



ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАТИВНОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК, ЩО ПІДСИЛЕНІ ГОРИЗОНТАЛЬНИМИ ЗАТЯЖКАМИ

Ю. О. Кушнір

*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,
Першотравневий пр., 24, м. Полтава, Україна, 36011.
E-mail: kushnir.pntu@gmail.com*

Отримана 14 березня 2012; прийнята 25 травня 2012.

Анотація. У роботі наведена методика розрахунку деформативності сталеві балки, що підсилюється горизонтальною попередньо напруженою затяжкою за методикою [12] залежно від передісторії її завантаження. Також представлені результати експериментальних досліджень прогинів окремих сталевих балок, які підсилені на різних рівнях завантаження попередньо напруженою горизонтальною затяжкою, та наведені результати їх порівняння з теоретичними даними. Порівняння результатів експериментальних досліджень та теоретичних розрахунків прогинів підтвердили прийнятність застосування запропонованої методики розрахунку деформативності сталевих балок, які підсилені горизонтальними затяжками. На основі проведених досліджень можна зробити висновок: запропоновані автором залежності дозволяють розраховувати за граничним станом II-ої групи (за деформативністю) сталеві балки, які підсилені горизонтальними затяжками з урахуванням передісторії їх завантаження. Запропонована методика може бути використана при підсиленні: підкранових сталевих балок, до яких залежно від режиму роботи мостових кранів ставлять підвищені вимоги по величині граничного прогину за граничним станом II-ої групи; головних і другорядних балок сталевих і сталезалізобетонних перекриттів і покриття у разі ушкодження перерізів.

Ключові слова: балка, затяжка, попереднє напруження, експериментальні дослідження, деформації, розрахунок, прогин.

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАТИВНОСТИ СТАЛЬНЫХ БАЛОК, УСИЛЕННЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ ЗАТЯЖКАМИ

Ю. А. Кушнир

*Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка,
Первомайский пр., 24, г. Полтава, Украина, 36011.
E-mail: kushnir.pntu@gmail.com*

Получена 14 марта 2012; принята 25 мая 2012.

Аннотация. В работе приведена методика расчёта деформативности стальной балки, которая усиливается горизонтальной предварительно напряжённой затяжкой в зависимости от предыстории её загрузки. Также представлены результаты экспериментальных исследований прогибов отдельных стальных балок, которые усилены при разных уровнях загрузки предварительно напряжённой горизонтальной затяжкой, и приведены результаты их сравнения с теоретическими данными. Сравнение результатов экспериментальных исследований и теоретических расчётов прогибов подтвердили приемлемость применения предложенной методики расчёта деформативности стальных балок, которые усилены горизонтальными затяжками. На основе проведённых исследований можно сделать вывод: предложенные автором зависимости позволяют рассчитывать по предельному состоянию II-ой группы (по деформативности) стальные балки, которые усилены горизонтальными затяжками с учётом предыстории их

загрузки. Предложенная методика может быть использована при усилении: подкрановых стальных балок, к которым в зависимости от режима работы мостовых кранов предъявляются повышенные требования по величине предельного прогиба по предельным состояниям II-ой группы; главных и второстепенных балок стальных и сталежелезобетонных перекрытий и покрытий при повреждении сечений.

Ключевые слова: балка, затяжка, предварительное напряжение, экспериментальные исследования, деформации, расчёт, прогиб.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF DEFORMATIONS OF THE STEEL BEAMS WHICH ARE REINFORCED WITH HORIZONTAL TENDONS

Iuliia Kushnir

Poltava National Technical University named in honor of Yuri Kondratyuk,

24, Pershotravnevyi Ave, Poltava, Ukraine, 36011.

E-mail: kushnir.pntu@gmail.com

Received 14 March 2012; accepted 25 May 2012.

