

З. Я. Бліхарський, Р. Є. Хміль, Я. В. Римар\*, Б. М. Ковальчук, Р. Ю. Титаренко  
 Національний університет "Львівська політехніка",  
 кафедра будівельних конструкцій та мостів,  
 \*кафедра архітектурних конструкцій

## МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ НОРМАЛЬНИХ ПЕРЕТИНІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК, ПІДСИЛЕНИХ ДОДАТКОВОЮ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОЮ АРМАТУРОЮ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

© Бліхарський З. Я., Хміль Р. Є., Римар Я. В., Ковальчук Б. М., Титаренко Р. Ю., 2015

Наведено методику експериментальних випробувань залізобетонних балок, підсилених додатковою попередньо напруженою арматурою під навантаженням (при різних рівнях попереднього напруження та діючого навантаження), з відповідним контролем міцності нормальних перетинів та напруження додаткової арматури. Розроблено та наведено програму дослідних випробувань для оцінки параметра міцності нормальних перетинів експериментальних залізобетонних балок, підсилених попередньо напруженою арматурою під навантаженням. На основі програми досліджень розроблено конструкцію дослідних зразків та підібрані характеристики необхідних матеріалів. Проаналізовано сучасний стан і тенденції розвитку в галузі переоснащення та реконструкції елементів будівель і споруд. Опрацьовано наукові праці вчених багатьох країн світу в сфері експериментальних досліджень підсилення залізобетонних конструкцій. Розроблено простий та ефективний спосіб електротермічного попереднього напруження додаткової арматури підсилених конструкцій. Зроблено відповідні висновки до роботи. Подано перелік наукових праць у галузі підсилення будівельних конструкцій, а також нормативної літератури, використаних під час написання цієї роботи.

**Ключові слова:** методика експериментальних досліджень, підсилення залізобетонних балок, підсилення під навантаженням, додаткова арматура, електротермічне попереднє напруження, рівень попереднього напруження, міцність нормальних перетинів, реконструкція.

The method of experimental tests of reinforced concrete beams, strengthened additional prestressed reinforcement under load (at different levels of prestressing and active load), with the corresponding control a strength of normal cuts and prestressed additional reinforcement. Developed and presented a program of experimental tests to assess strength parameter of normal cut experimental reinforced concrete beams, reinforced prestressed reinforcement under load. Based on the research program developed design prototypes and selected characteristics necessary materials. Analyzed a modern position and trends in renovation and reconstruction of buildings and structures elements. Processed scientific works of scientists of many countries of the world in the branch of experimental studies strengthening of reinforced concrete constructions. Developed a simple and effective way electrothermal prestressing additional reinforcement of strengthened constructions. Made a corresponding conclusions to work. Posted list of scientific publications in the field strengthening of building constructions, and normative literature, used in writing this scientific work.

**Key words:** methodology of experimental researches, strengthening of reinforced concrete beams, strengthening under load, additional reinforcement, electrothermal prestressing, level of prestressing, strength of normal cuts, reconstruction.

## Постановка проблеми

Сьогодні у багатьох країнах світу, зокрема і в Україні, складна економічна ситуація у багатьох сферах матеріального виробництва, невід'ємною частиною якого є будівництво. Враховуючи це, все більше уваги приділяється ефективнішому використанню конструкцій вже зведених будівель та споруд у разі їх переоснащення чи реконструкції, а не новому будівництву. У наших умовах такий ефект можна досягти підсиленням конструкцій різноманітного призначення передусім за допомогою нарощування перерізу додатковою попередньо напруженою арматурою, що було б надзвичайно ефективно з погляду значного збільшення не тільки міцності нормальних перетинів конструкції підсилення, а й її жорсткості (обмеження прогинів та ширини розкриття тріщин), за рахунок попереднього напруження додаткової арматури.

Значного поширення в Україні цей вид підсилення балкових конструкцій ще не набув, оскільки в такому разі відсутня відповідна нормативно-розрахункова база, адаптована до чинних ДБН України, яка б враховувала фактичні втрати попереднього напруження додаткової арматури за включення її в роботу залізобетонної балкової конструкції та дозволяла б побудувати реальну криву стану сумісної роботи і основної, і додаткової арматури після підсилення. Експериментальні дослідження підсилення балкових конструкцій за допомогою попередньо напружених матеріалів (зокрема, й сталеві арматури) були проведені багатьма авторами у Китаї, Південній Кореї, ПАР, Канаді та Іспанії [1–5] та показали значний розкид у показниках міцності, деформативності та тріщиностійкості. Це ще раз підтвердило той факт, що сьогодні не існує єдиної теорії розрахунку підсилення балкових конструкцій, а також не досліджено реальну ефективність попереднього напруження додаткової арматури підсилення.

