподілу внутрішніх зусиль у нерозрізних комбіновано-армованих балках при дії короточасних одноразових навантажень;
- доведено, що нерозрізні комбіновано-армовані балки із додатковим дисперсним армуванням сталевую фібру, під час одноразових навантажень за показниками деформативності, тріщиностійкості та несучої здатності перевищують відповідні показники типових залізобетонних балок і при цьому зменшуються витрати матеріалів на їх виготовлення;

– розроблено інженерну методику розрахунку несучої здатності нормальних перерізів комбіновано-армованих згинальних елементів.

Дістала подальший розвиток:

– деформаційна модель розрахунку комбіновано армованих згинальних елементів із урахуванням повних діаграм роботи сталевібробетону на розтяг;

– методика визначення величини згинальних моментів у комбіновано-армованих нерозрізних залізобетонних балках із урахуванням перерозподілу зусиль.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

– методику розрахунку комбіновано-армованих нерозрізних залізобетонних балок рекомендується використовувати у проєктній практиці;

– результати дослідження комбіновано-армованих нерозрізних залізобетонних балок впроваджені в навчальний процес у Луцькому НТУ;

– результати дисертаційної роботи були використанні під час розробки проєктної документації об'єкта «Реконструкція даху лабораторного комплексу «Уран» (апаратна) фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України в ур. Гушово Шацького району Волинської області»;

– методика розрахунку нерозрізних комбіновано-армованих балок була використана під час проєктування об'єкта: «Нове будівництво 2-х секційного багатоквартирного житлового будинку з вбудовано-прибудованими приміщеннями у с. Липини Луцького р-ну, по вул. Заньковецької 1».

Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментальних досліджень, обробці одержаних результатів та впровадженні розроблених матеріалів у виробництво та навчальний процес. Основні результати дисертаційної роботи були одержані самостійно. Особистий науковий внесок автора у наукових працях, написаних у співавторстві, вказаний у списку публікацій здобувача. Формулювання мети, завдання, програми досліджень, планування роботи, обговорення статей і тез доповідей на конференціях здійснювалося під керівництвом наукового керівника – к.т.н., доцента Андрійчука О.В.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідались і були схвалені на:

1. II Міжнародній науковій конференції «ЕкоКомфорт та актуальні питання в будівництві», 16-18 вересня 2020 р., м. Львів, Національний університет «Львівська політехніка».

2. Міжнародній науково-технічній конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво», 23 вересня 2020 р., м. Одеса, ОДАБА.

3. III Міжнародній українсько-азербайджанській конференції «BUILDING INNOVATIONS – 2020», 1-2 червня 2020 р., м. Баку-Полтава, Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка".

4. VIII міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (Трансбуд-2019), 20-22 листопада 2019 р., м. Харків, УкрДУЗТ.

5. Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції молодих учених та студентів «Сучасні проблеми містобудування, перспективи та пріоритети розвитку», 15 листопада 2019 р., м. Луцьк, Луцький НТУ.

6. III Міжнародній конференції "Експлуатація та реконструкція будівель і споруд", 26-28 вересня 2019 р., м. Одеса, ОДАБА.

7. Міжнародній науково-практичній виставці-конференції "Інновації у будівництві" 20-22 листопада 2014 р. м. Луцьк, Луцький НТУ.

Публікації. Матеріали дисертації викладені у 9 статтях у збірниках наукових праць, що визнані фаховими виданнями, в тому числі 3 статті опубліковані одноосібно, 2 статті – у виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота викладена на 181 сторінці (основна частина – 133 ст.). Дисертація містить 30 таблиць і 70 рисунків, 182 найменувань використаних джерел, а також 4 додатки на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета та задачі дослідження, наукова новизна та практичне значення роботи, представлена її загальна характеристика та зв'язок із науковими програмами.

У **першому розділі** проаналізовано область застосування нерозрізних залізобетонних балок, особливості їх роботи та конструювання. Описані граничні умови перерозподілу зусиль у таких балках і методи їх розрахунку. Проведено аналіз результатів експериментальних досліджень напружено-деформованого стану нерозрізних залізобетонних балок при одноразових і повторних навантаженнях, що одержано вченими: О.О. Гвоздевим, С.М. Криловим, А.І. Козачевським, Ю.П. Гущею, М.С. Абакановим, С.К. Ікрамовим, Л.Н. Зайцевем, Б.Г. Гнідцем, Є.М. Бабичем, В.Є. Бабичем, В.В. Савицьким, В.С. Дорофєєвим, Є.В. Клименком, В.М. Карпюком, А.Ф. Яременком, Е.Н. Крантовською, О.А. Шкурупієм, О.М. Лазаревою.

Розглянуто матеріал для будівельних конструкцій – сталевібробетон (СФБ). Проаналізовано застосування фібри в бетоні. Наведено загальні відомості про застосування СФБ у практиці будівництва сталевібробетонних конструкцій, їх переваги та недоліки, відомі методи їх розрахунку та особливості роботи під навантаженням. Здійснений аналіз експериментальних досліджень роботи конструкцій із використанням СФБ, що отримано вченими: В.П. Некрасовим, Д.П. Ромуальді, Г.Б. Батсоном, Д.А. Манделем, Є.М. Бабичем, В.В. Білозіром, Л.Й. Дворкіним, Г.В. Гетуном, В.М. Косарєвим, Б.О. Криловим, О.П. Кричевським, А.Н. Куліковим, Л.Г. Курбатовим, Г.Е. Лагутіним, Е.І. Митрофановим, А.П. Павловим, В. Рамачадраном, А.В. Сакварелідзе, А.В. Сопільняком, О.П. Сунаком, С.Я. Дробошинцем, О.В. Андрійчуком та іншими.

На основі проведеного порівняльного аналізу використання СФБ в будівельних конструкціях визначено мету та задачі дисертаційного дослідження.

Другий розділ присвячений методиці експериментальних досліджень міцнісних і деформативних характеристик, напружено-деформованого стану (НДС) нерозрізних балок із залізобетону, СФБ та із комбінованим армуванням.

Для вивчення особливостей міцнісних і деформативних характеристик та НДС нерозрізних залізобетонних балок при одноразових короточасних

навантаженнях, прийнято за доцільне проведення двох серій експериментальних досліджень.

У першій серії вивчалася несуча здатність і деформативність залізобетонних (типових) балок (1Б1), комбіновано-армованих балок (1Б2) та сталевібробетонних балок (1Б3). Армування виконувалося таким чином, щоб витрата сталі у всіх типах балок була однаковою. Дослідні зразки являли собою нерозрізні двопролітні залізобетонні балки довжиною $l = 300$ см із розмірами поперечного перерізу $b \times h = 8 \times 16$ см та довжиною прольотів по $l_{1,2} = 140$ см. Схема армування стержневою арматурою залізобетонних балок 1Б1 та комбіновано-армованих балок 1Б2 була розроблена із урахуванням перерозподілу зусиль.

Армування було прийнято у вигляді плоского одиничного каркасу з поздовжньою робочою арматурою над центральною опорою та в прольотах для балок 1Б1 – Ø14 А500С і для балок 1Б2 – Ø10 А500С. У комбіновано-армованих балках 1Б2 використовувалося дисперсне армування по всьому об'єму сталевіброю, з відносним відсотком армування рівним $\mu_{fv} = 1$ %. Сталевібробетонні балки першої серії 1Б3 виконувалися лише із дисперсним армуванням по всьому об'єму сталевіброю з відносним відсотком армування рівним $\mu_{fv} = 2$ % (рис. 1).