Abstract. This paper describes a method of calculation the flexure of a steel beam, which are reinforced with horizontal prestressed tendons, that depend on loading history. The results of experimental investigations of deformation of steel beams which are reinforced with prestressed horizontal tendons at different levels of the load and the results of the comparison of theoretical and experimental data also presented in the article. Comparison of experimental results and theoretical calculations confirmed the acceptability of the deflections of the proposed method of calculation deformability of the steel beams which are reinforced with horizontal tendons. Based on research can be concluded that the proposed calculation formulas allow calculate the steel beams which are reinforced with prestressed horizontal tendons at different levels of the load for the limit state of the II-nd group (deformability). The proposed technique can be used in the reinforcement of: crane way girder, which are increased requirements for the limit value of deflection limit state of II-nd group, depending the operating mode of bridge cranes; main and secondary beams of steel and composite steel-concrete overlappings and coatings, with a damaged section.

Keywords: beam, tendon, pre-stress, experimental investigations, deformation, calculation, flexure.

Вступ

Реконструкція будинків і споруд пов'язана з розвитком промислового виробництва, розширенням та технічним переоснащенням діючих підприємств. На сьогодні відбувається фізичне старіння будівельних конструкцій, вони потребують відновлення. Реконструкція на діючому підприємстві супроводжується, як правило, зміною навантажень на будівельні конструкції, а іноді і зміною їх початкових конструктивних схем. Це призводить до необхідності оцінки технічного стану будівельних конструкцій і збільшення їх несучої спроможності шляхом раціонального підсилення.

Одним із ефективних методів підсилення згинальних конструкцій (елементів) є метод

нарощування перерізів шляхом встановлення лінійних і шпренгельних попередньо напружених затяжок [8], який має ряд наступних переваг, що впливають, порівняно з нормальними без попереднього напруження балками, на наступні їх експлуатаційні властивості: підвищують пружну роботу при високих рівнях завантаження; збільшують несучу здатність за рахунок пружно-пластичної роботи перерізу; мають менший прогин при робочих експлуатаційних (проектних) навантаженнях; підвищують рівень тріщиностійкості бетону в залізобетонних і сталебетонних балках; підвищують загальний рівень витривалості. В. В. Бірюлев в роботі [4] також відмічає, що при підвищенні величини попереднього напруження можемо отримати значний

запас в зоні пружної роботи підсиленої сталеві балки.

Метод нарощування перерізів балок шляхом встановлення лінійних і шпрингельних попередньо напружених затяжок («сухожиль») із різних матеріалів в зв'язку з його ефективністю набув значне застосування у всьому світі. Його застосовують при підсиленні сталевих, залізобетонних і сталезалізобетонних балок будинків і споруд. Так експериментально-аналітичним дослідженням впливу зовнішнього підсилення у вигляді попередньо напружених затяжок («сухожиль») на міцність і деформативність згинальних конструкцій (елементів) присвячені наступні наукові роботи:

- при підсиленні сталевих балок: Р. В. Алдушкіна [1]; Є. І. Белені і Д. М. Горовського [2]; Д. Ф. Белого [3]; В. В. Бірюлева [4]; В. Ф. Мареніна і Б. М. Второва [10]; Нармашірі Камбіза, Сулонга Рамлі і Джумаата Мохд Заміна [11]; Д. Скнерча, М. Дауда, С. Ріцкалла, Е. Самнера і К. Стенфорда [6] та інших;
- при підсиленні сталезалізобетонних балок: З. Я. Бліхарського [5]; К. О. Голоднова [7]; М. Ю. Ізбаша [9, 16]; М. А. Пізані і Е. Ніколі [13]; Чен Шімінга і Гу Пінга [14]; Чой Донг-Хо, Кім Йонг-Сіка і Ю Хуна [15]; О. Л. Шагіна, В. В. Асанова і Р. М. Шемета [16] та інших.

Автором в роботі [12] наводиться метод розрахунку оптимальної площі перерізу горизонтальної затяжки, яка визначається в результаті розв'язання задачі послідовного її підбору, та міцності сталеві балки, що підсилені нею. Особливістю ж розрахунку сталевих балок, що підсилюються попередньо напруженою горизонтальною затяжкою, є вибір величини її попереднього напруження, яка безпосередньо впливає на величину їх прогину. Тому була поставлена задача щодо теоретико-експериментального дослідження сталевих балок, які підсилені горизонтальною попередньо напруженою затяжкою, за граничним станом II-ої групи (за деформативністю).

Загальна мета досліджень полягає у розробці методики розрахунку величини прогину сталевих балок, що підсилюються попередньо напруженою горизонтальною затяжкою, та в експериментальних дослідженнях їх деформативності, які б дозволили провести порівняння теоретичних і експериментальних величин їх прогину.

