

УДК 624.01

МІЦНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ ЗОВНІШНЬО ПІДСИЛЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК

ЧЕКАНОВИЧ М.Г.^{1*}, *к.т.н., професор*
РОМАНЕНКО С.М.², *старший викладач, аспірант*
АНДРИЕВСКАЯ Я.П.³, *аспірант*

^{1*} Кафедра будівництва, Херсонський державний аграрний університет, вул. Рози Люксембург, 23, 730006, Херсон, Україна; моб. 0660131557; e-mail: chekanovych@mail.ru

² Кафедра будівництва, Херсонський державний аграрний університет, вул. Рози Люксембург, 23, 730006, Херсон, Україна; моб. 0958297341; e-mail: romanenko66@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0443-3896

³ Кафедра будівництва, Херсонський державний аграрний університет, вул. Рози Люксембург, 23, 730006, Херсон, Україна; моб. 0952193191; e-mail: yanaandrievska@ya.ru, ORCID ID: 0000-0003-3052-2515

Анотація. *Ціль.* Головною метою було визначення експериментальним шляхом параметрів міцності та напружено-деформованого стану залізобетонних балок, підсилені новою зовнішньою системою розтягнутих елементів. *Методика.* Розглянута саморегульована, проста і надійна нова конструкція балок, що ефективно підсилюються при дії на неї зовнішнього навантаження шляхом раціонального перерозподілу напружень між стисненою та розтягнутою зонами. При цьому система підсилення складається з гнучких елементів, що працюють на розтяг. Запропоноване конструктивне рішення регульовано-напруженої балки, яка містить залізобетонне тіло і зтяжку, закріплену по кінцях на балці, взаємодіючи посередині з натяжним елементом, що опирається на нижню грань балки, і поперечну зовнішню арматуру, взаємодіючи у припорних зонах балки з верхньою і нижньою її гранями, а в середній частині взаємодіючи з зтяжкою. Поперечна арматура розтягнута, гнучка і розташована дзеркально симетрично в припорних зонах балки з нахилом поздовжньої осі балки. Поперечна арматура балки, закріплена одним кінцем на верхній грані балки ближче до її середини з обмеженням зміщення до середини, а іншим кінцем на нижній грані балки ближче до її опор з обмеженням зміщення до опор і з можливістю поздовжнього розтягу верхньої грані балки і обтиску нижньої її грані та поперечного стиску припорних зон. В середній частині поперечна арматура взаємодіє з зтяжкою. *Результати.* Проведені експериментальні дослідження міцності та деформативності звичайних невідсилені залізобетонних балок та балок, підсилені поздовжньо-поперечною зовнішньою системою; проаналізовані результати, отримані після експериментальних досліджень звичайних невідсилені залізобетонних балок та балок, підсилені поздовжньо-поперечною зовнішньою системою; виконано порівняння результатів експериментальних досліджень; визначена ефективність підсилення залізобетонних балок поздовжньо-поперечною зовнішньою системою арматурних стрижнів. Приведені результати експериментального порівняння роботи під навантаженням згинаних залізобетонних елементів підсилені саморегульованою зтяжкою зі звичайною залізобетонною балкою. *Научна новизна.* Після проведених випробувань було встановлено, що підсилені балка БПС-II витримала навантаження в 1,24 рази більше, а балка БПП-II витримала навантаження в 1,16 рази більше ніж звичайна балка. При цьому підсилені балки були жорсткіші за звичайну балку.

Ключові слова: зовнішня арматура, переріз, напруження, деформації, міцність.

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ВНЕШНЕ УСИЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК

ЧЕКАНОВИЧ М.Г.^{1*}, *к.т.н., професор*
РОМАНЕНКО С.М.², *старший преподаватель, аспирант*
АНДРИЕВСКАЯ Я.П.³, *аспирант*

^{1*} Кафедра строительства, Херсонский государственный аграрный университет, ул. Розы Люксембург, 23, 730006, Херсон, Украина; моб. 0660131557; e-mail: chekanovych@mail.ru

² Кафедра строительства, Херсонский государственный аграрный университет, ул. Розы Люксембург, 23, 730006, Херсон, Украина; моб. 0958297341, e-mail: romanenko66@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0443-3896

³ Кафедра строительства, Херсонский государственный аграрный университет, ул. Розы Люксембург, 23, 730006, Херсон, Украина; моб. 0952193191; e-mail: yanaandrievska@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0003-3052-2515

Аннотация. *Цель.* Главной целью было определение экспериментальным путем параметров прочности и напряженно - деформированного состояния железобетонных балок, усиленных новой внешней системой растянутых элементов. *Методика.* Рассмотрена саморегулированная, простая и надежная новая конструкция балок, которая эффективно усиливаются при действии на нее внешней нагрузки путем рационального перераспределения напряжений между сжатой и растянутой зонами. При этом система усиления состоит из гибких элементов, которые работают на растяжение. Предложенное конструктивное решение регулируемо-напряженной балки, которая содержит железобетонное тело и затяжку, закрепленное по концам на балке, взаимодействующую посередине с натяжным элементом, который опирается на нижнюю грань балки, и поперечную внешнюю арматуру, взаимодействующую в приопорных зонах балки с верхней и нижней ее гранями, а в средней части взаимодействующую с затяжкой. Поперечная арматура растянутая, гибкая и расположенная зеркально симметрично в приопорных зонах балки с наклоном продольной оси балки. Поперечная арматура балки, закрепленная одним концом на верхней грани балки ближе к ее середине с ограничением смещения к середине, а другим концом на нижней грани балки ближе к ее опорам с ограничением смещения к опорам и с возможностью продольного растяжения верхней грани балки и сжатия нижней ее грани и поперечного сжатия приопорных зон. В средней части поперечная арматура взаимодействует с затяжкой. *Результаты.* Проведенные экспериментальные исследования прочности и деформативности обычных не усиленных железобетонных балок и балок, усиленных продольно-поперечной внешней системой; проанализированы результаты, полученные после экспериментальных исследований обычных не усиленных железобетонных балок и балок, усиленных продольно-поперечной внешней системой; выполнено сравнение результатов экспериментальных исследований; определена эффективность усиления железобетонных балок продольно-поперечной внешней системой арматурных стержней. Приведенные результаты экспериментального сравнения работы под нагрузкой изгибаемых железобетонных элементов усиленных саморегулированной затяжкой с обычной железобетонной балкой. *Научная новизна.* После проведенных испытаний было установлено, что усиленная балка БПС-II выдержала нагрузку в 1,24 раза больше, а балка БПП-II выдержала нагрузку в 1,16 раза больше чем обычная балка. При этом усиленные балки были более жесткими за обычные балки.