Отже, розроблення чіткої методики експериментальних випробувань залізобетонних балок, підсилення додатковою попередньо напруженою арматурою під навантаженням (з можливістю регулювання рівня напруження) та адаптацією цієї методики на реальні умови переоснащення і реконструкції будівель та споруд, є надзвичайно актуальним питанням у складний економічний час для нашої держави, і можливість його вирішення дозволила б ефективно застосовувати цей спосіб у сучасних умовах будівельної галузі.

**Мета роботи** – розробити методику експериментального дослідження міцності нормальних перетинів залізобетонних балок прямокутного профілю, підсилення додатковою попередньо напруженою арматурою під навантаженням, за різних рівнів попереднього напруження та відповідного діючого навантаження.

## Матеріали та конструкція дослідних зразків

Для виконання поставленої мети роботи була виготовлена серія залізобетонних балок прямокутного профілю (довжиною 2100 мм, шириною 100 мм і висотою 200 мм). Характеристичне значення призової міцності бетону балок цієї серії –  $f_{ck,prism} = 21,6$  МПа. У всіх балках повздовжньою робочою арматурою була стрижнева арматура  $2\varnothing 12 A500C$ , з межею міцності на границі текучості  $\sigma_y = 540$  МПа; конструктивна і поперечна –  $\varnothing 5 B500$ , крок поперечної арматури – 75–100 мм. З'єднання арматури у просторовому каркасі виконано в заводських умовах контактним зварюванням. Загальний вигляд балок (опалубне креслення) та конструкцію арматурного каркаса подано на рис. 1.

Для вибору елементів підсилення, було складено матрицю планування ПФЕ (повного факторного експерименту). У ній враховано три фактори – рівень навантаження, на якому відбувається підсилення ( $x_1$ ), діаметр арматури, якою воно виконується ( $x_2$ ) і попереднє напруження елементів підсилення ( $x_3$ ). У табл. 1 подано дані про рівні чинників.

Також за другою групою граничних станів було визначено значення коефіцієнтів відгуку ( $y$ ):

$$y = j(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n).$$

Після підрахунку коефіцієнтів регресії записуємо рівняння регресії:

$$y = 0,394 - 0,098x_1 + 0,047x_2 + 0,087x_3 - 0,002x_1x_2 + 0,049x_1x_3 + 0,001x_2x_3 + 0,017x_1x_2x_3.$$

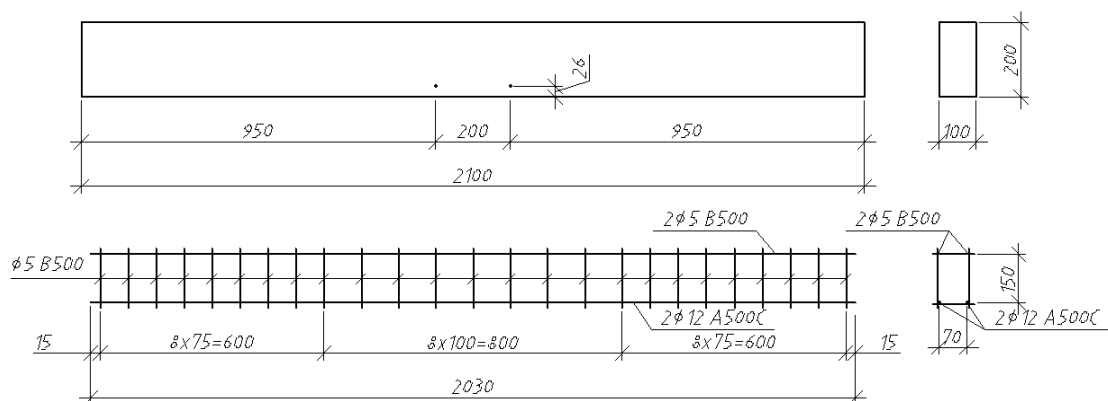


Рис. 1. Опалубне креслення експериментальних балок та конструкція арматурного каркаса