Визначення значення попереднього напруження в горизонтальній затяжці

Для визначення зусилля попереднього натягу (X) горизонтальної затяжки необхідно розрахувати величину її попереднього напруження (σ_{sp}), яке контролюється залежно від передісторії завантаження балки, що підсилюється. Необхідну розрахункову величину попереднього напруження (σ_{sp0}) в горизонтальній затяжці підсиленої балки, що попередньо розвантажена, можемо розрахувати за формулою:

$$\sigma_{sp0} = \frac{M}{A_{sd}} [D - G], \quad (1)$$

де коефіцієнти

$$D = \frac{l_{sd} / l^2}{c - W_B / A_B}; \quad (2)$$

$$G = \frac{c \cdot (1 - l_{sd}^2 / 3l^2)}{c^2 + I_B / A_B + I_B / A_{sd}}, \quad (3)$$

- де M – максимальне розрахункове значення згинального моменту від зовнішнього навантаження, яке діє в перерізі балки;
- l_{sd}, l – довжини відповідно затяжки і розрахункового прогону балки;
- A_B, I_B, W_B – площа, моменти інерції і опору відповідно горизонтальної осі перерізу балки, що підсилюється;
- c – відстань по перпендикуляру від геометричної осі балки до геометричної осі затяжки;
- A_{sd} – оптимальна площа перерізу затяжки, яка розраховується в результаті вирішення задачі послідовного її підбору.

Необхідну величину попереднього напруження (σ_{sp0}) в горизонтальній затяжці підсиленої балки без попереднього її розвантаження можемо розрахувати за формулою:

$$\sigma_{sp0} = \frac{M_0}{A_{sd}} \cdot D - \frac{M - M_0}{A_{sd}} \cdot [D - G], \quad (4)$$

- де M_0 – значення згинального моменту від зовнішнього навантаження в розрахунковому перерізі балки, яке діє під час її підсилення.
- Величину попереднього напруження (σ_{sp}), яке контролюється, визначаємо за формулою:

$$\sigma_{sp} = \sigma_{sp0} + \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad (5)$$

- де σ_1 – втрати напруження в елементах затяжки від релаксації при механічному способі натягнення;

$$\sigma_1 = \left(0,22 \cdot \frac{\sigma_{sp0}}{R_{sd}} - 0,1 \right) \cdot \sigma_{sp0};$$

$$\sigma_1 = 0,1 \cdot \sigma_{sp0} - 20; \quad (6)$$

σ_2 – втрати напруження в елементах затяжки від температурного перепаду:

$$\sigma_2 = 1,25 \cdot \Delta t; \quad (7)$$

σ_3 – втрати напруження в елементах затяжки від деформації їх анкерів при натягненні їх на жорсткі упорні елементи:

$$\sigma_3 = E_s \cdot \frac{\Delta l}{l}. \quad (8)$$

Величина попереднього напруження (σ_{sp}), яке контролюється в горизонтальній затяжці, обмежується значеннями розрахункових опорів матеріалу затяжки (R_{sd}) і матеріалу балки (R_y), що підсилюється:

$$\sigma_{sp} \leq R_{sd}; \sigma_{sp} \leq R_y. \quad (9)$$

Визначення прогину металевої балки, яка підсилена горизонтальною затяжкою

Перевірний розрахунок деформативності металевої балки, яка підсилена горизонтальною затяжкою, залежно від передісторії її завантаження виконуємо в такій послідовності.

Сталева балка, яка підсилена горизонтальною затяжкою, не в кожному випадку може мати достатню жорсткість, тому необхідно при проектуванні її підсилення виконувати перевірку її несучої здатності за граничним станом II-ої групи (за деформативністю). Прогин (f_B) підсиленої сталеної балки при повному її завантаженні (після підсилення) визначаємо за формулою:

$$f_B = f - f_{sp} \leq [f], \quad (10)$$

де $f = M^n l^2 / 10EI$ – прогин, наприклад, рівномірно завантаженої розрізної сталеної балки; M^n – максимальне нормативне значення згинального моменту від зовнішнього навантаження;

f_{sp} – прогин балки у зворотному напрямку від попереднього напруження горизонтальною затяжкою, який виникає під час її підсилення; $[f]$ – граничне максимальне нормативне значення прогину балкової конструкції, що підсилена, яке визначається за формулою:

$$[f] = l \left[\frac{1}{n_0} \right].$$

Значення прогину (f_{sp}) при повному розвантаженні балки, що підсилюється, визначаємо за формулою:

$$f_{sp} = \frac{Xcl^2}{8EI_B} \left(1 - (l_{sd}/l)^2 + 2(l_{sd}/l) \right), \quad (11)$$