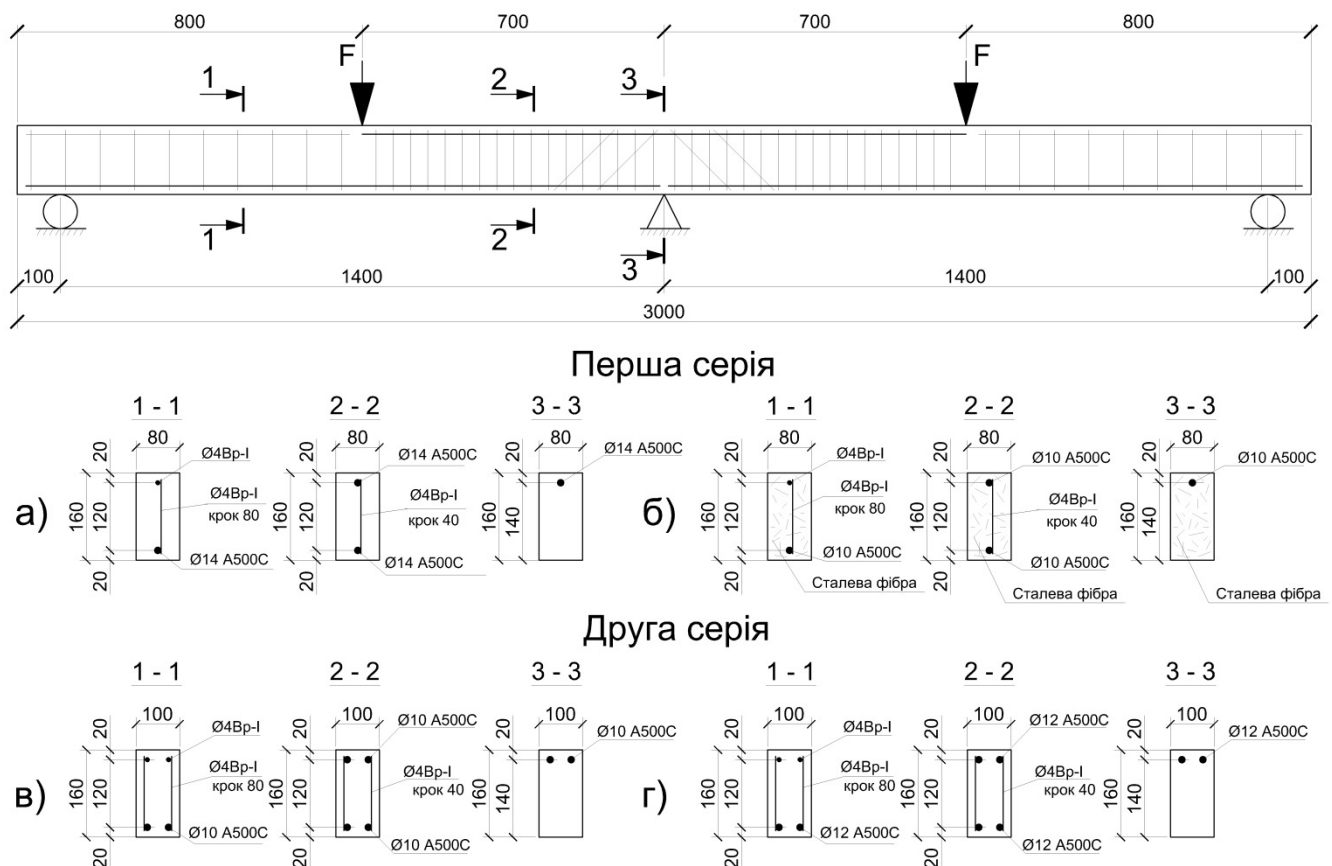


Рисунок 1 – Конструктивна схема дослідних балок:

- а) армування балок 1Б1; б) армування балок 1Б2;
в) армування балок 2Б1-1,2, 2Б2-1,2, 2Б3-1,2; г) армування балок 2Б1-3, 2Б2-3, 2Б3-3

У межах другої серії дослідів вивчався вплив типу додаткового дисперсного армування сталевіброю різних зон нерозрізних балок на їх напружено-деформований стан. Розміри поперечного січення балок були прийняті рівними $b \times h = 10 \times 16$ см, довжина прольотів і загальна довжина була така ж, як і у балок

першої серії. Основне армування було прийнято у вигляді двох плоских каркасів. Робоча арматура над центральною опорою та в прольотах для балок 2Б1-1,2, 2Б2-1,2 та 2Б3-1,2 виконувалася зі стержнів Ø10 A500C, а для балок 2Б1-3, 2Б2-3 та 2Б3-3 – зі стержнів Ø12 A500C.

Додаткове дисперсне армування балок другої серії виконувалося таким чином, щоб у зразках було різне заповнення фібрами їх об'єму, з однаковим відносним відсотком армування рівним $\mu_{fv} = 1\%$. Зокрема балки 2Б1 армувалися фібрами по всьому своєму об'єму, у балках 2Б2 фібри вносились лише в розтягнуті зони бетону, що умовно становило половину висоти балки, а балки 2Б3 – в розтягнутих зонах, але лише на висоту $t = 40$ мм від зовнішнього краю балки, що рівна подвійній висоті захисного шару бетону.

Таблиця 1 – Геометричні характеристики та армування дослідних балок

Серія	Маркування	Розмір перерізу, мм		Довжина прольоту $l_1=l_2$, мм	Основне армування	Дисперсне армування
		b	h			
1	1Б1-1	80	160	1400	1Ø14A500C	–
	1Б1-2					
	1Б2-1				1Ø10A500C	По всьому об'єму, $\mu_{fv} = 1\%$
	1Б2-2					
	1Б3-1				–	По всьому об'єму, $\mu_{fv} = 2\%$
	1Б3-2					
2	2Б1-1	100	160	1400	2Ø10A500C	По всьому об'єму, $\mu_{fv} = 1\%$
	2Б1-2				2Ø12A500C	
	2Б1-3					
	2Б2-1				2Ø10A500C	У розтягнутих зонах $\mu_{fv} = 1\%$
	2Б2-2				2Ø12A500C	
	2Б2-3					
	2Б3-1				2Ø10A500C	У розтягнутих зонах на висоту 40 мм від краю $\mu_{fv} = 1\%$
	2Б3-2					
	2Б3-3				2Ø12A500C	

У якості дисперсного армування використовували сталеву анкерну фібру діаметром $d = 1,0$ мм і довжиною $l = 50$ мм із загнутими кінцями.

Під час проведення двох серій досліджень виготовлялися куби та призми, що використовувалися для визначення механічних характеристик бетону матриці та сталевіфібробетону на стиск і на розтяг. Дані випробувань наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Механічні характеристики бетону по серіях. Середні значення

№ серії	Міцність на стиск f_c , МПа			Міцність на розтяг f_{ct} , МПа		
	Бетонна матриця	СФБ, $\mu=1,0$	СФБ, $\mu=2,0$	Бетонна матриця	СФБ, $\mu=1,0$	СФБ, $\mu=2,0$
1	21,1	21,3	26,0	0,54	2,03	2,62
2	20,1	24,2	–	0,51	2,24	–

Для випробовування балок була розроблена та виготовлена спеціальна силова установка у вигляді рами (рис. 2).

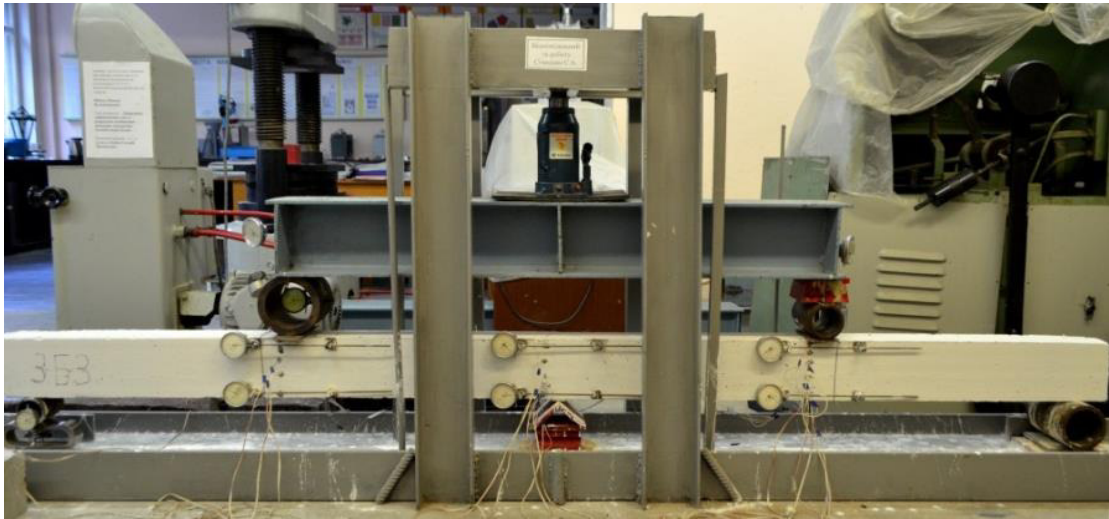


Рисунок 2 – Загальний вигляд випробування балок

Балки випробовували навантаженням від двох зосереджених сил, що прикладалися на віддалі 70 см від центра нерухокої опори. Навантаження балок здійснювали ступенями до їх руйнування. На кожному ступені навантаження, під час витримки, знімалися покази на приладах, здійснювався візуальний огляд балок, відмічався процес тріщиноутворення.

У процесі випробування балок за допомогою механічних та тензометричних приладів вимірювались: деформації бетону, арматури, прогини балок, реакції опор, (рис. 3). Дані, отримані з тензорезисторів, що були розміщені на арматурі та бетоні, вимірювали багатоканальною тензометричною системою ВНП-8.

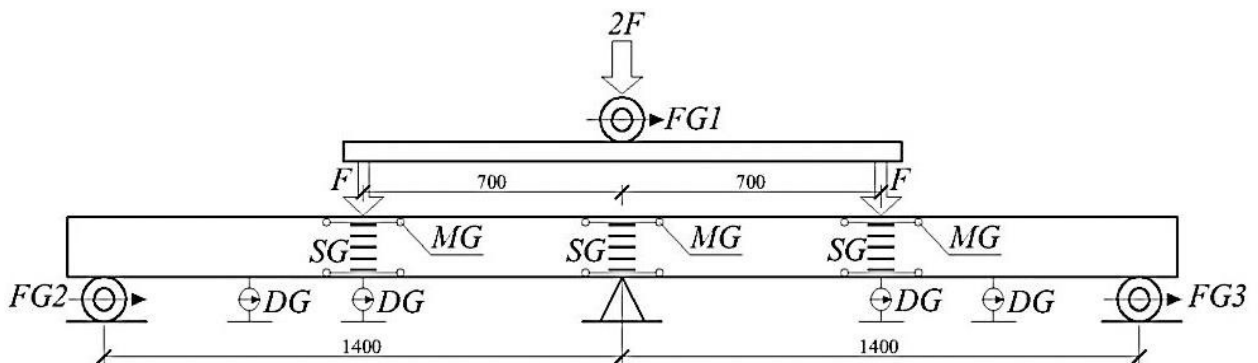


Рисунок 3 – Схема розташування вимірювальних приладів:
 FG – динамометри; SG – тензорезистори; DG – прогиноміри;
 MG – індикатори годинникового типу

Критерієм руйнування балок вважалися умови, коли деформації арматури та бетону в нормальних перерізах зразка досягали граничних значень.