Ключевые слова: внешняя арматура, сечение, напряжение, деформации, прочность.

STRENGTH AND DEFORMABILITY OF EXTERNALLY STRENGTHENED REINFORCED CONCRETE BEAMS

CHEKANOVICH M.G. ^{1*}, *Ph.D., professor*
ROMANENKO S.N. ², *post-graduate student*
ANDRIEVSKA Y.P. ³, *post-graduate student*

^{1*} Department of building, Kherson State Agricultural University, Str. Rosa Luxemburg, 23, 73006, Kherson, Ukraine, tel. 0660131557; e-mail: chekanovych@mail.ru

² Department of building, Kherson State Agricultural University, Str. Rosa Luxemburg, 23, 73006, Kherson, Ukraine, tel. 0958297341, e-mail: romanenko66@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0443-3896

³ Department of building, Kherson State Agricultural University, Str. Rosa Luxemburg, 23, 73006, Kherson, Ukraine, tel. 0952193191; e-mail: yanaandrievska@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0003-3052-2515

Abstract. Purpose. The main objective was to determine experimentally the parameters of strength and stress - strain state of reinforced concrete beams reinforced with a new system of external tension members. **Methodology.** We consider the self-regulated, simple and reliable design of the new beams, which effectively enhanced by the action of an external load on it through the rational redistribution of stresses between the compressed and stretched zones. In this amplification system comprises flexible elements which operate in tension. The proposed design solution adjustable-intense beam that contains a reinforced concrete body and tightness, fixed at both ends on the beam cooperating in the middle of a tension element, which rests on the lower face of the beam, and a transverse outer armature cooperating in near the support zones beam with the top and bottom of its facets and a middle portion engaged with tightening. Transverse reinforcement stretched, flexible, and mirror symmetrically located in areas near the support beams inclined to the longitudinal axis of the beam. Transverse reinforcement beam fixed at one end on the upper face of the beam closer to its center with limited displacement towards the middle, and at the other end on the lower edge of the beam closer to its supports restricted displacement to the supports and longitudinally stretching the upper face of the beam and compressing the bottom thereof faces near the support compression and transverse zones. In the middle of the transverse reinforcement interacts with the tightening. **Findings.** The experimental study of strength and deformability of normal and reinforced concrete beams and girders, reinforced longitudinal-transverse external system; the results obtained after the experimental studies are not ordinary reinforced concrete beams and girders, reinforced longitudinal-transverse external system; the comparison of experimental results; determine the effectiveness of strengthening reinforced concrete beams longitudinal-transverse external system rebar. The results of experimental comparisons of the work load of bent reinforced concrete elements of self-regulation tightening with the conventional reinforced concrete beam. **Originality.** After tests it was found that reinforced beam БПС-II withstood a load of 1,24 times greater and БПП-II beam withstood a load of 1,16 times more than a regular bar. This reinforced beams were tougher for ordinary beam.

Keywords: external reinforcement, cross-section, stress, strain, strength.

Стан питання та задачі дослідження.

Оскільки серед будівельних конструкцій, які використовуються при зведенні промислових та цивільних будівель і споруд, переважають залізобетонні конструкції, то актуальне значення має їх ефективна робота і удосконалення підсилення таких конструкцій.

Внаслідок зміни навантажень або зниження несучої здатності будівельні конструкції потребують підсилення, яке забезпечить достатню роботоздатність та надійність в умовах нормальної експлуатації.

Відомим методом збільшення несучої здатності елементів на дію згинальних моментів є застосування горизонтальних, шпренгельних та комбінованих попередньо напружених зтяжок, розташованих вдовж нижньої фібри згинаного елемента [1-4]. Зовнішню арматуру у вигляді горизонтальної зтяжки застосовують в основному для сприйняття згинальних моментів та збільшення, відповідно, несучої здатності конструкції. При підсиленні шпренгельними і комбінованими зтяжками, окрім вище наведених зусиль, на елемент діють додаткові розвантажуючі зусилля в місцях перегинів тяжів, які взаємодіють з балкою. Згинані елементи залізобетонних конструкцій із зовнішнім армуванням у вигляді зтяжки перетворюються на позацентрово стиснуті, змінюючи одночасно свою початкову конструктивну схему. Науковою та конструкторсько-технологічною основою застосування таких напружених конструкцій у будівництві є дослідження вітчизняних та зарубіжних авторів: О. Л. Шагіна, Г. І. Бердичівського, А. А. Гвоздева, А. Б. Голишева, Ф. Леонгардта, В. В. Михайлова, Е. Г. Ратца, Е. Фрейсіне, С. М. Бабіча, А. М. Бамбури, В. Г. Кваші, Н. М. Онуфрієва, Ф. Є. Клименко, Н.В.Савицького, Л. Н. Фомиці, В. О. Воблих, М. Ю. Избаша, С. О. Гриневица, І. Я. Лучковського, Richard W. Plavidal, Thomas Keller, Цзян Де, Ф. С. Замалієвим та ін.