де $X = \sigma_{sp0} A_{sd}$ – зусилля від попереднього напруження в горизонтальній затяжці.

У випадку, коли $l_{sd} = l$, величина прогину (f_{sp}) при повному розвантаженні балки, що підсилюється, становить:

$$f_{sp} = \frac{Xcl_{sd}^2}{8EI_B}. \quad (12)$$

Значення прогину (f_{sp}) з урахуванням початкового деформаційного стану при неповному розвантаженні балки, що підсилюється, визначаємо за формулою:

$$f_{sp} = \frac{Xl_{sd}}{4EI_B} (cl - 0,5l_{sd}(c + f_0 - f_{sd})), \quad (13)$$

де f_0 – максимальний прогин балки при дії навантаження під час її підсилення;

f_{sd} – прогин балки при дії залишкового навантаження на рівні місць обриву (закріплення) елементів затяжки.

У випадку, коли $l_{sd} = l$, величина прогину (f_{sp}) з урахуванням початкового деформаційного стану при неповному розвантаженні балки становить:

$$f_{sp} = \frac{Xl_{sd}^2}{8EI_B} (c - f_0). \quad (14)$$

Методика експериментальних досліджень

Для правильного уявлення щодо дійсної роботи балок з затяжками були проведені експериментальні дослідження. Випробувано 4 балки довжиною 2 м з розрахунковим прогоном 1,7 м, які підсилені горизонтальними затяжками, з балкою жорсткості з двотавра № 16. Як елементи затяжки використовувалися стрижні діаметром 10, 16, 20, 32 мм із арматурної сталі класу А500 (АІІ).

Для затяжок діаметром 10, 16, 20 мм відстань від нижньої полицки балки до поздовжньої геометричної осі елементів затяжки прийнята рівною значенню 25 мм, а для затяжок діаметром 32 мм – 30 мм.

Прийнята наступна послідовність випробувань підсиленних балок:

- Етап 1: навантаження балки жорсткості до значення попереднього завантаження визначеного рівня η_t (табл. 1);
- Етап 2: включення в роботу елементів (стержнів) зтяжки шляхом закріплення гайок на їх кінцях;
- Етап 3: випробування балки жорсткості, яка підсилена зтяжками, до повного руйнування (втрати несучої здатності).

Значення рівня навантаження визначаємо за відношення:

$$\eta_t = M_0 / M,$$

де M_0 – момент, який діє по середині прогону балки перед закріпленням елементів зтяжки,

M – граничний момент, який діє по середині прогону балки, без підсилення зтяжками.

Під час випробувань за допомогою тензорезисторів типу ПКБ з базою 5 мм (рис. 1) вимірювалися поздовжні деформації волокон перерізів на середині розрахункового прогону балки жорсткості та елементів зтяжки. Відносні значення деформацій за тензорезисторами фіксувалися за допомогою приладу ВНП-8. Прогин балки на

середині розрахункового прогону визначався прогиноміром часового типу.

Зразки випробовувалися на гідравлічному пресі УВМ-50 (рис. 2). Навантаження прикладалося до зразків ступенями. Величина зусилля, яке відповідає одному ступеню, залежала від граничної несучої спроможності і вибирається з таким розрахунком, щоб в пружній стадії роботи було не менше 8–10 ступенів.

Балка Б-3 була підсилена при початковому рівні навантаження $\eta_t = 0,13$, після розвантаження (Б-3-1) і доведена до руйнування (Б-3-2). Результати порівняння теоретичних й експериментальних даних прогинів балок при різних рівнях навантаження зразків наведені в таблиці 2.