Третій розділ присвячено ґрунтовному аналізу одержаних результатів експериментальних досліджень роботи комбіновано-армованих нерозрізних залізобетонних балок.

У першій серії експериментальних досліджень ставилась задача порівняти несучу здатність і жорсткість нерозрізних балок із різними способами армування. У

процесі випробувань, піддавались однократному навантаженню до руйнування три типи нерозрізних двопролітних балок: залізобетонні балки із дрібнозернистого бетону (зразки 1Б1-1, 2), комбіновано-армовані балки (1Б2-1, 2); сталевібробетонні (1Б3-1, 2). Несуча здатність випробуваних балок становила:

$$\begin{array}{lll} \mathbf{1Б1-1} - F_u = 27 \text{ кН}; & \mathbf{1Б2-1} - F_u = 26,5 \text{ кН}; & \mathbf{1Б3-1} - F_u = 9 \text{ кН}; \\ \mathbf{1Б1-2} - F_u = 26 \text{ кН}; & \mathbf{1Б2-2} - F_u = 26 \text{ кН}; & \mathbf{1Б3-2} - F_u = 6 \text{ кН}. \end{array}$$

У процесі випробування залізобетонних балок 1Б1, на перших стадіях навантаження спостерігалось утворення декількох незначних нормальних тріщин над середньою опорою, також розвиток цих тріщин і утворення нових у прольотах. При навантаженні $F = 13$ кН утворювалися та інтенсивно розвивалися похилі тріщини із обох сторін середньої опори. Нормальні тріщини фактично перестали розвиватись після утворення похилих. Руйнування балок відбувалось різко, по критичній похилій тріщині, з викришуванням бетону.

Комбіновано-армовані балки 1Б2 зруйнувалися по нормальних перерізах, внаслідок досягнення арматурою та СФБ граничних деформацій. Перші тріщини з'явилися, як і в зразках 1Б1, на перших стадіях випробування при $F = 4$ кН у нормальних перерізах, але розташовувалися вони частіше та переплітались між собою. Ширина їх розкриття була меншою за ширину у балках 1Б1 в середньому на 35...50%. Кількість і ширина розкриття похилих тріщин була незначною.

Сталевібробетонні балки 1Б3 зруйнувались по нормальних перерізах у прольотах і на середній опорі, внаслідок досягнення сталевібробетоном граничних деформацій. На перших етапах навантаження тріщин не спостерігалось, і лише при рівні $F = 5$ кН в прольотах і на опорі одночасно з'явилось по одній нормальній тріщині, по яких і відбулося руйнування (рис. 5).

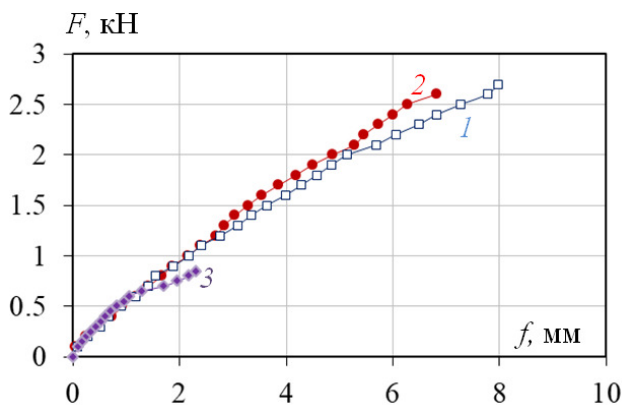


Рисунок 4 – Зміна прогинів балок першої серії:

- 1 – прогини балок 1Б1;
- 2 – прогини балок 1Б2;
- 3 – прогини балок 1Б3



Рисунок 5 – Характер руйнування балок першої серії

Загалом, результати досліджень балок першої серії показали, що додаткове дисперсне армування сталевую фіброю бетонної матриці балок, із відсотком дисперсного армування $\mu_{fv} = 1\%$, підвищує їх несучу здатність на 17...20 % та призводить до зменшення прогинів на 12...36% і ширини розкриття тріщин на 35...55 %, у порівнянні з типовими залізобетонними балками.

У другій серії досліджень вивчалася робота тільки комбіновано-армованих нерозрізних балок, але з різними варіантами додаткового дисперсного армування перерізу сталевими фібрами по висоті.

При випробуванні балок **2Б1**, що були армовані сталевими фібрами по всьому об'єму з відсотком дисперсного армування $\mu_{fv} = 1\%$, поява перших тріщин спостерігалася при рівні навантаження $0,2...0,25F_u$, в місцях прикладання сил і над середньою опорою. При подальшому навантаженні до рівня $0,8F_u$, бетон та арматура працювали сумісно, а деформування зразків мало переважно пружний характер без яскраво вираженого перерозподілу зусиль.

Підтвердженням цього слугувала зміна опорних реакцій та відношення опорних і прольотних згинальних моментів. При відношенні теоретичних значень для даних зразків за пружної стадії – $M_{sup}/M_{sp} = 2,53$, для балок **2Б1**, після утворення перших тріщин і до рівня $0,6F_u$ відношення знаходилось у межах $M_{sup}/M_{sp} = 2,02...1,9$. Очевидно, що на характер перерозподілу зусиль впливає наявність додаткового дисперсного армування по всьому об'єму балки, так як сталефібробетон у розтягнутій зоні при появі перших тріщин не виключається з роботи.

При досягненні рівня навантаження $0,85...0,87F_u$, значення деформацій в арматурі над середньою опорою перевищили межу текучості, що призвело до утворення пластичного шарніра. Відношення згинальних моментів почало різко зменшуватися, аж до практично повного перерозподілу перед руйнуванням. Збільшення деформацій стиснутого бетону відбувалося пропорційно до рівня $0,95F_u$. Руйнування балок відбулося, коли значення деформацій бетону в прольотних перерізах перевищили граничні ($\varepsilon_{cl} = 181,6 \cdot 10^{-5}$), що призвело до роздроблення стиснутої зони перерізу. Величина руйнівного навантаження для зразків **2Б1** становила: **2Б1-1** – $F_u = 55\text{кН}$; **2Б1-2** – $F_u = 54\text{кН}$; **2Б1-3** – $F_u = 77\text{кН}$.

У балках **2Б2** додаткове дисперсне армування застосовувалося тільки у розтягнутих зонах бетону. Висота цих зон у перерізах умовно приймалась рівною половині висоти перерізу.

Перші нормальні тріщини спостерігалися над опорою при рівні навантаження $0,16...0,24F_u$. У процесі подальшого випробування балок спостерігалось більше відхилення опорних реакцій у сторону пружно-пластичної роботи, у порівнянні з балками **2Б1**.

Згинальні моменти збільшувались із характерним відхиленням від пружної стадії, їх відношення знаходилось у межах $M_{sup}/M_{sp} = 1,71...1,51$. При перевищенні рівня навантаження $0,8F_u$ фіксувався активний ріст деформацій бетону в прольотних перерізах та деформацій арматури в опорних. Значення деформацій стиснутої зони бетону у прольотах, були вищі, ніж у балках **2Б1** в середньому на 15-20 %.

Руйнування балок відбулося внаслідок одночасного досягнення граничних деформацій у бетоні та арматурі в прольотах. У цих перерізах було помітне

характерне розкришування стиснутої зони бетону. Перед руйнування відношення опорних моментів до прольотних становило $M_{sup}/M_{sp} = 1,06...1,07$.

Величина руйнівного навантаження для зразків **2Б2** становила: **2Б2-1** – $F_u = 50\text{кН}$; **2Б2-2** – $F_u = 49\text{кН}$; **2Б2-3** – $F_u = 75\text{кН}$ (рис. 6).