У роботах запропоновані і досліджені ефективні способи підсилення, попереднього напруження залізобетонних конструкцій. Проведений аналіз існуючих досліджень показує, що до ефективних методів підсилення конструкцій відноситься спосіб локального попереднього напруження [5,6], що дозволяє виконувати попереднє напруження в будівельних умовах як для збірних так і для монолітних залізобетонних згинаних елементів.

Після розгляду багатьох схем підсилення до їх недоліків можна віднести неможливість ефективного розвантаження стиснутої зони бетону балки, що суттєво впливає на загальну і несучу здатність.

Постановка мети і задач досліджень.

Метою є визначення експериментальним шляхом параметрів міцності та напружено - деформованого стану залізобетонних балок, підсилених новою зовнішньою системою розтягнутих елементів.

Задачі дослідження:

- провести експериментальні дослідження міцності та деформативності звичайних невідсиленних залізобетонних балок та балок, підсилених поздовжньо-поперечною зовнішньою системою;
- проаналізувати результати, отримані після експериментальних досліджень звичайних невідсиленних залізобетонних балок та балок, підсилених поздовжньо-поперечною зовнішньою системою;
- порівняти результати експериментальних досліджень;
- визначити ефективність підсилення залізобетонних балок поздовжньо-поперечною зовнішньою системою арматурних стрижнів.

Методика досліджень.

Для експериментальних досліджень було виготовлено серію зразків залізобетонних балок. Залізобетонні балки виконані з бетону класу С45/55 і армовані каркасами, виготовленими з арматури номінальним діаметром $\varnothing 6$ А240С.

Було виготовлено три серії балок: БО-І, БПП-ІІ, БПС-ІІ. Кожна серія включала дві «балки-близнюки». Балки були виготовлені прямокутного перерізу 200x100 мм довжиною 2100 мм.

Перша серія балок – БО-І виготовлена без підсилення як еталонна для порівняння.

Серії балок БПС і БПП були підсилені згідно патента [7]. Зовнішня система представлена двома варіантами підсилення балок БПП-ІІ та БПС-ІІ, які представлені на рис.1 і рис.2.

Запропоноване конструктивне рішення регульовано-напруженої балки, яка містить залізобетонне тіло і зтяжку, закріплену по кінцях на балці, взаємодіючу посередині з натяжним елементом, що опирається на нижню грань балки, і поперечну зовнішню арматуру, взаємодіючу у приопорних зонах балки з верхньою і нижньою її гранями, а в середній частині взаємодіючу з зтяжкою. Поперечна арматура розтягнута, гнучка і розташована дзеркально симетрично в приопорних зонах балки з нахилом поздовжньої осі балки. Поперечна арматура балки, закріплена одним кінцем на верхній грані балки ближче до її середини з обмеженням зміщення до середини, а іншим кінцем на нижній грані балки ближче до її опор з обмеженням зміщення до опор і з можливістю поздовжнього розтягу верхньої грані балки і обтиску нижньої її грані та поперечного стиску приопорних зон. В середній частині поперечна арматура взаємодіє з зтяжкою.

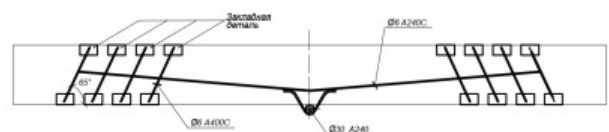


Рис. 1. Схема підсилення балки БПП-II-1 поздовжньою і поперечною паралельно розташованою зовнішньою арматурою

Scheme reinforcement beams БПП-II-1 longitudinal and transverse parallel spaced outer fittings

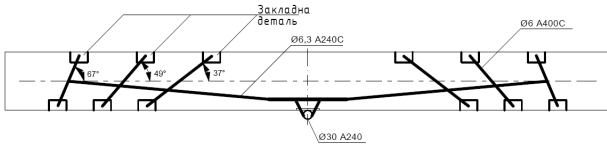


Рис. 2. Схема підсилення балки БПС-II-1 поздовжньою і поперечною похило розташованою зовнішньою арматурою

Scheme reinforcement beams БПС-II-1 longitudinal and transverse obliquely disposed external fittings

Програмою досліджень передбачено проведення випробування звичайної та підсиленіх балок, як вільно опертих по кінцях (рис. 3, 4 і 5). Навантаження конструкції балок здійснювалася домкратом механічної дії. Зовнішнє навантаження розподілялося сталеву траверсою на дві зосереджені сили, які прикладені в середній частині довжини прольоту.

Для визначення міцності і деформативності залізобетонних балок були проведені випробування. Схеми випробування дослідних зразків балок наведені на рис. 3,4,5.

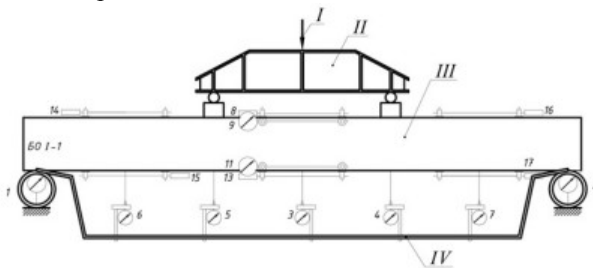


Рис. 3. Схема випробування звичайної балки серії БО-I: I – напрямок дії гвинтового домкрату; II – розподільча траверса; III – експериментальна балка; IV – рамка для кріплення прогиномірів; 1, 2 – динамометри; 3-7 – прогиноміри з ціною поділки 0,01 мм для вимірювання прогинів балки; 8-17 – індикатори з ціною поділки 0,001 мм для вимірювання деформації бетону

Scheme of the test normal beam series БО-I: I – The direction of the screw jack; II – distribution crossmember; III – experimental beam; IV – Frame of the mounting deflectometer; 1, 2 – dynamometers; 3-7 – deflectometer with the point value 0.01 mm to measure the beam deflection; 8-17 – indicators with the point value 0.001 mm to measure the deformation of concrete