Руйнування підсилених балок здійснювалося в розрахунковому двотавровому перерізі на середині їх прогону в результаті втрати стійкості однієї із ділянок або усєї верхньої їх полиці.

Результати порівняння теоретичних й експериментальних даних прогинів балок марок Б-1, Б-2, Б-3, Б-4 при різних рівнях навантаження зразків наведені в табл. 2 і табл. 3. Для більш наочного порівняння теоретичних (криві Б-1т,

Таблиця 1. Рівні навантаження та характеристики перерізу підсиленої балки

Марка балки	Початковий рівень навантаження, η_t	Схема прикладання навантаження	Переріз	
			балки	зтяжки
Б-1	0			2Ø10 мм
Б-2	0,07			2Ø16 мм
Б-3	0,13			2Ø20 мм
Б-4	0,26			2Ø32 мм

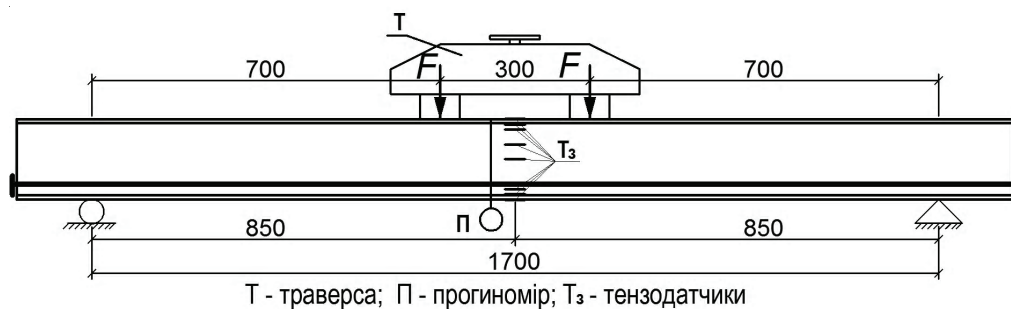


Рисунок 1. Розміщення приладів на балці.