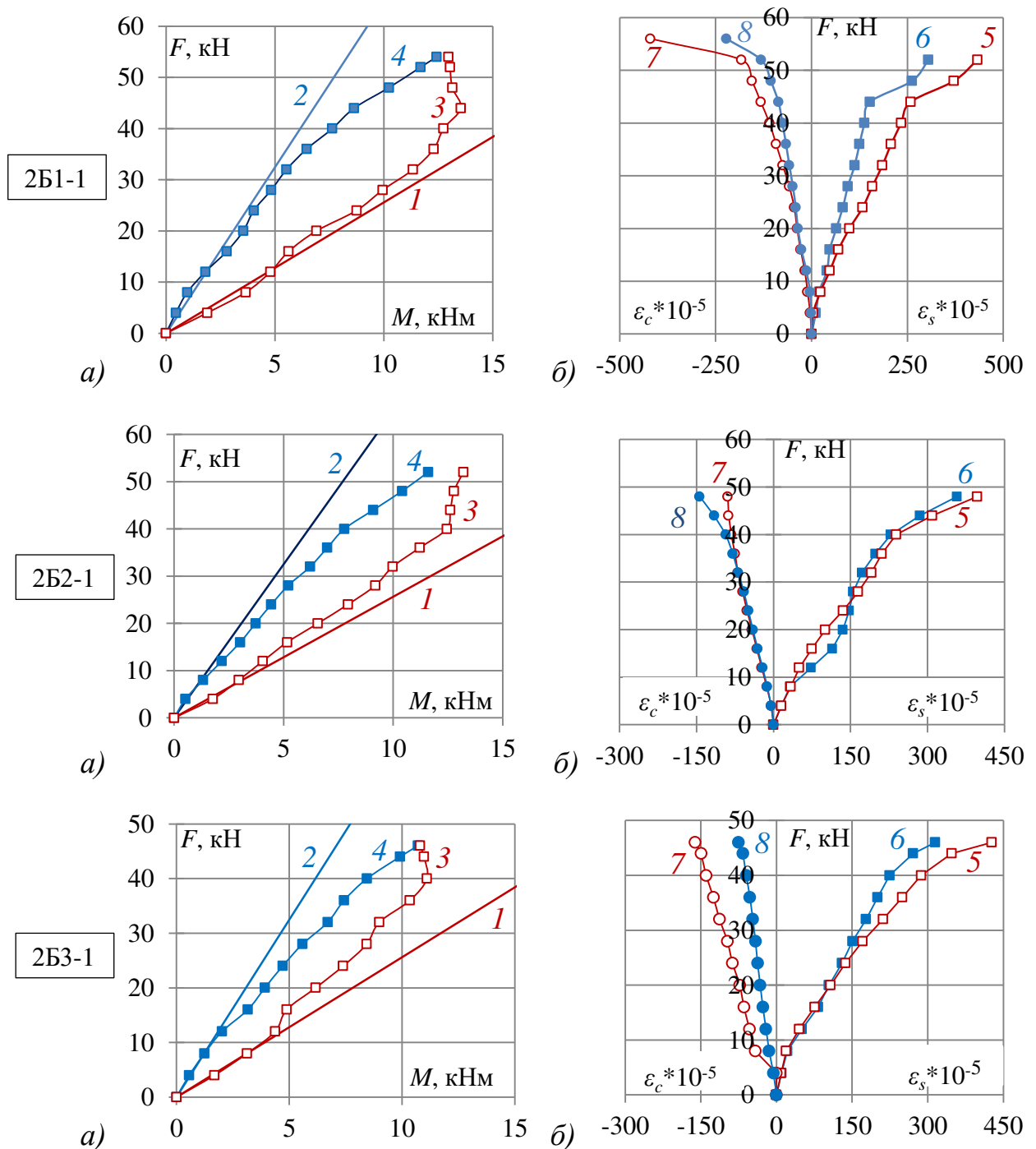


Рисунок 6 – Зміна згинальних моментів (а) і деформацій бетону та арматури (б) в процесі навантаження балок II-ї серії: 1 – теоретичні значення моментів на опорі в пружній стадії; 2 – те саме в прольотах; 3 – експериментальні значення моментів на опорі; 4 – те саме в прольотах; 5 – деформації арматури на опорі; 6 – те саме в прольотах; 7 – деформації бетону на опорі; 8 – те саме в прольотах

У загальному, у балках **2Б2**, від моменту утворення перших тріщин, спостерігалось значне зниження жорсткості та збільшення кривизни. При однаковій

площі арматури в перерізах, вони мали меншу на 10 % несучу здатність, ніж зразки, армовані сталеною фіброю по всьому об'єму. Значення деформацій стиснутого бетону прольотних перерізів, майже на всіх рівнях навантаження були більшими на 15-20 % за аналогічні у балках **2Б1**.

Робота балок третього типу **2Б3**, що армувалися сталеною фіброю в розтягнутих зонах лише на висоту 4 см від зовнішнього краю балки, практично на всіх етапах навантаження була схожою на роботу зразків **2Б2**. Після утворення перших тріщин, відбувався процес перерозподілу зусиль і відношення опорних моментів до прольотних, у діапазоні навантажень $0,3...0,8F_u$, змінювалося у межах $M_{sup}/M_{sp} = 1,55...1,31$.

Руйнування балок відбулося при досягненні у стиснутому бетоні над середньою опорою максимальних напружень. Відношення моментів перед руйнуванням становило $M_{sup}/M_{sp} = 1,01...1,03$, що свідчить про повний перерозподіл внутрішніх зусиль. Руйнівне навантаження для балок становило: **2Б3-1** – $F_u = 47$ кН; **2Б3-2** – $F_u = 46$ кН; **2Б3-3** – $F_u = 69$ кН.

Під час дослідження роботи балок третього типу **2Б3** встановлено, що при дисперсному армуванні сталевими фібрами розтягнутої зони бетону лише на 40 мм від краю, несуча здатність балок зменшується на 13-15 % у порівнянні з балками **2Б1** та **2Б2**. Також відсутність дисперсного армування в стиснутих зонах бетону, зменшує їх міцність і сприяє інтенсивнішому розвитку пластичних деформацій.

Прогини, при випробуванні усіх зразків-балок другої серії, вимірювалися під місцем прикладання сили та на відстані 40 см від крайньої опори і визначали, як середнє по двом прольотам.

У процесі навантаження, прогини у всіх типах балок змінювались практично пропорційно із самого початку навантаження до рівня $0,75F_u$ (рис. 7).

Прогини балок **2Б1** та **2Б2** практично не відрізнялися, а в балках **2Б3** вони були більші в середньому на 10-15 %, що пояснюється меншою жорсткістю балки та відповідно більшими деформаціями бетону та арматури в опорному та прольотних перерізах. Максимальні прогини балок **2Б3** перед руйнуванням в середньому були на 18 % більші, ніж у балок **2Б1** та **2Б2** при тому ж рівні навантаження.

На всіх рівнях навантаження дослідних балок, відслідковувалась поява, ширина розкриття та висота тріщин. У всіх зразках, перші нормальні тріщини з'явилися при навантаженні на рівні приблизно 20...25 % від руйнівного. При подальшому навантаженні спостерігалася поява значної кількості нових тріщин із частково вираженою плетінчастістю. Збільшення висоти існуючих тріщин практично не спостерігалось. Збільшення ширини розкриття тріщин і опорних, і прольотних, до рівня приблизно 75 % від руйнівного, відбувалося практично лінійно (рис. 7). Ширина розкриття тріщин у всіх трьох типах балок другої серії була практично однаковою на всіх рівнях навантаження.

Варто зазначити, що максимально допустима, згідно з нормами, ширина розкриття тріщин ($w_k = 0,4$ мм) в усіх зразках спостерігалася лише в опорних зонах, при навантаженнях, близьких до руйнівного. Відношення опорних і прольотних згинальних моментів M_{sup}/M_{sp} при цьому становили, в середньому, для балок **2Б1** – $M_{sup}/M_{sp} = 1,5$, а для балок **2Б2** та **2Б3** – $M_{sup}/M_{sp} = 1,3$. Це свідчило про перерозподіл зусиль на рівні 62 % та 78 % від повного перерозподілу у дослідних зразках.

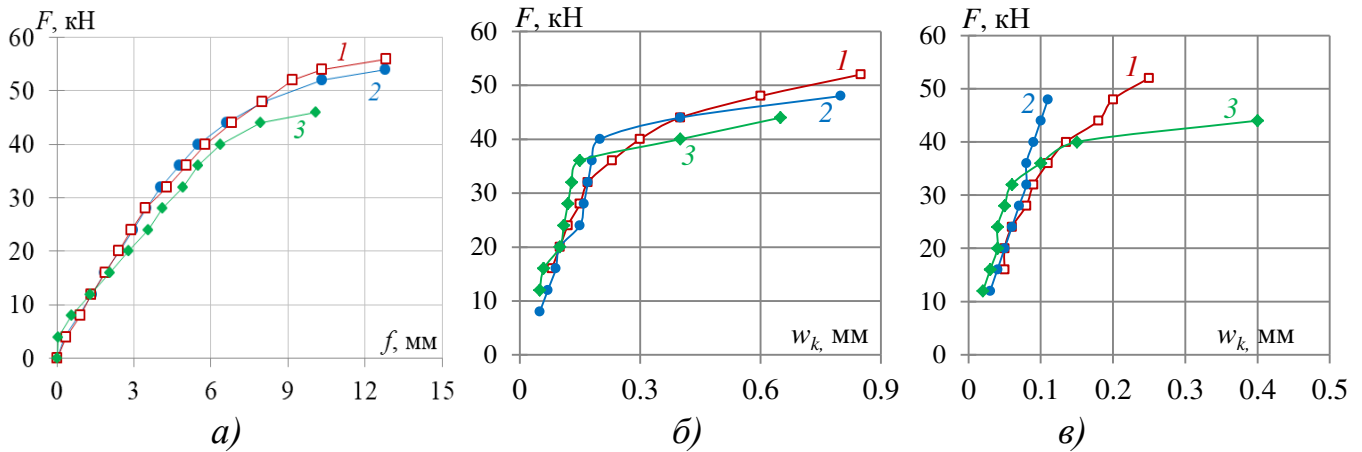


Рисунок 7 – Зміна прогинів (а) та ширина розкриття тріщин у досліджуваних балках над опорою (б) та у прольотах (в): 1 – усереднені значення для балок 2Б1; 2 – усереднені значення для балок 2Б2; 3 – усереднені значення для балок 2Б3

