

І. Р. Мацьопа, А. Я. Мури  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автомобільних доріг та мостів

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ІЗ КОМПОЗИТНОЮ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОЮ АРМАТУРОЮ

© Мацьопа І. Р., Мури А. Я., 2018

У залізобетонних конструкціях за значного впливу агресивного середовища застосування попередньо напруженої арматури є достатньо проблемним питанням. На даний час є багато рекомендацій щодо зменшення впливу агресивного середовища на корозійні процеси в арматурі, збільшення надійності конструкцій та терміну їх придатності до нормальної експлуатації. Одним із варіантів вирішення проблеми є застосування в ролі арматури неметалевих елементів (як внутрішньої стержневої арматури, так і у вигляді наклеюваної зовнішньої). Для покращення фізико-механічних характеристик конструкції рекомендується застосування попереднього напруження, при цьому актуальними є питання розрахунку і оптимального проектування будівельних конструкцій з неметалевою арматурою (FRP). В Україні одним з лідерів моделювання є програмний комплекс “Лира” – сучасний інструмент для чисельного дослідження міцності і стійкості конструкцій.

Ключові слова: залізобетонна балка, композитна арматура, попереднє напруження, програмний комплекс “Лира”, нелінійний розрахунок.

I. Matsopa, A. Muryn  
Lviv Polytechnic National University,  
Department of highways and bridges

## MODELLING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH PRETENSIONED FRP REINFORCEMENT

© Matsopa I., Muryn A., 2018

Traditional building materials are regularly improved, finding new operational characteristics and complementing the quality of technical parameters. For a long time and now as reinforcement of reinforced concrete elements is steel. Corrosion of steel and conductiveness, prompted researchers to improve the quality of reinforcement, as a result of which non-metallic composite reinforcement was created. Composite materials are a group of reinforcing bars that differ in the type of feedstock, consisting of two or more components. The first element is fibers from various types of raw materials, the second is a thermosetting or thermoplastic polymer (resin). After the binder is cured, strong rods are obtained. There are five types of composite non-metallic reinforcement: fiberglass, basalt plastic, carbon fiber, hybrid, glass reinforced polyethylene terephthalate. Non-metallic element as replacements for internal rod, and gluing to the surface of reinforced concrete structures of composite tapes or fabrics. To improve the physical and mechanical characteristics of the structure, recommended applied the previous tension, calculation and optimal design of building structures with non-metal reinforcement (FRP) are relevant. For modeling of building structures, software package in which the implemented finite element method are used, the most famous of them are Ansys, Femap, Nastran, Lira, Scad, the last two are Ukrainian

**developers. In Ukraine, one of the leaders is the software complex “Lira” – a modern tool for numerical investigation of strength and stability of structures. Accounting for the non-linear operation of the structure allows building adequate design schemes, identifying additional reserves of bearing capacity, reducing material consumption to ensure structural safety. When calculating structures, physical nonlinearity are distinguished, in the calculation of the nonlinear dependence between the components of generalized stresses and strains.**

**Key words: reinforced concrete beam, composite reinforcement, previous tension, software complex “Lira”, non-linear calculation.**

**Вступ.** Моделювання роботи будівельних конструкцій – це складний процес, спрямований на визначення напружено-деформованого стану конструкції та оптимального проектування. Сьогодні найбільшого поширення набули програмні комплекси, що використовують у розрахунковому процесорі метод скінченних елементів (МСЕ).

Особливістю роботи вітчизняного програмного комплексу “Лира” є задання такої розрахункової схеми, типів та кількості скінченних елементів, параметрів матеріалів тощо, за яких досягалися б результати розрахунків, максимально наближені до експериментальних.

**Огляд наукових джерел і публікацій.** У статті А. А. Дьячкової та В. Д. Кузнецова [1] описано особливості розрахунку залізобетонних плит, підсилених вуглецевими композитними матеріалами на основі скінченно-елементної моделі в ПК Scad Office із застосуванням ідеї попереднього напруження конструкції, реалізованої через режим “Монтаж”.

У публікації [2] автори провели комп’ютерне моделювання роботи залізобетонних балок без попереднього напруження, підсилених зовнішньою композитною арматурою, з метою отримання графіків прогинів і порівняння їх з експериментальними даними. За експлуатаційних рівнів навантаження похибка розрахунків не перевищувала 25 % у бік завищення теоретичних значень.