Таблиця 1

### Рівні чинників факторів експерименту

Назва чинника	Кодове позначення	Рівні чинників	
		-1	1
Рівень навантаження, на якому виконується підсилення, $M/M_{cr}$	$x_1$	0	0,9
Відсоток додаткового армування попередньо напруженою арматурою	$x_2$	0.0079	0.011
Попереднє напруження додаткової арматури, $\sigma_p/\sigma_y$	$x_3$	0	0,9

Таблиця 2

### Матриця планування ПФЕ підсилення залізобетонних балок попередньо напруженою арматурою

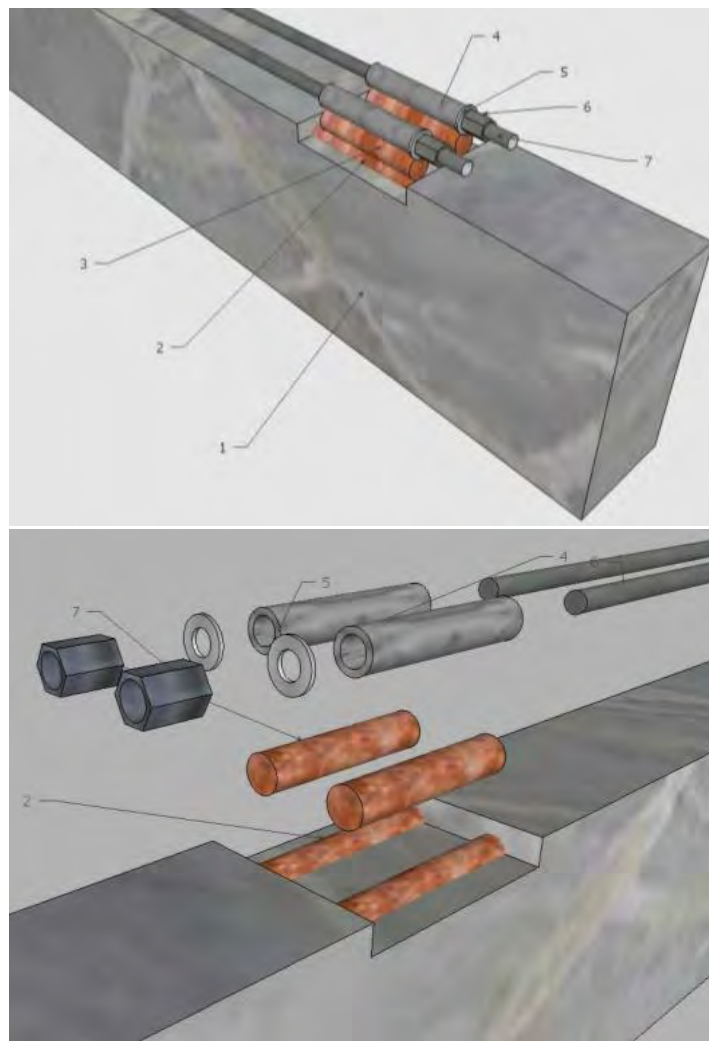
№ досліджу	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	$y$
1	-	-	-	+	+	+	-	0.39
2	+	-	-	-	-	+	+	0.13
3	-	+	-	-	+	-	+	0.52
4	+	+	-	+	-	-	-	0.19
5	-	-	+	+	-	-	+	0.50
6	+	-	+	-	+	-	-	0.37
7	-	+	+	-	-	+	-	0.56
8	+	+	+	+	+	+	+	0.50

Спостерігаємо, що ефект підсилення зростає, якщо його виконувати на більш ранніх етапах і з використанням арматури більшого діаметра, напружуючи її при цьому не нижче від рівня напружень основної арматури. Враховуючи це, прийнято виконувати підсилення додатковою арматурою з двох стержнів  $\varnothing 12$  мм класу А500С, попередньо напружуючи її до рівня основної арматури і вище.