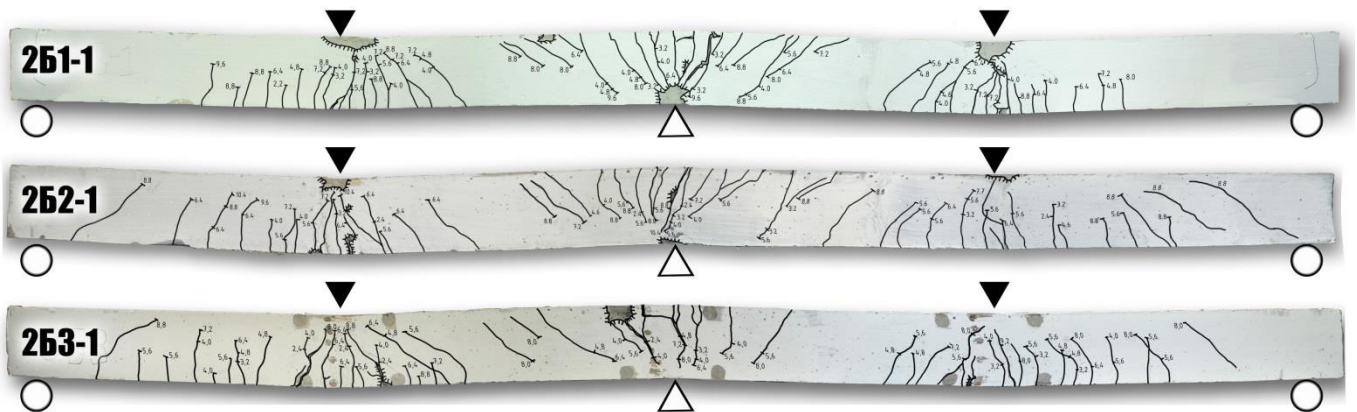


Рисунок 8 – Характер руйнування балок другої серії

У **четвертому розділі** проведено моделювання роботи нерозрізних комбіновано-армованих балок методом скінченних елементів (МСЕ), визначено числові значення напружень, згинальних моментів і переміщень.

Моделювання роботи балок виконувалося у ПК ЛІРА-САПР за допомогою об'ємних елементів №231 розміром $2 \times 2 \times 2$ см. Поздовжня та поперечна арматура задавалася окремими стержневими елементами, які для відтворення спільної з бетоном роботи задавалися по вузлах об'ємних елементів.

Елементом задавалися механічні характеристики, що відповідають реальним властивостям матеріалів за допомогою закону нелінійного деформування №14.

У результаті нелінійного розрахунку були отримані значення зусиль і переміщень у елементах балок, що відображаються у вигляді ізополів. Значення зусиль N_x , що отримали внаслідок розрахунку в ПК ЛІРА-САПР, відповідають напруженням у бетоні по висоті σ_c (рис. 9). Також отримані значення величини поздовжньої сили N в арматурних стержнях, які дозволяють визначити фактичне напруження в арматурі (рис. 10). За руйнівне приймається навантаження, за якого значення напружень у стиснутих зонах бетону та розтягнутій арматурі досягають граничних значень.

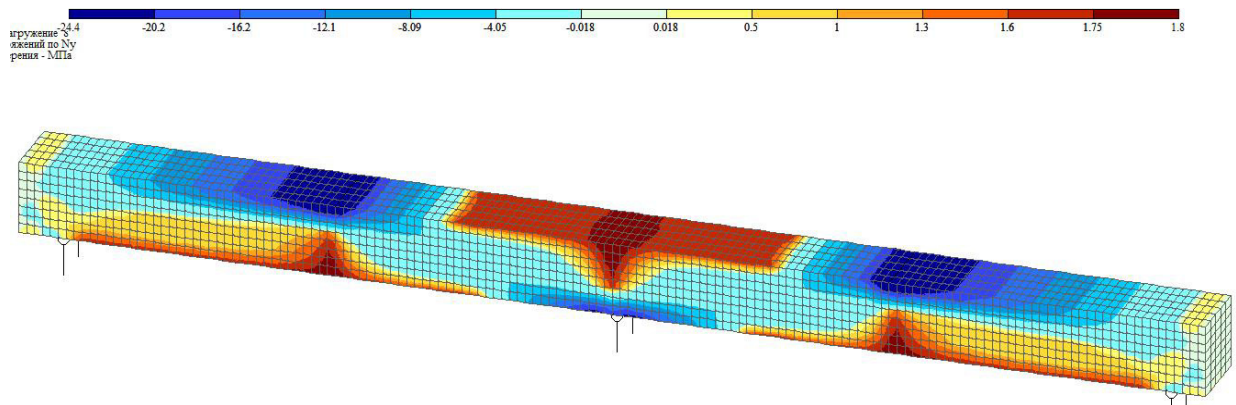


Рисунок 9 – Ізополя напружень N_x у бетоні у балці 2Б1 при навантаженні $F_u = 56$ кН

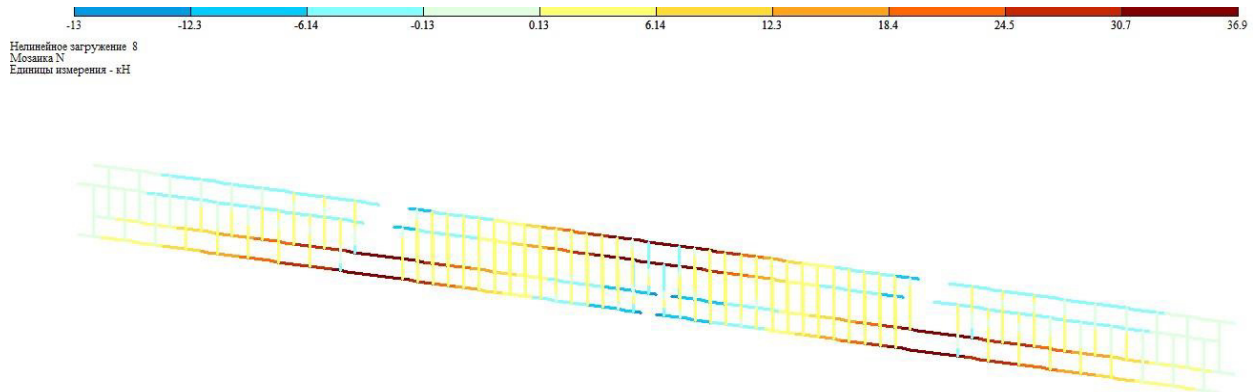


Рисунок 10 – Ізополя напружень N_x у бетоні (а) та зусилля N у арматурі (б) у балці 2Б1 при навантаженні $F_u = 56$ кН

Таблиця 3 – Порівняння несучої здатності нерозрізних балок

№	Маркування	$M_{sup}^{exp}, \text{кН*м}$	$M_{sup}^{ЛРА}, \text{кН*м}$	$M_u^{ЛРА} / M_u^{exp}$
1	2Б1-1	13,0	12,49	0,96
2	2Б1-2	12,77		0,978
3	2Б2-1	11,8	11,02	0,933
4	2Б2-2	11,7		0,942
5	2Б3-1	10,85	10,21	0,941
6	2Б3-2	10,7		0,954

На основі отриманих за допомогою ПК ЛІРА-САПР значень напружень у елементах, були визначені відповідні їм (за експериментально одержаною діаграмою $\sigma - \varepsilon$) величини деформацій бетону та арматури, та кривизна перерізів. Також для кожного етапу навантаження, на основі значень опорних реакцій були визначені величини прольотних і опорних згинальних моментів. Порівняння експериментально отриманих значень несучої здатності досліджуваних балок із отриманими в результаті нелінійного розрахунку за допомогою ПК ЛІРА-САПР, представлено в таблиці 3.

Середнє значення похибки максимальних значень згинальних моментів, отриманих за допомогою ПК ЛІРА-САПР, відносно експериментальних даних, становить $\bar{X} = 4,8 \%$ при середньоквадратичному відхиленні $\sigma = 1,6 \%$.

Також у роботі пропонується удосконалена методика розрахунку на основі деформаційної моделі для теоретичного визначення на всіх рівнях навантаження

характеристик напружено-деформованого стану та несучої здатності нормальних перерізів комбіновано-армованих згинальних елементів. У результаті власних експериментальних досліджень роботи та аналізу досліджень інших авторів, пропонується висхідну вітку діаграми деформування за розтягу описувати параболою до рівня $\sigma = f_{ct}$ за фіксованого значення відносних деформацій $\varepsilon_{ct,1} = 25 \cdot 10^{-5}$. Низхідну вітку діаграми пропонується описувати лінійною функцією до значення напружень, що рівні $\sigma_{ct,u} = 0,25f_{ct}$. Гранична величина деформацій сталевібробетону при цьому приймається рівною граничним деформаціям стержневої арматури $\varepsilon_{ct,u} = 25 \cdot 10^{-3}$ (рис. 11).