У дослідженні [3] автори проаналізували поведінку залізобетонних балок із попередньо напруженою стержневою FRP арматурою і визначили її залежність від деформативності матеріалів та рівня попереднього напруження. Подібні дослідження проводили і інші автори [4, 5].

Сьогодні проведено багато експериментально-теоретичних досліджень залізобетонних балок і плит, армованих композитною арматурою (FRP), які показали необхідність попереднього напруження для підвищення їхньої жорсткості і тріщиностійкості; здійснено чисельні спроби моделювання роботи таких конструкцій у програмних комплексах з реалізацією МСЕ, проте немає дослідження роботи залізобетонних балок з попередньо напруженою композитною арматурою у ПК “Лира”.

**Мета та завдання дослідження** полягає в розробленні розрахункової моделі залізобетонної балки з попередньо напруженою композитною арматурою у ПК “Лира” і отримання розрахованих величин прогинів такої конструкції, які відповідають з допустимою похибкою експериментальним даним інших авторів [3].

**Моделювання роботи конструкції.** У ПК “Лира” було змодельовано експериментальні зразки згідно [3], які являли собою прямокутні балки розміром 150 мм × 250 мм і довжиною 3100 мм. Використані стержні з вуглецевого волокна (CFRP) для створення попереднього напруження. На рис. 1 показані різні конфігурації експериментальних зразків балок.

Зразки відрізнялися кількістю стержнів CFRP (1 або 2), які були розташовані горизонтально (H) або вертикально (V), а також рівнем попереднього напруження (від 35 % до 70 %).

Балки випробовувалися на стенді з застосуванням двоточкової схеми прикладання навантаження для створення зони чистого згину, в процесі навантаження вимірювалися прогини в третинах і посередині прольоту (максимальне значення).

У ПК “Лира” розроблено 4 відповідні моделі таких балок. Переріз балок змодельовано у вигляді бруса висотою 25 см і шириною 15 см. Об’ємним скінченим елементам присвоєно кінцевий елемент № 236 – фізично нелінійний універсальний просторовий восьмивузловий

ізопараметричний КЕ, який призначений для розрахунку на міцність континуальних об'єктів і масивних просторових конструкцій з урахуванням фізичної нелінійності матеріалу.

Був змодельований універсальний поперечний переріз для всіх балок, показаний на рис. 2.