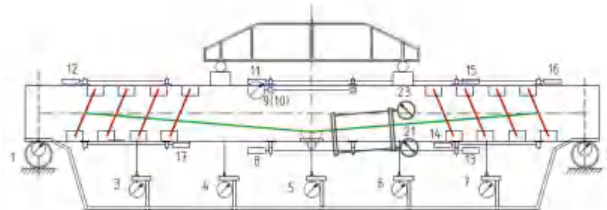


Рис. 4. Схема випробування підсиленої балки серії БПП-II: 1, 2 – динамометри; 3-7 – прогиноміри з ціною поділки 0,01 мм для вимірювання прогинів балки; 8-17 – індикатори з ціною поділки 0,001 мм для вимірювання деформації бетону

Scheme of the test series reinforced beams БПС-II: 1, 2 – dynamometers; 3-7 – deflectometer with the point value 0.01 mm to measure the beam deflection; 8-17 – indicators with the point value 0.001 mm to measure the deformation of concrete

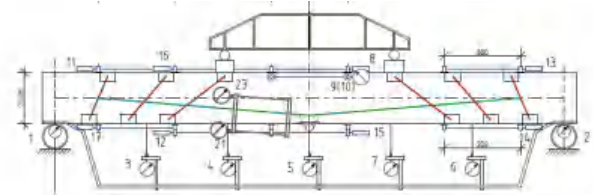


Рис. 5. Схема випробування підсиленої балки серії БПС-II: 1, 2 – динамометри; 3-7 – індикатори з ціною поділки 0,01 мм для вимірювання прогинів балки; 8-17 – індикатори з ціною поділки 0,001 мм для вимірювання деформації бетону

Scheme of the test series reinforced beams БПС-II: 1, 2 – dynamometers; 3-7 – deflectometer with the point value 0.01 mm to measure the beam deflection; 8-17 – indicators with the point value 0.001 mm to measure the deformation of concrete

Величину зовнішнього навантаження визначали за допомогою двох тарованих кільцевих динамометрів, розташованих на опорах балки.

Прогини балок фіксували за допомогою прогиномірів, прикріплених на спеціальну металеву рамку, з ціною поділки 0,01 мм. Деформації бетону вимірювали за допомогою індикаторів годинникового типу з ціною поділки 0,001 мм. Індикатори були розташовані на верхній і на нижній гранях балки та на бічних її поверхнях на відстані 15 мм.

Деформації арматури визначали за допомогою індикаторів годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм і 0,02 мм.

Протягом проведення експерименту спостерігали за тріщиноутворенням. Утворення тріщин виявляли за допомогою тензорезисторів і візуально, а ширину розкриття вимірювали за допомогою мікроскопа МПБ-2. При цьому встановили момент тріщиноутворення для дослідних балок.

Під зовнішнім навантаженням балка деформується і натяжний елемент відхиляє зтяжку донизу на величину максимального прогину. Суттєво зростає зусилля розтягу в зтяжці, яка стягує до середини зовнішню поперечну арматуру підсилення, закріплену на верхній і нижній фібрах балки в її приповерхневих зонах. Поперечна арматура розтягується. Взаємозв'язок поздовжньої арматури - зтяжки і поперечної арматури забезпечує саморегулювання напружень, а застосування натяжного елемента

сприяє більш чутливому реагуванню системи підсилення на зміну зовнішнього навантаження.

Результати досліджень. Згідно прийнятої методики проведення експериментальних досліджень несучої здатності і деформативності звичайних еталонних залізобетонних балок та підсилених балок досліджувався напружено-деформований стан нормальних перерізів під дією навантаження, визначалася несуча здатність та деформативність експериментальних зразків. Крім цього, відмічались характерні особливості розподілу деформацій по висоті перерізу і довжині елементів, а також інтенсивність росту прогинів. Після обробки

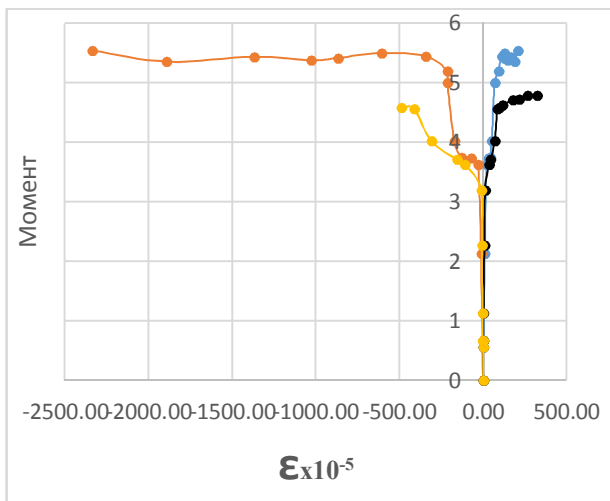


Рис. 6. Діаграми фібрових деформацій підсилених балок серії БПП-II і звичайної балки серії БО-I

Chart of the fibreboard strains reinforced beams series БПП-II and conventional beam series БО-I

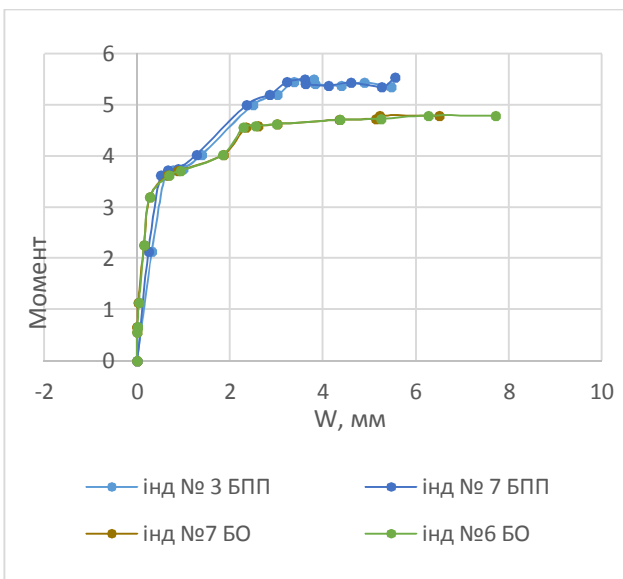


Рис. 7. Діаграми залежності прогинів від згинального моменту для балок серії БПП-II і БО-I

Diagrams depending deflections from bendings moment of beams for series БПП-II і БО-I

результатів випробувань досліджень балок були побудовані діаграми залежності деформацій від згинального моменту. На рис 6, 8 представлений експериментальні залежності фібрових деформацій верхньої і нижньої граней балок по середині прольотів від величини зовнішнього моменту. Залежність значення прогинів балок в результаті дії на них зовнішнього навантаження показана на рис. 7 і 9.