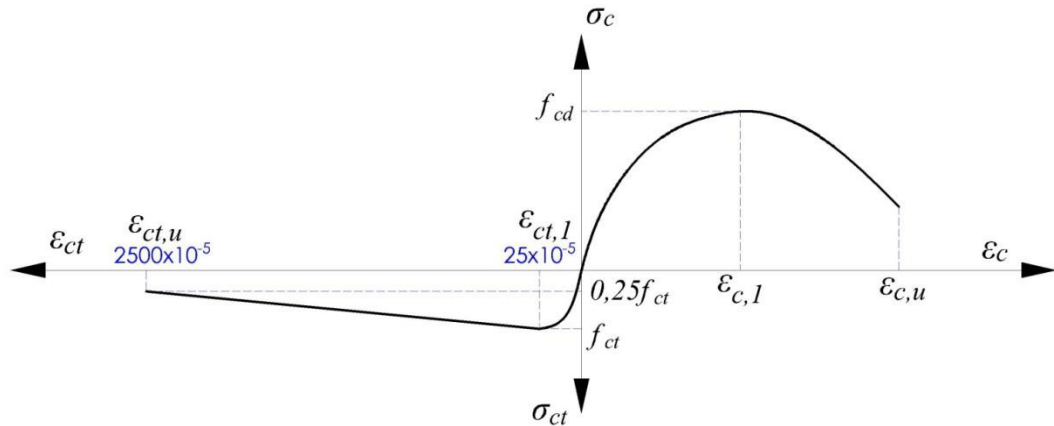


Рисунок 11 – Діаграма деформування сталевібробетону при стиску та розтягу, що пропонується в методиці

Визначення параметрів напружено-деформованого стану нормальних перерізів комбіновано-армованих залізобетонних згинальних елементів виконується із урахуванням наступних передумов:

- для перерізів вважається справедливою гіпотеза про лінійний розподіл деформацій по висоті;
- деформації арматури та сталевібробетону, що її оточує, однакові при стиску і при розтягу;
- зв'язок між напруженнями та деформаціями стиснутого та розтягнутого сталевібробетону приймається у вигляді діаграм, що наведені на (рис. 11) та (рис. 12).

Залежність між напруженнями в сталевібробетоні σ_c і деформаціями ε_c описується наступними рівняннями:

Напруження при стиску:

$$\sigma_c = f_{cd} \sum_{k=1}^5 a_k \eta_c^k. \quad (1)$$

Напруження при розтягу на висхідній вітці:

$$\sigma_{ct1} = f_{ctd} \sum_{k=1}^5 a_k \eta_t^k. \quad (2)$$

Напруження при розтягу на низхідній вітці:

$$\sigma_{ct2} = f_{ctd} (1,525 - 210\varepsilon_{ct}). \quad (3)$$

де $\eta_c = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c,l}}$, $\eta_t = \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{ct,l}}$, a_k – коефіцієнти полінома.

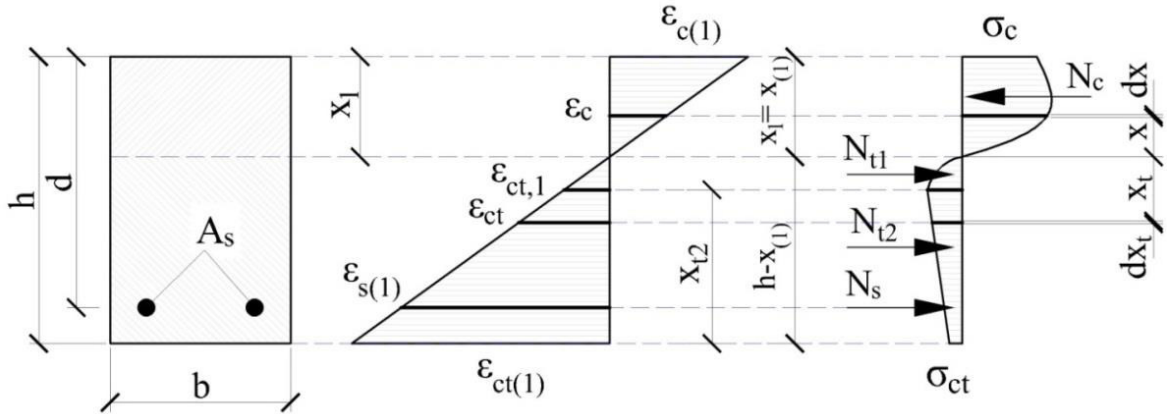


Рисунок 12 – Епюра деформацій та напружень поперечного перерізу згинальних елементів балкового типу

Для такого перерізу умова рівноваги записується у вигляді:

$$M_{Ed} \leq M_{s(1)} = M_{c(1)} + M_{s(1)} + M_{t1(1)} + M_{t2(1)}. \quad (4)$$

Рівновага внутрішніх зусиль забезпечується виконанням умови:

$$N_{c(1)} = N_{t1(1)} + N_{t2(1)} + N_{s(1)}. \quad (5)$$

За відомих деформацій у матеріалах, внутрішні сили в стиснутому бетоні прямокутного перерізу ($N_{c(1)}, M_{c(1)}$), розтягнутому бетоні на висхідній і низхідній вітках ($N_{t1(1)}, M_{t1(1)}, N_{t2(1)}, M_{t2(1)}$), та в арматурі ($N_{s(1)}, M_{s(1)}$) визначаються за наступними формулами:

$$N_{c(1)} = b \int_0^{x_{(1)}} \sigma_c dx = b \frac{x_{(1)}}{\varepsilon_{c(1)}} \int_0^{\varepsilon_{c(1)}} \sigma_c d\varepsilon_c = f_{cd} b x_{(1)} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_{c(1)}}{\varepsilon_{c,l}} \right)^k; \quad (6)$$

$$M_{c(1)} = b \int_0^{x_{(1)}} \sigma_c x dx = b \left(\frac{x_{(1)}}{\varepsilon_{c(1)}} \right)^2 \int_0^{\varepsilon_{c(1)}} \sigma_c \varepsilon_c d\varepsilon_c = f_{cd} b x_{(1)}^2 \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_{c(1)}}{\varepsilon_{c,l}} \right)^k; \quad (7)$$

$$N_{s(1)} = A_s \sigma_s = A_s E_s \varepsilon_{s(1)} = A_s E_s \frac{\varepsilon_{c(1)}}{x_{(1)}} (d - x_{(1)}); \quad (8)$$

$$M_{s(1)} = A_s E_s \frac{\varepsilon_{c(1)}}{x_{(1)}} (d - x_{(1)})^2; \quad (9)$$

$$N_{t1(1)} = b \frac{h - x_{(1)}}{\varepsilon_{ct(1)}} \int_0^{\varepsilon_{ct(1)}} \sigma_{ct1} d\varepsilon_{ct} = f_{ctd} b (h - x_{(1)}) \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_{ct(1)}}{\varepsilon_{ct,l}} \right)^k; \quad (10)$$

$$M_{t1(1)} = b \left(\frac{h - x_{(1)}}{\varepsilon_{ct(1)}} \right)^2 \int_0^{\varepsilon_{ct(1)}} \sigma_{ct1} \varepsilon_{ct} d\varepsilon_{ct} = f_{ctd} b (h - x_{(1)})^2 \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_{ct(1)}}{\varepsilon_{ct,l}} \right)^k. \quad (11)$$

При досягненні деформацій $\varepsilon_{ct(1)}$ рівних $\varepsilon_{ct(1)} > \varepsilon_{ct,l} = 0,00025$, зусилля в розтягнутій зоні в межах дії висхідної вітки визначаються за формулами:

$$N_{t1(1)} = f_{ctd} b (h - x_{(1)} - x_{t2}) \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1}; \quad (12)$$

$$M_{t1(1)} = f_{ctd} b (h - x_{(1)} - x_{t2})^2 \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2}. \quad (13)$$

Для низхідної вітки внутрішні сили визначаються за формулами:

$$N_{t2(1)} = f_{ctd} b \frac{h(1,0075(\varepsilon_{ct(1)} - \varepsilon_{ct,l}) - 15,15(\varepsilon_{ct(1)}^2 - \varepsilon_{ct,l}^2))}{\varepsilon_{c(1)} + \varepsilon_{ct(1)}}; \quad (14)$$

$$M_{t2(1)} = f_{ctd} b \frac{h^2(0,50375(\varepsilon_{ct(1)}^2 - \varepsilon_{ct,l}^2) - 10,1(\varepsilon_{ct(1)}^3 - \varepsilon_{ct,l}^3))}{(\varepsilon_{c(1)} + \varepsilon_{ct(1)})^2}. \quad (15)$$

Дані формули можна використовувати для визначення напружено-деформованого стану нормальних перерізів комбіновано-армованих згинальних елементів на будь-якій стадії навантаження та їх міцності. Задачі вирішуються методом послідовних наближень, підбираючи значення $\varepsilon_{c(1)}$ та значення $x_{(1)}$ таким чином, щоб задовольнялися рівняння рівноваги (4) і (5).

Також у роботі, пропонується спрощена методика для визначення несучої здатності нормальних перерізів комбіновано-армованих балок.

Значення несучої здатності згинальних фібробетонних елементів прямокутного перерізу з поздовжнім армуванням одиничною стержневою арматурою при $\xi = x_p / d \leq \xi_R$ визначається за виразом:

$$M_u = \eta f_{fc} b x_p (d - 0,5 \lambda x_p) + \eta_t k f_{fct} b (h - x_p) \left(\frac{h - x}{2} - a \right); \quad (16)$$

де $a = h - d$, для дрібнозернистого бетону; $\lambda = 0,7$; x_p – висота стиснутої зони за спрощеної прямокутної епюри напружень бетону фібробетонного елемента з поздовжнім армуванням визначається за формулою:

$$x_p = \frac{f_{yd} A_s + \eta_t k f_{fct} b h}{(\eta_t k f_{fct} h + \eta f_{fc}) b}. \quad (17)$$

При розрахунку несучої здатності та визначенні руйнівного навантаження на нерозрізні комбіновано-армовані балки, важливим є врахування перерозподілу зусиль, що неодмінно виникає в процесі розвитку пластичних деформацій при навантаженні балок. У роботі пропонується удосконалений метод визначення згинальних моментів у комбіновано-армованих балках, із врахуванням більш пружної їх роботи на перших етапах навантаження.