### Теоретичні обґрунтування

За основу для розроблення методики була прийнята стандартна методика випробування залізобетонних балок на згин з визначенням зон місць обриву додаткової ненапруженої арматури згідно з епюрою теоретичних згинальних моментів підсиленої балки. Ця методика ґрунтується на визначенні зони спільної роботи основної арматури та арматури підсилення графічним способом. Для цього, за допомогою методу розрахунку за граничними станами СНиП 2.03.01-84\* [8] та одержаними експериментальними даними характеристик арматури і бетону, була визначена несуча здатність перетину до підсилення та нового підсиленого перетину. За отриманими результатами встановлено максимальне навантаження, що сприйматиме звичайна та підсилена балки та

побудована епюра згинальних моментів від отриманого навантаження. Додаткова арматура підсилення встановлюється на розрахункову довжину (відповідно до епюри внутрішніх зусиль) за допомогою монтажу елементів, наведених на рис. 2.



*Рис. 2. Схема монтажу необхідних елементів для кріплення та натягу додаткових арматурних стержнів:*

*1 – балка, що випробовується; 2 – основна робоча арматура  $\varnothing 14$  мм, класу А400С; 3 – коротиш (сталевий стержень  $\varnothing 28$  мм, довжиною 100 мм); 4 – гільза (сталевий суцільний стержень  $\varnothing 24$  мм, в якому просвердлено отвір  $\varnothing 14$  мм для вільного пропускання додаткової арматури); 5 – шайба з отвором  $\varnothing 12$  мм, товщиною 2 мм; 6 – додаткові арматурні стержні, що згодом будуть піддані електротермічному попередньому напруженню під навантаженням,  $\varnothing 12$  мм, класу А400С, з виточеною різью малого кроку на кінцях; 7 – гайка (подовжена) для прийняття зусилля розтягу*

Зварювання елементів 2 та 3, а також 3 та 4 між собою, ведеться від країв до середини прольоту балки, виставленої в проектне положення двостороннім швом довжиною однієї сторони 100 мм за допомогою зварювального апарата. Для зварювання необхідно використовувати електроди Э-46  $\varnothing 3$  мм. У місцях закінчення швів потрібно ретельно заварювати кратери. Для визначення деформацій арматури підсилення до неї необхідно приварити спеціальні фіксатори з відповідною базою для кріплення мікроіндикаторів годинникового типу.

Конструкція гільзи (4) зумовлена необхідністю вільного видовження додаткової арматури під час її електротермічного попереднього напруження під навантаженням. За допомогою шайби (5) та гайки (7) створена можливість фіксування напруженої до необхідного рівня додаткової арматури в нерухомому положенні.

Електротермічне попереднє напруження додаткових арматурних стержнів необхідно виконувати за допомогою трансформатора (кріплення щупів до арматури підсилення за допомогою бронзових пластин) та термопари (для контролю температури нагрівання). До початку випробувань були розраховані теоретичні параметри втрат попереднього напруження для рівнів 0,3; 0,5; 0,7 та 0,9 руйнівного значення згинального моменту контрольних непідсиленних балок.

Напруження додаткової арматури необхідно виконувати до рівня, аналогічного до діючого навантаження (для правильного та ефективного включення її в роботу підсиленої конструкції).

Прийнята методика випробувань дозволила дослідити напружено-деформований стан балок у зоні дії максимального згинального моменту (у зоні чистого згину в середній третині прольоту балки) після підсилення балок у розтягнутій зоні додатковою попередньо напруженою арматурою під діючим навантаженням.

Схема електротермічного попереднього напруження додаткової арматури та вигляд стенда з балкою під навантаженням перед виконанням напруження подано на рис. 3.