Для можливості порівняння результатів на кожному рисунку показана діаграма побудована для підсиленої і звичайної балки.

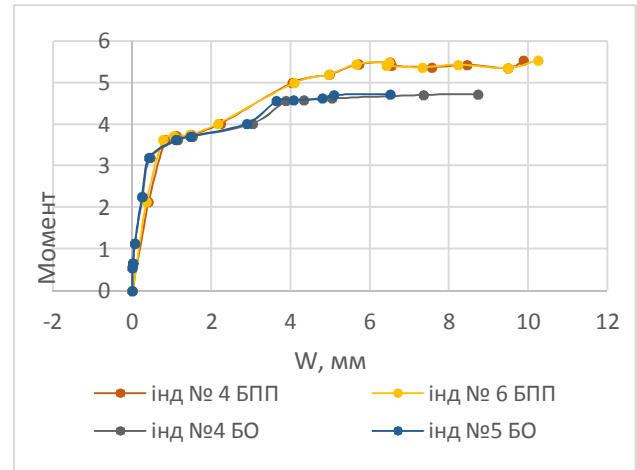


Рис. 8. Діаграми залежності прогинів від згинального моменту для балок серії БПП-II і БО-I

Diagrams depending deflections from bendings moment of beams for series БПП-II і БО-I

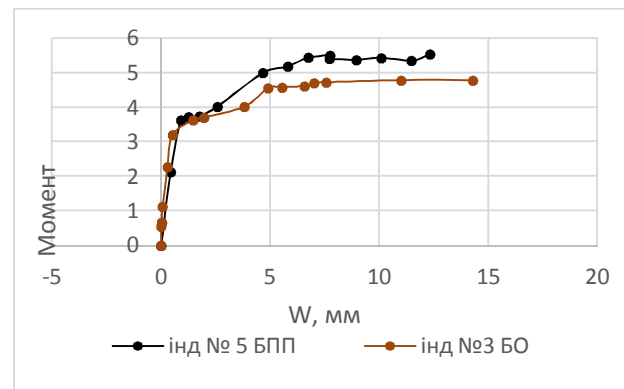


Рис. 9. Діаграми залежності прогинів від згинального моменту для балок серії БПП-II і БО-I

Diagrams depending deflections from bendings moment of beams for series БПП-II і БО-I

Основні результати випробування звичайних БО-I та підсилених балок БПС-II представлені у вигляді графіків залежності деформацій бетону та зовнішньої арматури від згинального моменту.

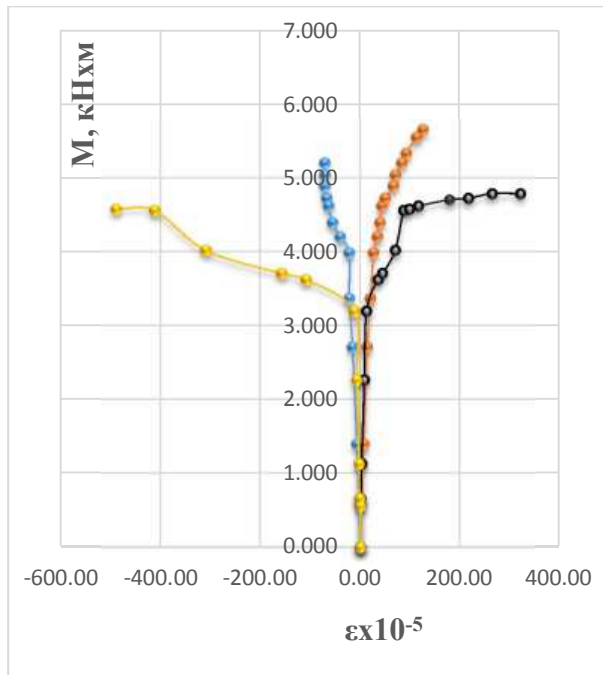


Рис. 10. Діаграми фібрових деформації підсилених балок серії БПС-II і звичайної балки серії БО-I

Chart of the fibreboard strains reinforced beams series БПС-II and conventional beam series БО-I

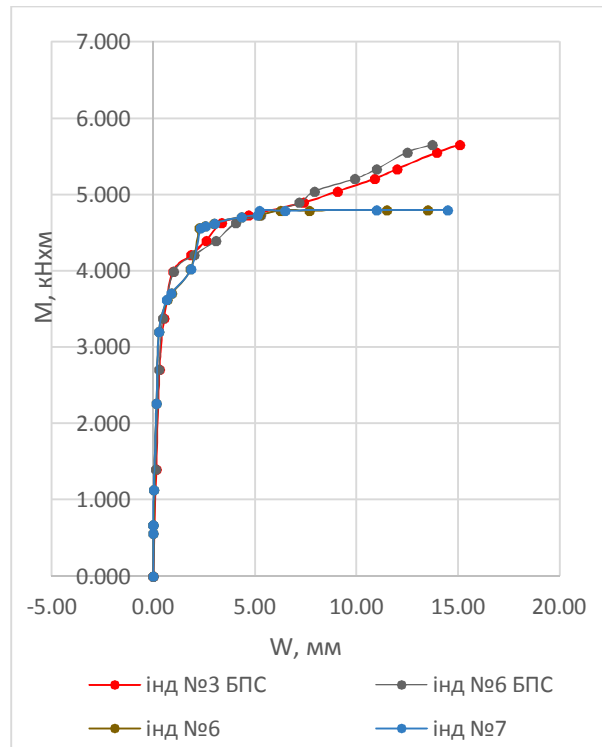


Рис. 12. Діаграми залежності прогинів від згинального моменту для балок серії БПС-II-1 і БО-I-1