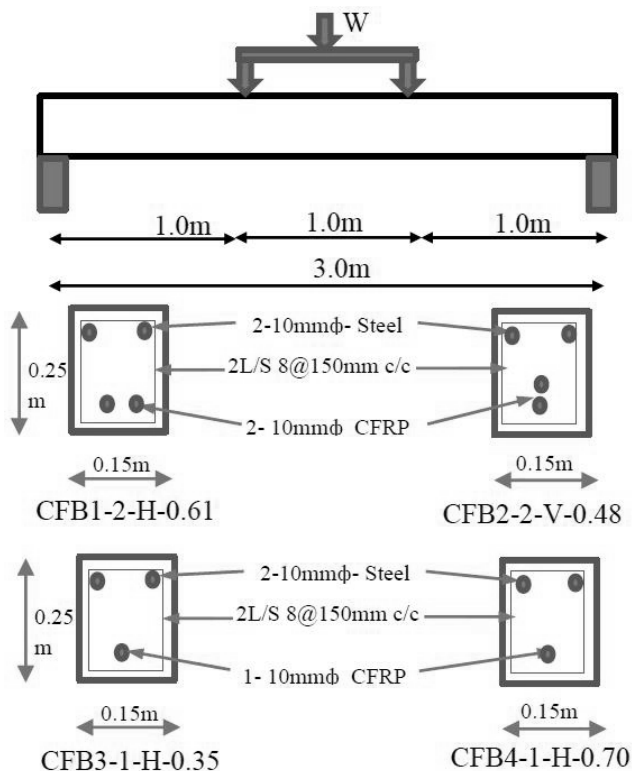


Рис. 1. Конструкція та армування експериментальних залізобетонних балок

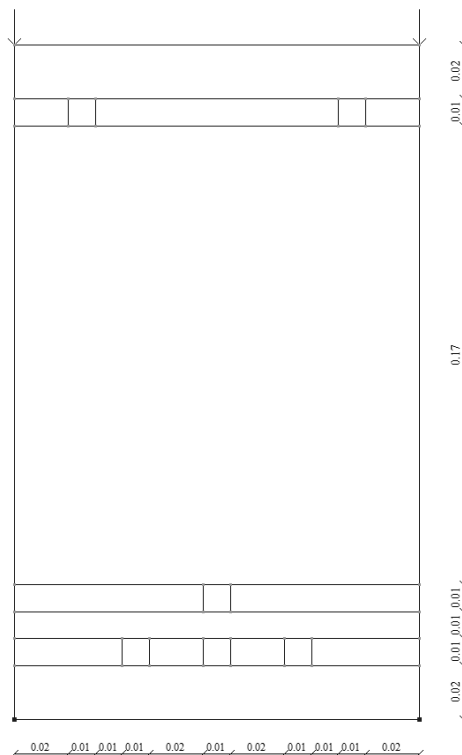


Рис. 2. Модель залізобетонної балки у ПК "Лира", проекція на площину YOZ

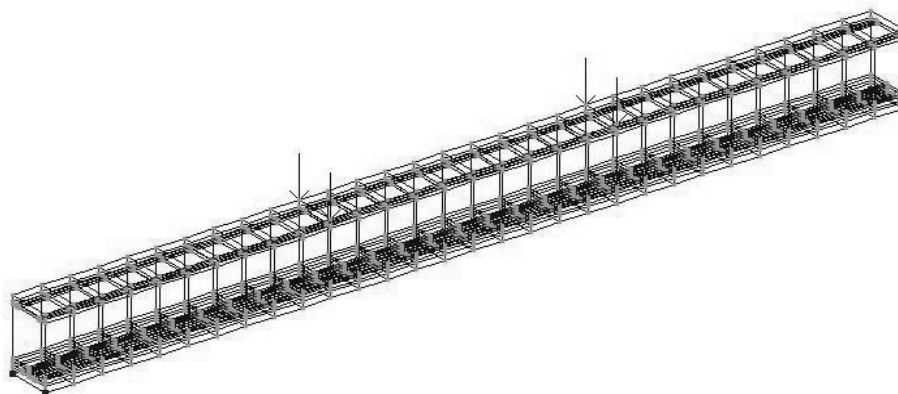


Рис. 3. Ізометрична проекція

Розбиття на елементи проводилося з урахуванням розмірів і розташування арматури в перерізі. У поздовжньому напрямку балка розбивалася на 30 частин по 10 см.

Для опису нелінійного деформування залізобетону використано 11 експоненціальний закон (рис. 4, 5). Згідно з рекомендаціями СП 52-103-2007 [4] (п. 6.2.7) модуль пружності бетону приймаємо таким, що дорівнює реальному модулю пружності бетону, помноженому на занижувальний коефіцієнт, який для цього випадку дорівнює 0,3.

Для опису деформування композитної арматури використано кусково-лінійний закон деформування (рис. 6), попередні дослідження авторів підтвердили таку залежність.

Зусилля попереднього напруження задавалося прикладанням горизонтальних сил на рівні центру ваги композитної арматури, що відповідають зусиллям попереднього натягу згідно з [3].

Законы нелинейного деформирования материалов

Основной материал

Закон нелинейного деформирования: 11 - экспоненциальный закон деформирования

№ записи: 1

Комментарий: С

Параметры закона нелинейного деформирования

Параметры	Значения	Единицы
$E_0(-)$	11580000	кН/м <sup>2</sup>
$E_0(+)$	11580000	кН/м <sup>2</sup>
$\sigma(-)$	-42910	кН/м <sup>2</sup>
$\sigma(+)$	3192	кН/м <sup>2</sup>
$\epsilon(-)$		
$\epsilon(+)$		
K		

Сохранить закон в файл

Текущий закон  Все законы проекта

Подтвердить Отменить Справка

Рис. 4. Закон деформирования бетона

Законы нелинейного деформирования материалов

Основной материал

Закон нелинейного деформирования: 11 - экспоненциальный закон деформирования

№ записи: 1

Комментарий: S

Параметры закона нелинейного деформирования

Параметры	Значения	Единицы
$E_0(-)$	200000000	кН/м <sup>2</sup>
$E_0(+)$	200000000	кН/м <sup>2</sup>
$\sigma(-)$	-500000	кН/м <sup>2</sup>
$\sigma(+)$	500000	кН/м <sup>2</sup>
$\epsilon(-)$		
$\epsilon(+)$		
K		