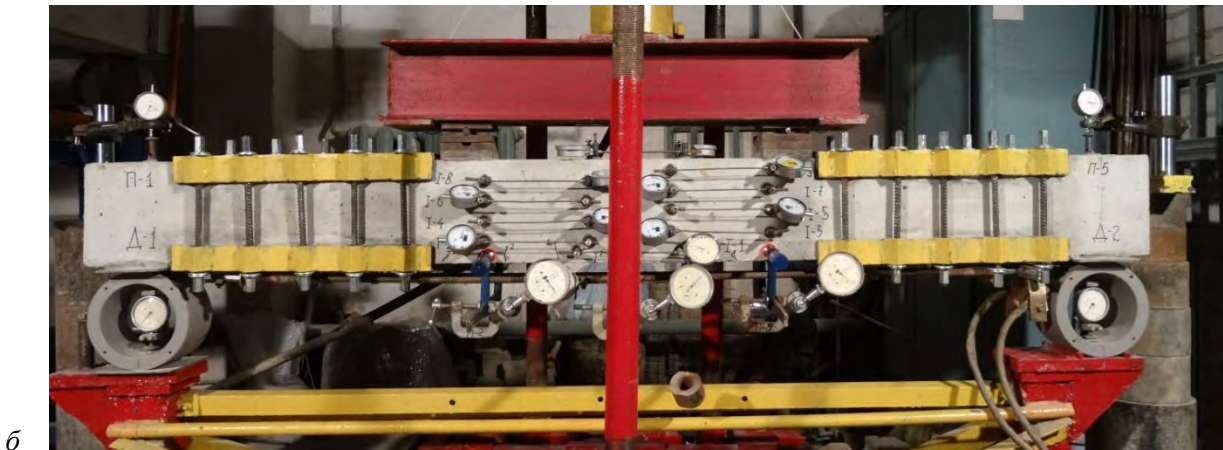
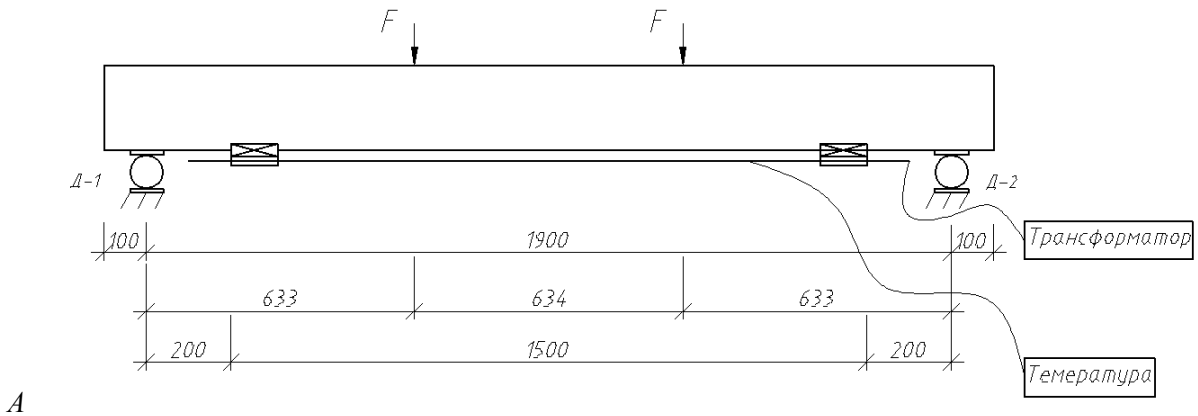


Рис. 3. Схема електротермічного попереднього напруження додаткової арматури (а) та вигляд стенда з балкою під навантаженням перед виконанням напруження (б)

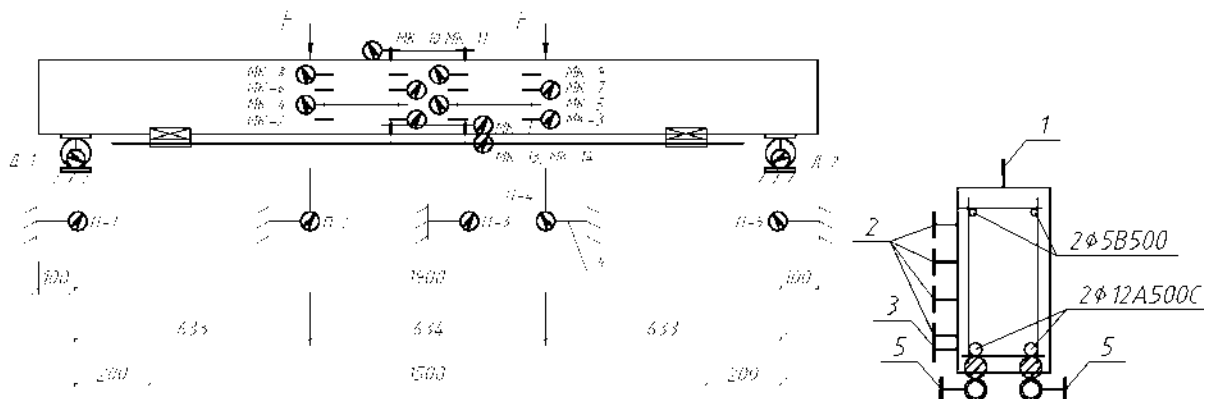


Рис. 4. Схема розташування приладів під час випробування підсиленої балки:  
 1 – мікроіндикатори стиску бетону Мк-10, Мк-11; 2 – мікроіндикатори деформацій бетону по висоті перерізу балки Мк-2...Мк-9; 3 – мікроіндикатори для замірювання деформацій основної робочої арматури Мк-1, Мк-12; 4 – прогиноміри П-1, П-5; 5 – мікроіндикатори для замірювання деформацій зовнішньої попередньо напруженої арматури Мк-13, Мк-14