Diagrams depending deflections from bendings moment of beams for series БПС-II-1 і БО-I-1

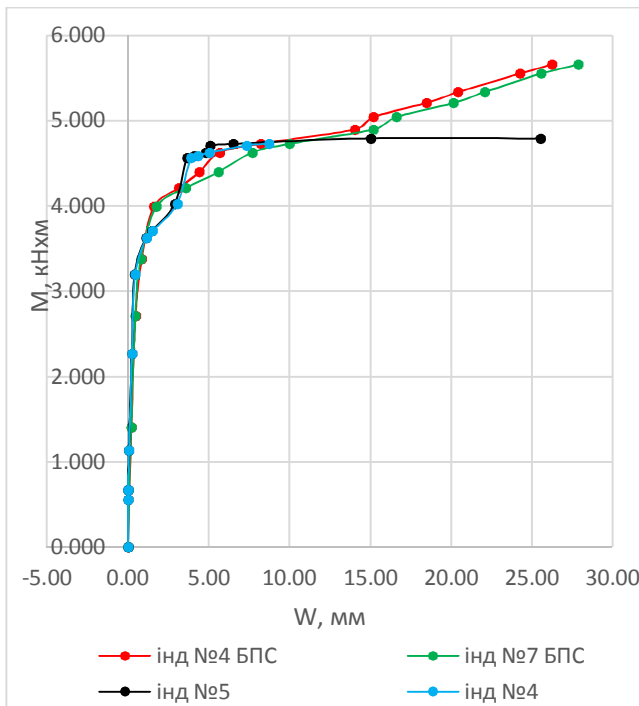


Рис. 11. Діаграми залежності прогинів від згинального моменту для балок серії БПС-II-1 і БО-I-1

Diagrams depending deflections from bendings moment of beams for series БПС-II-1 і БО-I-1

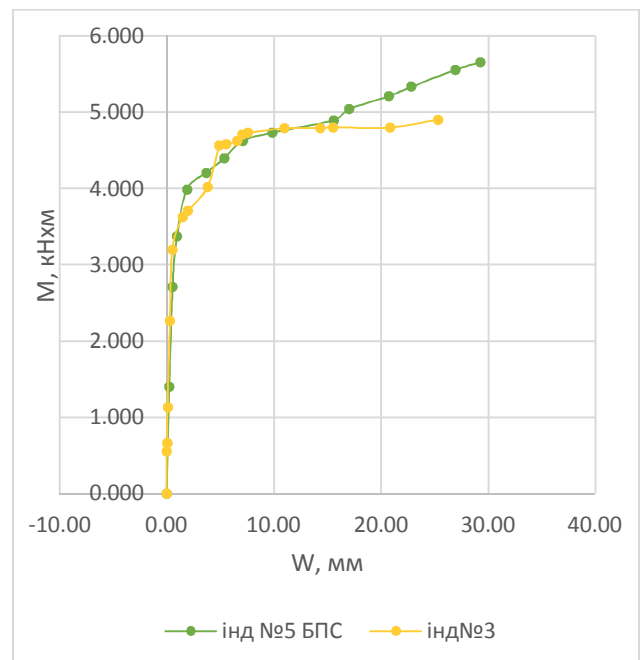


Рис. 13. Діаграми залежності прогинів від згинального моменту для балок серії БПС-II-1 і БО-I-1

Diagrams depending deflections from bendings moment of beams for series БПС-II-1 і БО-I-1

Задля порівняння результатів експериментальних та теоретичних досліджень виконано розрахунок поперечного перерізу звичайної та підсиленіх балок.

Розподіл деформацій, напружень та зусиль у нормальному перерізі для балок серії БО-I, БПС-II, та БПП-II наведено на рис. 14.

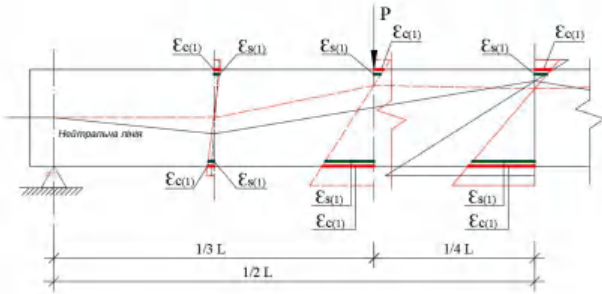


Рис. 14. Схема нейтральної лінії при навантаженні 6,031 кН на БО-I-1 та при навантаженні 6,03 кН на БПП-II-1: ----- нейтральна лінія балки БО-I-1; -.-.-.- нейтральна лінія БПП-II-1

Scheme of the neutral line under load 6,031 кН on БО-I-1 and under load 6,03 кН on БПП-II-1: ----- neutral line of the beam БО-I-1; -.-.-.- neutral line of the beam

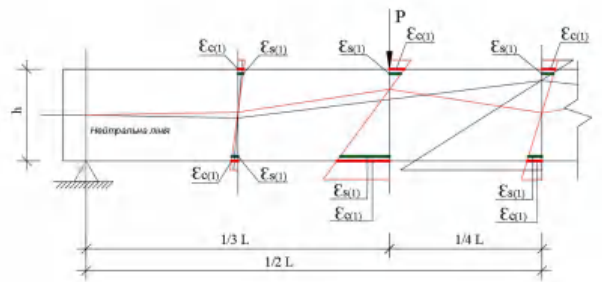


Рис. 15. Схема нейтральної лінії при навантаженні 6,031 кН на БО-I-1 та при навантаженні 6,063 кН на БПС-II-1: ----- нейтральна лінія балки БО-I-1; -.-.-.- нейтральна лінія БПС-II-1