Сохранить закон в файл

Текущий закон  Все законы проекта

Подтвердить Отменить Справка

Рис. 5. Закон деформирования стальной арматуры

Законы нелинейного деформирования материалов

Основной материал

Закон нелинейного деформирования: 14 - кусочно-линейный закон деформирования

№ записи: 1

Комментарий:

Параметры закона нелинейного деформирования

Деформация	Напряжение	Единицы
-1	-124000000	кН/м <sup>2</sup>
1	124000000	кН/м <sup>2</sup>

Сохранить закон в файл

Текущий закон  Все законы проекта

Подтвердить Отменить Справка

Рис. 6. Закон деформирования композитной арматуры

Результати розрахунків балок у ПК “Ли́ра” у порівнянні із експериментальними даними [3], визначеними за методикою АСІ [3] та запропонованим методом розрахунку [3] наведено у таблиці.

### Результати дослідження прогинів залізобетонних балок

Тип балки	Максимальний прогин, мм				Похибка обчислень між результатом моделювання і експериментальним значенням, %
	АСІ метод [3]	Запропонований метод [3]	Експериментальне значення [3]	Результат моделювання в ПК “Ли́ра”	
CFB1-2-H-0.61	31.9	37.1	39	39.3	2.8
CFB2-2-V-0.48	40.2	43.9	44	44.5	4.1
CFB3-1-H-0.35	30.95	36.5	34.8	35.0	2.6
CFB4-1-H-0.70	11.8	21.2	22	22.1	2.3

Прогини, обчислені у ПК “Ли́ра”, відрізняються від експериментальних незначно, похибка розрахунку не перевищує 4,1 % у бік завищення теоретичних значень.

#### Висновки.

1. Моделювання залізобетонних балок з попередньо напруженою композитною арматурою у ПК “Ли́ра” є достатньо точним для використання його під час проектування таких конструкцій.
2. Отримані значення прогинів залізобетонних балок з попередньо напруженою композитною арматурою відповідають з задовільною похибкою експериментальним даним.

1. Дьячкова А. А. Расчет усиления железобетонных плит углеродными композиционными материалами / А. А. Дьячкова, В. Д. Кузнецов // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – № 3. – С. 25–28. 2. Мурын А. Я. Компьютерне моделювання роботи залізобетонних балок, підсиленх фібропластиковою арматурою / А. Я. Мурын, М. М. Іванів // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2012. – № 742: Теорія і практика будівництва. – С. 139–144. – Бібліографія: 4 назви. 3. Selvachandran P, Anandakumar S, Muthuramu K. Deflection Behavior of Prestressed Concrete Beam using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Tendon, *The Open Civil. Engineering Journal (New York)*, 2016, 10: 40–60. 4. Atutis M, Valivonis J, Atutis E. Experimental Study of Concrete Beams Prestressed with Basalt Fiber Reinforced Polymers. Part I: Flexural Behavior and Serviceability. *Composites Structures*, 2017. 5. Lou T, Lopes S, Lopes A A. Comparative study of continuous beams prestressed with bonded frp and steel tendons. *Composite Structures*, 2015, 124: 100–110.

#### References

1. D'yachkova A. A., Kuznetsov V. D. (2009), Calculation of reinforcement of reinforced concrete slabs by carbon composite materials. [*Raschet usileniya zhelezobetonnykh плит uglerodnymi kompozitsionnymi materialami*], *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*, No. 3, pp. 25–28. [in Russian]. 2. Muryn A. Ya., Ivaniv M. M. (2012), Computer modeling of reinforced concrete beams reinforced with fibro-plastic reinforcement. [*Komp'yuterne modelyuvannya roboty zalizobetonnykh balok, pidsylenykh fibroplastikovoyu armaturoyu*], *Visnyk Natsional'noho universytetu “L'vivs'ka politekhnika”*, No. 742, pp. 139–144. [in Ukrainian]. 3. Selvachandran P, Anandakumar S, Muthuramu K. (2016), “Deflection Behavior of Prestressed Concrete Beam using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Tendon”, *The Open Civil. Engineering Journal*, Vol. 10, pp. 40–60. 4. Atutis M, Valivonis J, Atutis E. (2018), “Experimental Study of Concrete Beams Prestressed with Basalt Fiber Reinforced Polymers. Part I: Flexural Behavior and Serviceability”, *Composites Structures*, Vol. 183, pp. 389–396. 5. Lou T, Lopes S, Lopes A. (2015), “Comparative study of continuous beams prestressed with bonded frp and steel tendons”, *Composites Structures*, Vol. 124, pp. 100–110.