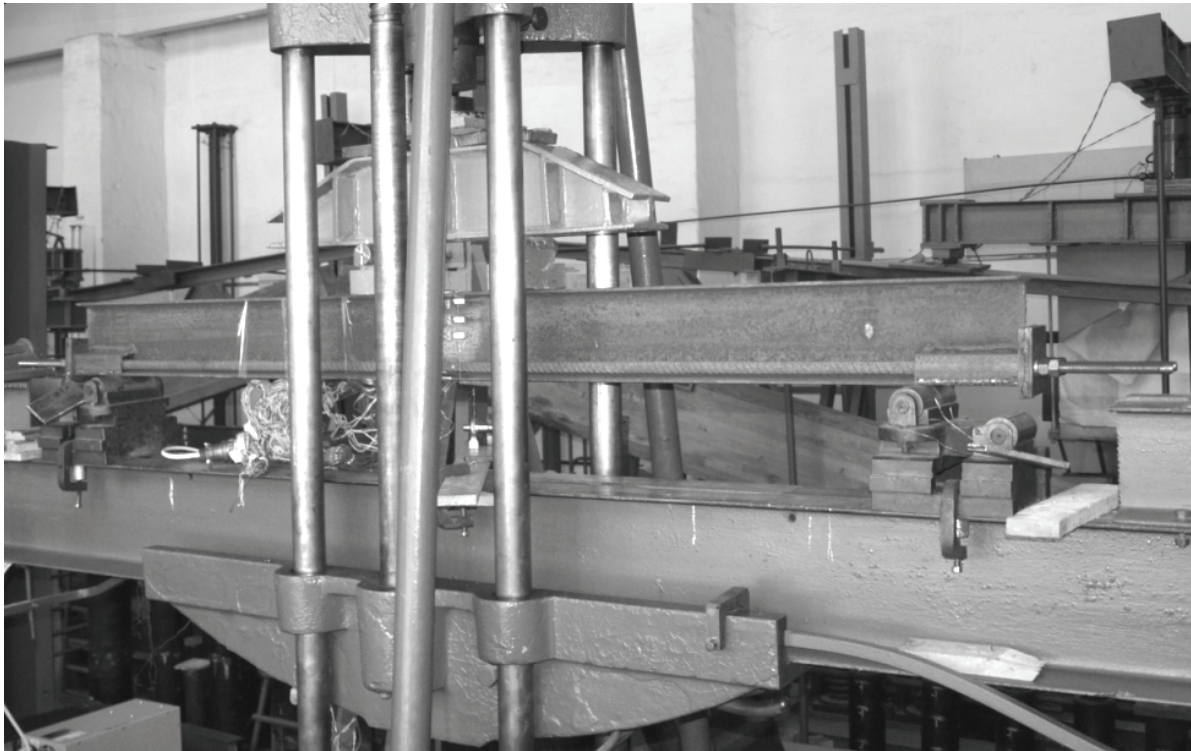


Рисунок 2. Розміщення зразка в пресі.

Таблиця 2. Порівняння експериментальних та теоретичних величин прогинів балок марки Б-3 залежно від рівня навантаження

Б-3-1				Б-3-2			
N/N_p	$f_{\text{експ}}, \text{см}$	$f_{\text{теор}}, \text{см}$	$f_{\text{експ}}/f_{\text{теор}}$	N/N_p	$f_{\text{експ}}, \text{см}$	$f_{\text{теор}}, \text{см}$	$f_{\text{експ}}/f_{\text{теор}}$
0,06	0,00	0,28	0,00	0,09	0,01	0,38	0,03
0,13	0,29	0,55	0,52	0,19	0,11	0,74	0,15
0,25	0,32	1,04	0,31	0,38	1,17	1,47	0,79
0,38	0,81	1,53	0,53	0,56	2,30	2,20	1,04
0,50	1,61	2,02	0,80	0,69	3,16	2,69	1,17
0,56	1,87	2,26	0,83	0,75	3,32	2,94	1,13
0,63	2,38	2,50	0,95	0,81	3,53	3,18	1,11
0,69	2,68	2,75	0,98	0,88	4,01	3,42	1,17
0,75	2,76	2,99	0,92	0,94	4,23	3,67	1,15
0,81	3,10	3,24	0,96	1,00	5,23	3,91	1,34

Б-2т, Б-3-1т, Б-3-2т, Б-4т) й експериментальних (криві Б-1, Б-2, Б-3-1, Б-3-2, Б-4) даних прогинів балок-зразків був побудований графік їх зміни залежно від рівня їх завантаження, який наведений на рис. 3.

Зіставлення експериментальних даних і даних теоретичних розрахунків величин прогинів зразків на різних рівнях їх завантаження призводить до наступних статистичних показників: балка Б-1: $\bar{x} = 0,77$, $x = 0,21$, $v = 27\%$; балка Б-2:

Таблиця 3. Порівняння експериментальних та теоретичних величин прогинів балок марок Б-1, Б-2, Б-4 залежно від рівня навантаження

Б-1				Б-2				Б-4			
N/N_p	$f_{\text{експ.}}$ см	$f_{\text{теор.}}$ см	$f_{\text{експ.}}/f_{\text{теор.}}$	N/N_p	$f_{\text{експ.}}$ см	$f_{\text{теор.}}$ см	$f_{\text{експ.}}/f_{\text{теор.}}$	N/N_p	$f_{\text{експ.}}$ см	$f_{\text{теор.}}$ см	$f_{\text{експ.}}/f_{\text{теор.}}$
0,07	0,08	0,27	0,30	0,06	0,40	0,28	1,42	0,09	0,39	0,55	0,70
0,14	0,31	0,53	0,59	0,06	0,39	0,29	1,34	0,18	1,18	1,10	1,08
0,20	0,59	0,78	0,75	0,13	0,46	0,53	0,86	0,18	1,95	1,10	1,78
0,27	0,82	1,04	0,79	0,25	1,22	1,02	1,19	0,27	2,48	1,53	1,62
0,41	1,40	1,56	0,90	0,38	1,80	1,51	1,19	0,35	3,10	1,96	1,58
0,54	1,95	2,08	0,94	0,50	2,26	2,00	1,13	0,44	3,76	2,39	1,58
0,68	2,45	2,59	0,94	0,56	2,86	2,24	1,28	0,49	4,15	2,60	1,60
0,81	2,79	3,11	0,90	0,63	3,08	2,48	1,24	0,53	4,55	2,81	1,62
0,95	3,00	3,63	0,83	0,69	3,68	2,73	1,35	0,58	4,92	3,03	1,62
				0,75	4,01	2,97	1,35	0,62	5,20	3,24	1,60
				0,81	4,41	3,21	1,37	0,66	5,81	3,46	1,68
				0,88	4,63	3,46	1,34	0,71	6,33	3,67	1,72
				0,94	4,84	3,70	1,31	0,75	6,80	3,89	1,75
				1,00	5,01	3,94	1,27	0,80	7,30	4,10	1,78
								0,84	7,61	4,32	1,76
								0,88	8,34	4,53	1,84
								0,93	9,01	4,75	1,90
								0,97	9,33	4,96	1,88
								1,00	9,47	5,09	1,86