Scheme of the neutral line under load 6,031 кН on БО-I-1 and under load 6,063 кН on БПС-II-1: ----- neutral line of the beam БО-I-1; -.-.-.- neutral line of the beam

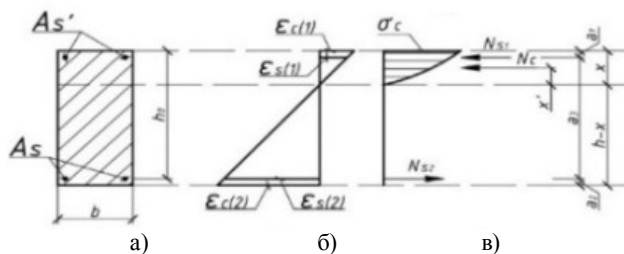


Рис. 16. Схема деформацій, напружень та зусиль в поперечному перерізі балки серій БО-I, БПС-II, БПП-II: а) схеми балок; б) поперечний переріз; в) епюра напружень; г) розрахункова схема зусиль

Scheme of the strain, stress and effort in cross-section beam series БО-I, БПС-II, БПП-II: а) schemes of the beams; б) cross-section; в) diagrams of stress; г) design scheme of the effort

Загальні рівняння рівноваги для перерізів підсиленої балки мають вигляд:

$$N = \int \sigma dA + \sum A_s \sigma_s + N_p \quad (1)$$

$$M = \int \sigma \cdot h dA + \sum A_s \sigma_s h + M_p \quad (2)$$

Параметри N_p і M_p для перерізу в середній третині прольоту визначаються виразами:

$$N_p = N_{1x} + N_{2x} + N_{3x} + \dots + N_{ix} - N'_{1x} - N'_{2x} - N'_{3x} - \dots - N'_{ix} \quad (3)$$

$$M_p = M_{N_1} + M_{N_2} + M_{N_3} + \dots + M_{N_i} + M'_{N'_1} + M'_{N'_2} + M'_{N'_3} + \dots + M'_{N'_i} + M_{roll} \quad (4)$$

$$M_{N_i} = N_{ix} e_{ix} - N_{iy} e_{iy} + N'_{ix} e'_{ix} + N'_{iy} e'_{iy} \quad (5)$$

де:

M_{roll} - момент від дії котка посередині балки;

N_{ix} - поздовжня складова від дії сили системи підсилення на верхню фібру балки;

N'_{ix} - поздовжня складова від дії сили системи підсилення на нижню фібру балки;

N_{iy} - вертикальна складова від дії сили системи підсилення на верхню фібру балки;

N'_{iy} - вертикальна складова від дії сили системи підсилення на нижню фібру балки;

e_{ix}, e_{iy} - ексцентриситети поздовжньої та вертикальної складової від дії сили системи підсилення на верхню фібру балки;

e'_{ix}, e'_{iy} - ексцентриситети поздовжньої та вертикальної складової від дії сили системи підсилення на нижню фібру балки.

Результати порівняння експериментальних даних роботи під навантаженням згинаних залізобетонних елементів підсиленіх саморегульованою затяжкою зі звичайною залізобетонною балкою представлені в табл.1,2.

Таблиця 1

Результати випробування балок

Results of test of beams

Найменування	M_{max} , кН·м	M_{cre} , кН·м	W_{cre} , мм	$W_{фик}$, мм при $(M=4,02 \text{ кН·м})$
Балка БО	4,79	3,20	0,738	3,82
Балка БПС	5,948	3,99	1,88	2,22
Балка БПП	5,542	3,75	1,75	2,57

Таблиця 2

Ефективність підсилення балок
Efficiency of strengthening of beams

Найменування	$M_{БПСmax} / M_{Б0max}$	$M_{БПСст} / M_{Б0ст}$	$W_{Б0ст} / W_{БПСст}$	$W_{Б0фак} / W_{БПСфак}$
БПС	1,242	1,25	2,55	1,72
БПП	1,16	1,17	2,37	1,49

Висновки У роботі запропонована саморегульована, проста і надійна нова конструкція