На основі отриманих експериментальних даних для балок 2Б1, була встановлена поліноміальна залежність, що описує відхилення значень моментів при навантаженні балок в сторону більш пружної роботи.

Уточнені формули для визначення згинальних моментів для комбіновано-армованих балок із урахуванням перерозподілу зусиль мають наступний вигляд:

$$M_{p,sup} = M_{crc} + \frac{M_{u,pl} - M_{crc}}{M_{u,el} - M_{crc}} (M_{p,el} - M_{crc}) \left(1 + 1,3 \left(\frac{M_{p,el}}{M_{u,el}} \right) - 1,3 \left(\frac{M_{p,el}}{M_{u,el}} \right)^2 \right); \quad (18)$$

$$M_{p,sp} = M_{crc} + \frac{M_{u,pl} - M_{crc}}{M_{u,el} - M_{crc}} (M_{p,el} - M_{crc}) \left(1 + 1,3 \left(\frac{M_{p,el}}{M_{u,el}} \right) - 1,3 \left(\frac{M_{p,el}}{M_{u,el}} \right)^2 \right)^{-1}. \quad (19)$$

Середня величина похибки, при визначенні згинальних моментів за формулами (18), (19) складає $\bar{X} = 8,1 \%$ за середньоквадратичного відхилення $\sigma = 6,8 \%$.

Для дослідних балок було здійснено порівняння розрахунків за методикою, що наведена в ДСТУ - Н Б В.2.6 - 218:2016; за запропонованою методикою з врахуванням повних діаграм деформування СФБ; спрощеною інженерною методикою та ПК ЛІРА-САПР. Характерною особливістю методики розрахунку сталевібробетонних елементів згідно з ДСТУ є те, що розрахунковий опір сталевібробетону на стиск приймається рівним розрахунковому опору бетону матриці, який використовується для його отримання. На (рис. 13) представлено порівняння діаграм «момент – кривизна», побудованих на основі експериментально отриманих значень для балок 2Б1 та теоретично визначених за методикою ДСТУ та запропонованою деформаційною методикою. Результати визначення несучої здатності нормальних перерізів балок і порівняння з експериментальними даними наведені в (табл. 3).

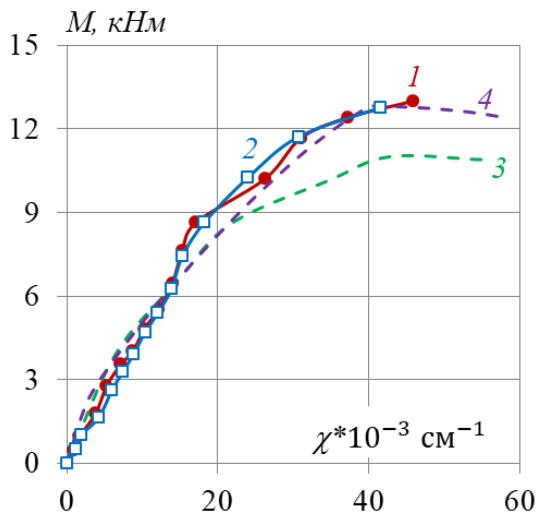


Рисунок 13 – Діаграма «момент – кривизна» для балок 2Б1:

- 1 – експериментальні дані балки 2Б1-1;
- 2 – експериментальні дані балки 2Б1-2;
- 3 – теоретичні за ДСТУ -Н Б В.2.6 - 218:2016;
- 4 – теоретичні за запропонованою деформаційною методикою

Таблиця 4 – Порівняння результатів розрахунку несучої здатності балок 2Б1

Марка зразка	M_u^{exp} , кН*м	M_u^1 , кН*м	M_u^2 , кН*м	M_u^3 , кН*м	M_u^4 , кН*м	M_u^1 / M_u^{exp}	M_u^2 / M_u^{exp}	M_u^3 / M_u^{exp}	M_u^4 / M_u^{exp}
2Б1-1	13,0	10,9	12,83	12,64	12,49	0,84	0,98	0,97	0,96
2Б1-2	12,77					0,85	1,004	0,99	0,98
2Б1-3	17,84	15,1	17,1	16,2	16,4	0,84	0,96	0,91	0,92

M_u^1 – руйнівне значення моменту, визначене за допомогою ДСТУ -Н Б В.2.6 - 218:2016;
 M_u^2 – руйнівне значення моменту, визначене за допомогою запропонованої деформаційної методики;
 M_u^3 – руйнівне значення моменту, визначене за допомогою спрощеної інженерної методики;
 M_u^4 – руйнівне значення згинального моменту, визначене за допомогою ПК ЛІРА-САПР

При визначенні характеристик напружено-деформованого стану, запропонована деформаційна методика з врахуванням повних діаграм деформування бетону при стиску та розтягу показує кращу збіжність порівняно з методикою ДСТУ -Н Б В.2.6 - 218:2016. Очевидно, що визначення міцності бетону стиснутої зони, як міцності цементно-піщаної матриці, призводить до занижених значень згинальних моментів, а також завищеної кривизни. Середнє відношення теоретичних руйнівних згинальних моментів до експериментальних становить $k_m = 0,98$ ($\sigma = 1,8 \%$) для запропонованої деформаційної методики, $k_m = 0,843$ ($\sigma = 0,7 \%$) для методики за ДСТУ і $k_m = 0,95$ ($\sigma = 3 \%$) для результатів, визначених за допомогою ПК ЛІРА. Також добру збіжність із експериментальними даними, показують результати, визначені за допомогою запропонованої інженерної методики. Середнє відношення теоретичних руйнівних згинальних моментів визначених за її допомогою до експериментальних, становить $k_m = 0,95$ ($\sigma = 4,1 \%$).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційної роботи вирішено наукове завдання із встановлення особливостей напружено-деформованого стану нерозрізних комбіновано-армованих залізобетонних балок при дії короточасних одноразових навантажень. У підсумку проведених експериментальних та теоретичних досліджень сформульоване наступне:

1. Отримані нові експериментальні дані про роботу нерозрізних комбіновано-армованих залізобетонних балок, що дали можливість виявити особливості напружено-деформованого стану нормальних перерізів, перерозподілу зусиль, розвитку прогинів та нормальних тріщин.

2. Встановлено, що додаткове дисперсне армування сталевую фіброю бетонної матриці балок, із відсотком дисперсного армування $\mu_{fv} = 1 \%$, підвищує їх несучу здатність на 17...20 % та призводить до зменшення прогинів на 12...36 % і ширини розкриття тріщин на 35...55 %, у порівнянні з типовими залізобетонними балками.

3. Досліджено характер перерозподілу зусиль у нерозрізних комбіновано-армованих балках на всіх стадіях їх роботи. Встановлено, що перерозподіл зусиль на ранніх етапах навантаження (за рахунок тріщиноутворення) у нерозрізних балках із додатковим дисперсним армування по всьому об'єму, виражений на 30...50 % менше ніж у балок із додатковим дисперсним армуванням лише розтягнутих зон.

4. У комбіновано-армованих балках із дисперсним армуванням по всьому об'єму, відбувся повний перерозподіл зусиль, а активна його фаза наступала за рівня навантаження 70...80 % від руйнівного та при досягненні в арматурі та бетоні над середньою опорою максимальних значень напружень.

5. Встановлено, що в нерозрізних комбіновано-армованих балках із дрібнозернистого бетону, відсутність сталевих фібр у стиснутій зоні прольотних перерізів, і відповідно нижча міцність матриці, призводить до збільшення деформацій бетону, кривизни прольотних та опорних перерізів та зменшення несучої здатності балки на 10...15 % в порівнянні з балками із дисперсним армуванням по всьому об'єму.

6. Встановлено, що в комбіновано-армованих балках максимально допустима ширина розкриття тріщин ($w_k = 0,4$ мм) в усіх зразках спостерігалася лише в опорних зонах, при навантаженнях близьких до руйнівного. Значне збільшення швидкості приросту ширини розкриття тріщин спостерігалася при досягненні $w_k = 0,2$ мм.

7. Запропоновано алгоритм моделювання роботи та розрахунку комбіновано-армованих нерозрізних балок методом скінченних елементів за допомогою ПК ЛІРА-САПР з врахуванням фізичної нелінійності матеріалу. Значення похибки при порівнянні результатів отриманих за допомогою ПК ЛІРА із експериментальними становить $\bar{X} = 4,8$ % за середньоквадратичного відхилення $\sigma = 1,6$ %.

8. Запропонована методика визначення параметрів напружено-деформованого стану та несучої здатності нормальних перерізів комбіновано-армованих залізобетонних балок на основі деформаційної моделі із врахуванням повних діаграм роботи СФБ. Середнє відношення отриманих теоретичних значень граничних згинальних моментів, визначених за допомогою методики, до експериментальних складає $k_m = 0,98$ та $\sigma = 1,8$ %.