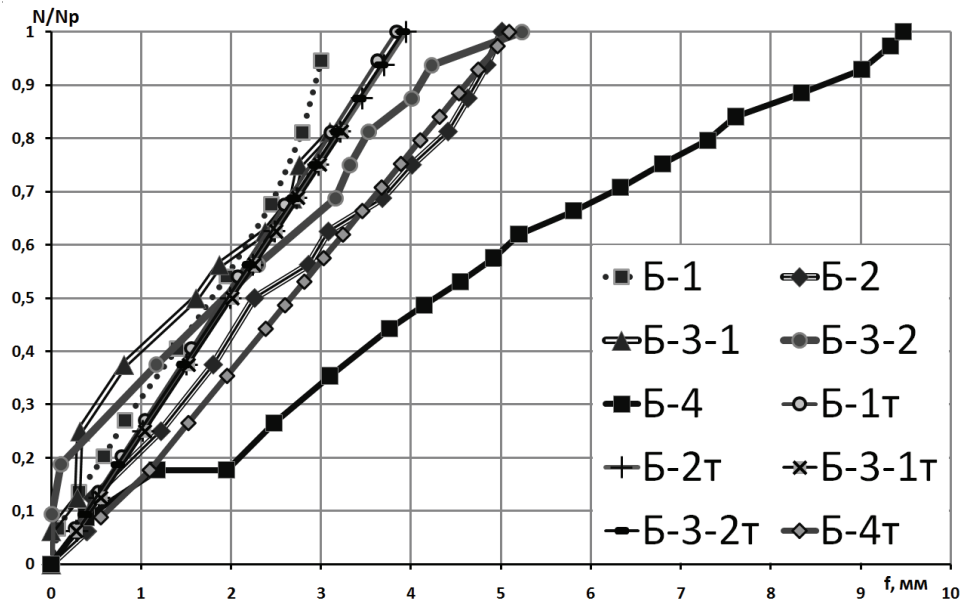


Рисунок 3. Графік розподілення теоретичних (Б-1т, Б-2т, Б-3-1т, Б-3-2т, Б-4т) та експериментальних (Б-1, Б-2, Б-3-1, Б-3-2, Б-4) величин прогину балок залежно від рівнів навантаження.

$\bar{x} = 1,26$, $x = 0,14$, $v = 11$ %; балки марки Б-3: $\bar{x} = 0,91$, $x = 0,45$, $v = 50$ %; балка Б-4: $\bar{x} = 1,63$, $x = 0,37$, $v = 23$ %.

Висновки

Отримані розрахункові залежності дозволяють раціонально проектувати підсилення сталевих балок за граничним станом II-ої групи (за деформативністю) з урахуванням передісторії їх

завантаження. При цьому несуча здатність матеріалу балки і горизонтальної зтяжки, переріз якої запроєктований за методикою [12], в конструкції підсилення використовується максимально ефективно. Порівняння результатів експериментальних досліджень та теоретичних розрахунків прогинів підтвердили прийнятність застосування запропонованої методики розрахунку деформативності сталевих балок, які підсилені горизонтальними зтяжками.