балок, що ефективно підсилюються при дії на неї зовнішнього навантаження шляхом раціонального перерозподілу напружень між стисненою та розтягнутою зонами за допомогою легких і гнучких елементів, що працюють на розтяг. За результатами проведених випробувань було встановлено, що підсилені балки серії БПС витримали навантаження на 24 % більше, а балки серії БПП витримали навантаження на 16% більше ніж звичайна балка. При цьому момент тріщиноутворення відповідно для цих балок збільшився на 25% і 17%. Деформативність підсилених балок була меншою порівняно з еталонною балкою і за величиною прогинів по центру прольоту на момент тріщиноутворення для балок серії БПС зменшилася у 2,55 рази, а для серії БПП у 2,37 рази.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гольшев А.Б., Ткаченко И.Н. Проектирование усиленных несущих железобетонных конструкций производственных зданий и сооружений. -К.:Логос, 2001.- 172с.
2. Рекомендации по проектированию усиления железобетонных конструкций зданий и сооружений реконструируемых предприятий / Е.А. Рабинович, Ю.Д. Кузнецов, Н.П. Рунцо (и др.) // . – Москва: Стройиздат, 1992. – 265 с.
3. Онуфриев Н.М. Усиление железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений. – Ленинград, 1965. - 342 с.
4. Чеканович М.Г. Дослідження роботи конструкції підсилення залізобетонних балок виконаної у вигляді взаємопов'язаних затяжки та розтяжки/ М.Г. Чеканович, О.М. Чеканович// Ресурсоекономні матеріали, конструкції та споруди: зб. наук. праць, вип. 20-Рівне,2010.
5. Шагин, А.Л. Локальное предварительное напряжение железобетонных и сталежелезобетонных конструкций / А.Л. Шагин // Юбилейные научные чтения по проблемам теории железобетона. Наука, технологии, производство: сб.тр. – М.: МИКХиС,2009. – С. 107 – 116.
6. Клименко С.В. Технічна експлуатація та реконструкція будівель і споруд: навчальний посібник/ С.В. Клименко. - К.: Центр навчальної літератури, 2004. - С. 171
7. Chekanovych M. High performance concrete structures Life cycle assessment, behaviour and properties of concrete and concrete structures. Proceeding of International Conference. 2004, Brno, Czech Republic, - с. 130-135.
8. Chekanovych M. Specificities of external regulated prestressing fib Symposium on Segmental Construction in Concrete. Proceeding of Symposium. November, 26 -29, 2004, New Deli, India, - p. 230 – 236.
9. Chekanovych M. Specificities of external regulated prestressing fib Symposium on Segmental Construction in Concrete. Proceeding of Symposium. November, 26 -29, 2004, New Deli, India, - p. 230 – 236.
10. Chekanovych M., Chekanovych O. Smart Reinforced Concrete Structures *fib* Symposium Keep Concrete Attractive. Proceeding of Symposium. May, 23 -25, 2005, Budapest, Hungary, - p. 201 – 206.
11. Chekanovych M. Self-Regulating Prestressing System Proceeding of Second *fib* Congress. 2006, Naples, Italy, - p. 230-238.
12. Regulating prestressing system Состояние современной строительной науки – 2006. / Сб. науч. трудов. – Полтава. Полтавский ЦНТЭИ.– 2006.- с. 74 – 82.
13. Патент № 87047 Україна, МПК E04C3/00. Регульованообтиснена залізобетонна балка/ Чеканович М.Г.; заявник і патентовласник: Чеканович М.Г - №а 200710856; заявл. 01.10.2007; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 11.
14. Патент № 109762 Україна, МПК E04C3/00. Нерозрізна балка / Чеканович М.Г.; заявник і патентовласник: Чеканович М.Г - №а 201413920; заявл. 25.12.2014; опубл. 25.09.2015, Бюл. № 18.
15. Shin, K.-J., S.-H. Lee, and T. H.-K. Kang. 2013. “External Posttensioning of Reinforced Concrete Beams Using a V-Shaped Steel Rod System.” ASCE Journal of Structural Engineering 140 (3). 04013067. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000824](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000824).

REFERENCES

1. Golishev A.B, Tkachenko IN Design of reinforcement of bearing structures of reinforced concrete industrial buildings and sooruzheniy.-K.: Logos, 2001.- 172с.
2. Recommendations for the design of reinforced concrete structures strengthening buildings reconstructed enterprises / EA Rabinovich, Yu Kuznetsov, NP Runtso (et al.) // . - Moscow: Stroyizdat, 1992. - 265 p.
3. Onufriev N.M Strengthening of reinforced concrete structures of industrial buildings and structures. - Leningrad, 1965. - 342 p.

4. Chekanovich M.G Doslidzhennya robots konstruktсії pidsilennya zalizobetonnih beams vikonanoi in viglyadi vzajemov'yazanih tightening that roztyazhki / MG Chekanovich, OM Chekanovich // Resursoekonomni materiali, konstruktсії that sporudi: ST. Sciences. Prace, VIP. 20 Rivne, 2010.
5. Shahin, A.L Local prestressed concrete and composite structures / AL Shahin // Jubilee Scientific Conference on the issues of reinforced concrete theory. Science, technology, and production: sb.tr. - M.: MIKHIS 2009. - S. 107 - 116.
6. Klimenko С.V. Tehnichna ekspluatatsiya that rekonstruktsiya budivel i sporud: The Teaching posibnik / С.V. Klimenko. - K.: Center navchalnoi literaturi, 2004. - S. 171
7. Chekanovych M. High performance concrete structures Life cycle assessment, behaviour and properties of concrete and concrete structures. Proceeding of International Conference. 2004, Brno, Czech Republic, - c. 130-135.
8. Chekanovych M. Specificities of external regulated prestressing fib Symposium on Segmental Construction in Concrete. Proceeding of Symposium. November, 26 -29, 2004, New Deli, India, - p. 230 – 236.
9. Chekanovych M. Specificities of external regulated prestressing fib Symposium on Segmental Construction in Concrete. Proceeding of Symposium. November, 26 -29, 2004, New Deli, India, - p. 230 – 236.
10. Chekanovych M., Chekanovych O. Smart Reinforced Concrete Structures *fib* Symposium Keep Concrete Attractive. Proceeding of Symposium. May, 23 -25, 2005, Budapest, Hungary, - p. 201 – 206.
11. Chekanovych M. Self-Regulating Prestressing System Proceeding of Second *fib* Congress. 2006, Naples, Italy, - p. 230-238.
12. Regulating prestressing system Состояние современной строительной науки – 2006. / Сб. науч. трудов. – Полтава. Полтавский ЦНТЭИ.– 2006.- с. 74 – 82.
13. Patent number 87047 UKRAINE, IPC E04S3 / 00. Regulovanoobtsnena zalizobetonna bar / Chekanovich MG.; zayavnik i patentovlasnik: Chekanovich MG - Wa 200710856; appl. 01.10.2007; publ. 10.06.2009, Bull. Number 11.
14. Patent number 109 762 UKRAINE, IPC E04S3 / 00. Nerozrizna bar / Chekanovich MG.; zayavnik i patentovlasnik: Chekanovich MG - Wa 201413920; appl. 25/12/2014; publ. 09.25.2015, Bull. Number 18.
15. Shin, K.-J., S.-H. Lee, and T. H.-K. Kang. 2013. "External Posttensioning of Reinforced Concrete Beams Using a V-Shaped Steel Rod System." *ASCE Journal of Structural Engineering* 140 (3). 04013067. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000824](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000824).

Статья поступила 26.04.2016 г.