Балку необхідно навантажувати ступенями  $\Delta P=0,05P$  з витримкою на кожному етапі 5 хв (тут  $P$ -руйнівне навантаження невідсиленої балки). Після досягнення відповідного рівня навантаження на балку, долучається в роботу додаткова арматура за допомогою її електротермічного попереднього напруження до рівня, ідентичного до рівня діючого навантаження на балку. Після цього арматура підсилення фіксується стягуванням болтами з подальшим випробуванням балки до руйнування ступенями  $\Delta P=0,1P$  з витримкою на кожному етапі 10 хв.

Зі всіх приладів знімаються покази під час виконання дослідження, зокрема і на етапі до та після виконання попереднього напруження додаткової арматури.

Під час напруження додаткової арматури необхідно слідкувати за моментом одночасного включення в роботу додаткової і основної робочої арматури в балці, за рахунок зрівноваження приростів деформацій, які фіксуються за допомогою різниць показів на шкалах мікроіндикаторів додаткової (приріст деформацій під час попереднього напруження) та основної (приріст деформацій до початку напруження з врахуванням від'ємних деформацій стиску за рахунок попереднього вигину балки) арматур. Схема розташування приладів під час випробування підсиленої балки показана на рис. 4. Для забезпечення сумісної роботи конструкції, після виконання попереднього напруження між зовнішньою арматурою і балкою необхідно періодично вставляти металеві вкладиші.

### Висновки

1. Запропонована методика експериментальних випробувань міцності нормальних перетинів залізобетонних балок прямокутного профілю, підсилених додатковою попередньо напруженою арматурою під навантаженням (з можливістю регулювання рівня напруження).

2. Розроблена методика гарантує просте, швидке і технологічно не складне її використання у реальних умовах підсилення балкових елементів будівель чи споруд під час їх переоснащення та реконструкції.

1. Du J., Liu X. *Experimental study of RC continuous beams strengthened by external prestressing.* – Beijing: Innovation&sustainability of modern railway proceedings of ISMR, 2008.–Pages 221–227.
2. Aparicio A., Ramos G., Casas J. *Testing of externally prestressed concrete beams.* – Barcelona: ENGINEERING STRUCTURES, 2002. – Vol. 24. – Issue 1. – P. 73–84.
3. Wahab N., Soudki K., Topper T. *Experimental Investigation of Bond Fatigue Behavior of Concrete Beams Strengthened with NSM Prestressed CFRP Rods.* – Waterloo: journal of composites for construction, 2014. – Vol. 16. – Issue 6. – P. 684–692.
4. Kim S., Yang K., Byun H., Ashour A. *Tests of reinforced concrete beams strengthened with wire rope units.* – Kwangju: engineering structures, 2007. – Vol. 29. – Issue 10. – P. 2711–2722.
5. Minelli F., Plizzari G., Cairns J. *Flexure and shear behavior class of RC beams strengthened by external reinforcement.* – Cape Town: Concrete repair, rehabilitation and retrofitting, 2009. – P. 377–378.
6. Крамарчук А.П. *Міцність згинаних елементів із додатковим армуванням // Будівельні конструкції, будівлі та споруди.* – Макіївка: Вісник ДонНАБА, 2003. – Т. 1. – С. 26–30.
7. Лапенко О. І., Муравльов В. В. *Прогресивні залізобетонні конструкції.* – Макіївка: Вісник ДонНАБА, 2011. – Вип. 2011–4(90). – С. 180–182.
8. СНиП 2.03.01-84\*. *Бетонные и железобетонные конструкции.* – М.: Госстрой СССР, 1984.
9. Рymar, Я. В. *Міцність та деформативність залізобетонних балок, підсилених піднавантаженням нарощуванням арматури: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 [Текст] / Рymar Ярослав Васильович; Нац. ун-т “Львівська політехніка”.* – Львів, 2010. – 22 с.