9. Запропоновано інженерну методику розрахунку несучої здатності нормальних перерізів комбіновано-армованих залізобетонних балок із врахуванням спрощених діаграм деформування бетону із високою збіжністю із експериментальними даними. Середня величина похибки становить $\bar{X} = 5$ %, за середньоквадратичного відхилення $\sigma = 4,1$ %.

10. Удосконалено методику визначення величини згинальних моментів у нерозрізних комбіновано-армованих балках із урахуванням перерозподілу зусиль. Середнє значення похибки складає $\bar{X} = 8,1$ % ($\sigma = 6,8$ %).

11. Загалом, виконані експериментально-теоретичні дослідження підтвердили ефективність додаткового дисперсного армування сталевую фіброю нерозрізних залізобетонних балок. Використання додаткового дисперсного армування бетону у поєднанні зі стержневою арматурою дозволяє збільшити несучу здатність та жорсткість нерозрізних комбіновано-армованих залізобетонних балок та зменшити ширину розкриття тріщин.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Андрійчук О. В., Нінічук М. В. Тріщиностійкість нерозрізних комбіновано-армованих залізобетонних балок із різними типами армування сталевими фібрами. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2019. Вип. 37. С. 97-105 (*Особистий внесок автора: експериментальні дослідження тріщиностійкості нерозрізних комбіновано-армованих балок, оброблення і аналіз результатів*).

2. Андрійчук О. В., Нінічук М. В. Експериментальні дослідження роботи стержневої арматури в перерізах комбіновано-армованих нерозрізних залізобетонних балок. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2019. Вип. 12. С. 3-12 (*Особистий внесок автора: аналіз результатів дослідження роботи арматури в комбіновано-армованих нерозрізних балках*).

3. Андрійчук О. В., Нінічук М. В. Теоретичне визначення характеристик напружено-деформованого стану та несучої здатності нормальних перерізів комбіновано-армованих згинальних елементів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2020. Вип. 14. С. 26-35 (*Особистий внесок автора: визначення характеристик НДС нерозрізних комбіновано-армованих балок, порівняння розрахунків із експериментальними даними*).

4. Андрійчук О. В., Кислюк Д. Я., Нінічук М. В. Визначення несучої здатності нормальних перерізів комбіновано-армованих сталевібробетонних згинальних елементів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2020. Вип. 13. С. 3-11 (*Особистий внесок автора: розрахунок міцності нормальних перерізів нерозрізних комбіновано-армованих балок, виконано порівняння з експериментальними даними*).

5. Нінічук М. В. Експериментальні дослідження роботи нерозрізних залізобетонних балок з різними способами армування. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2012. Вип. 24. С. 208-214 (*Особистий внесок автора: аналіз та порівняння роботи нерозрізних балок із різними типами армування*).

6. Нінічук М. В. Вплив способу армування сталевими фібрами нерозрізних залізобетонних балок на їх напружено-деформований стан. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2015. Вип. 31. С. 460-467 (*Особистий внесок автора: аналіз результатів експериментальних досліджень НДС нерозрізних комбіновано-армованих балок із різним способом додаткового дисперсного армування*).

7. Нінічук М. В. Вплив комбінованого армування на прогини нерозрізних залізобетонних балок. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2016. Вип. 32. С. 220-225 (*Особистий внесок автора: експериментальні дослідження прогинів комбіновано-армованих балок, аналіз та порівняння результатів випробувань балок із різним типом армування*).

Статті у наукових періодичних виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз:

8. Babych Y. M., Andriichuk O. V., Kysliuk D. Y., Savitskiy V. V., Ninichuk M. V. Results of experimental research of deformability and crack-resistance of two span continuous reinforced concrete beams with combined reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. 012043. DOI: 10.1088/1757-899X/708/1/012043 (Web of Science, Scopus) (*Особистий внесок автора: експериментально встановлені особливості деформативності та тріщиностійкості нерозрізних комбіновано-армованих балок*).

9. Babych Y. M., Andriichuk O. V., Kysliuk D. Y., Ninichuk M. V. Experimental Research of Strength Characteristics of Continuous Reinforced Concrete Beams with Combined Reinforcement, and Modelling Their Work by the Finite Element Method. *Proceedings of EcoComfort 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 100. P. 18–25 DOI: 10.1007/978-3-030-57340-9_3 (Scopus) (*Особистий внесок автора: моделювання роботи нерозрізних комбіновано-армованих балок методом скінчених елементів*).

АНОТАЦІЯ

Нінічук М.В. Напружено-деформований стан та розрахунок комбіновано-армованих нерозрізних залізобетонних балок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, 2020.

Дисертація присвячена дослідженню напружено-деформованого стану нерозрізних комбіновано-армованих залізобетонних балок при дії одноразових короткочасних навантажень.

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що нерозрізні комбіновано-армовані балки із додатковим дисперсним армуванням сталевую фіброю, при одноразових навантаженнях за показниками деформативності, тріщиностійкості та несучої здатності перевищують відповідні показники типових залізобетонних балок. Також встановлений більш пружний характер роботи комбіновано-армованих балок. Проведено моделювання роботи комбіновано-армованих балок методом скінчених елементів. Удосконалено деформаційну методику розрахунку комбіновано армованих конструкцій із врахуванням повних діаграм роботи сталевібробетону на розтяг та методику визначення величин згинальних моментів із врахуванням перерозподілу зусиль. Запропоновано спрощену інженерну методику розрахунку несучої здатності нормальних перерізів комбіновано армованих балок.

Ключові слова: залізобетон, сталевібробетон, нерозрізна балка, напружено-деформований стан, тріщиностійкість, перерозподіл зусиль.

АННОТАЦИЯ

Ниничук М.В. Напряженно-деформированное состояние и расчет комбинированно-армированных неразрезных железобетонных балок. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения. – Национальный университет водного хозяйства и природопользования, Ровно, 2020.

Диссертация посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния неразрезных комбинированно-армированных железобетонных балок при действии одноразовых кратковременных нагрузок.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что неразрезные комбинированно-армированные балки с дополнительным дисперсным армированием стальной фиброй, при однократных нагрузках по показателям деформативности, трещиностойкости и несущей способности превышают соответствующие показатели типовых железобетонных балок. Также установлен более упругий характер работы комбинированно-армированных балок. Проведено моделирование работы комбинированно-армированных балок методом конечных элементов. Усовершенствована деформационная методика расчета комбинированно армированных конструкций с учетом полных диаграм работы сталевібробетона на

растяжение и методика определения величин изгибающих моментов с учетом перераспределения усилий. Предложено упрощенную инженерную методику расчета несущей способности нормальных сечений комбинированно армированных балок.

Ключевые слова: железобетон, сталефибробетон, неразрезная балка, напряженно-деформированное состояние, трещиностойкость, перераспределение усилий.

ABSTRACT

Ninichuk MV Stress-strain state and calculation of combined-reinforced inseparable reinforced concrete beams. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.23.01 – Building constructions, buildings and constructions. – National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, 2020.

The dissertation is devoted to the research of the stress - strain state of inseparable combined reinforced concrete beams.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, formulates the purpose and objectives of the study, notes the scientific novelty, practical value and results of the work.

In the first section the areas of application of inseparable reinforced concrete beams and their advantages over other beam constructions are considered. The analysis of existing methods of their calculation is carried out. The issues of research of reinforced concrete and its application in statically indeterminate reinforced concrete structures and methods of calculation of structures based on it are considered. The tasks and the purpose of the given dissertation work are defined.

The second section is devoted to the development of methods and programs of experimental studies of stress-strain state, load-bearing capacity, crack resistance and the nature of force redistribution in its inseparable combined-reinforced beams, with different types of additional dispersed reinforcement under a single load. Characteristics are established, constructive schemes of prototypes and methods of their testing are developed.

The third section is devoted to a thorough analysis of the results of experimental studies of combined-reinforced continuous reinforced concrete beams with different types of additional disperse reinforcement. The bearing capacity of the samples, deformation of concrete and reinforcement, deflections, width of cracks and the nature of the redistribution of forces under the action of a single short-term load are compared. It is established that the inseparable combined-reinforced beams with additional dispersed reinforcement by steel fiber, at one-time loadings on indicators of deformability, crack resistance and bearing capacity exceed corresponding indicators of typical reinforced concrete beams and at the same time reduce costs of materials for their production at all load levels.

In the fourth section the simulation of the work of combined-reinforced beams by the finite element method is carried out, the theoretical data are compared with the experimental ones. The deformation method of calculation of combined normal cross-

sections of combined-reinforced structures is improved taking into account the full work of tensile steel, and the method of determining the values of bending moments taking into account the redistribution of forces. A simplified engineering method for calculating the bearing capacity of normal sections of combined reinforced beams is proposed.

Key words: reinforced concrete, reinforced concrete, continuous beam, stress-strain state, crack resistance, redistribution of forces. The comparison of theoretical and experimental data is performed

Інформаційно-видавничий відділ
Луцького національного технічного університету
Свідоцтво Деркомтелерадіо України ДК № 4123 від 28.07.2011
Підписано до друку __.__.____ р.
Папір офсетний. Гарнітура Times. Друк RISO.
Ум. друк. арк. 0,7. обл.-вид. арк. 0,6.
Формат 60x84 1/16 Тираж 100. Зам. № _