Литература

1. Алдушкин, Р. В. Развитие и совершенствование рациональных методов усиления и регулирования усилий в металлических конструкциях балочного типа и фермах [Текст] : автореф. дис. на соиск. науч. степ. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / Р. В. Алдушкин. – Орёл, 2008. – 20 с.
2. Беленя, Е. И. Расчёт металлических балок, усиленных под нагрузкой [Текст] / Е. И. Беленя, Д. М. Горовский // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1971. – № 1. – С. 12–18.
3. Белый, Д. Ф. К проектированию сечений металлических предварительно-напряжённых балок с зтяжками [Текст] / Д. Ф. Белый // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1976. – № 1. – С. 51–53.
4. Бириулев, В. В. О стальных балках с предварительно напряжённой зтяжкой [Текст] / В. В. Бириулев // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1958. – № 3. – С. 70–78.
5. Блихарский, З. Я. Прочность, деформативность, потери напряжений предварительно напряжённых сталебетонных балок с внешним армированием [Текст] : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения / З. Я. Блихарский. – Минск : Белорус. политехн. ин-т, 1990. – 16 с.
6. Bond Behavior of CFRP Strengthened Steel Structures [Электронный ресурс] / D. Schnerch, M. Dawood, S. Rizkalla, E. Sumner and K. Stanford // Advances in Structural Engineering. – 2006. – Vol. 9, № 6. – P. 805–817. – Режим доступа до статті : http://www.ce.ncsu.edu/srizkal/linked_files/Bond_Behavior_of_CFRP_Strengthened_Steel_Structures.pdf.
7. Голоднов, К. А. Жёсткость сталежелезобетонных изгибаемых элементов реконструируемых зданий и сооружений [Текст] / К. А. Голоднов // Вісник Донбаської нац. академії будівництва і архітектури : зб. наук. праць / М-во освіти і науки України, ДонНАБА. – Макіївка, 2005. – Вип. 2005-8(56) : Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології. – С. 65–69.

References

1. Aldushkin, R. V. Development and improvement of progressive methods of strengthening and force control in metal frame constructions and farms: authors abstract dissertation in candidacy for PhD in Technical Sciences. Orel, 2008. 20 p. (in Russian)
2. Belenia, Ye. I.; Gorovskii, D. M. Analysis of steel beams strengthened on load. In: *Building mechanics and analysis of structures*, 1971, No. 1, p. 12–18. (in Russian)
3. Bely, D. F. To section design of steel prestressed beams with tie rods. In: *Building mechanics and analysis of structures*, 1976, No. 1, p. 51–53. (in Russian)
4. Biryulev, V. V. About steel beams with prestressed tie rod. In: *Institutes news. Civil engineering and architecture*, 1958, No. 3, p. 70–78. (in Russian)
5. Bliarskii, Z. Ya. Resistance, deformability, stress loss of prestressed composite steel and concrete beams with outer re-enforcement authors abstract, dissertation in candidacy for PhD in Technical Sciences: 05.23.01 – Buildings and structures. Minsk: Belorussian Polytechnic Institute, 1990. 16 p. (in Russian)
6. Schnerch, D.; Dawood, M.; Rizkalla, S.; Sumner, E. and Stanford, K. Bond Behavior of CFRP Strengthened Steel Structures. In: *Advances in Structural Engineering*, 2006, Vol. 9, No. 6, p. 805–817. Accessed at: http://www.ce.ncsu.edu/srizkal/linked_files/Bond_Behavior_of_CFRP_Strengthened_Steel_Structures.pdf.
7. Golodnov, K. A. The rigidity of steel-ferro-concrete curved units of reconstructing structures and buildings. In: *Proceeding of the Donbas State Academy of Civil Engineering and Architecture*. Makiivka, 2005. Issue 2005-8(56): Towers: building materials, structures, processes, p. 65–69. (in Russian)
8. DBN B.3.1-1-2002. Repair process and strengthening of load carrying and filler constructions and support of industrial building and structures. Kyiv: Derzhbud of Ukraine, 2003. 82 p. (in Ukrainian)
9. Izbash, M. Yu. Locally prestressed steel and concrete structure for modern building and redevelopment: DEng dissertation. Harkiv, 2008. 282 p. (in Russian)

8. ДБН В.3.1-1-2002. Ремонт і підсилення несучих і огорожуючих будівельних конструкцій і основ промислових будинків і споруд [Текст]. – Вводяться вперше; введені в дію з 01.07.2003. – К.: Держбуд України, 2003. – 82 с.
9. Избаш, М. Ю. Локально предварительно напряжённые сталежелезобетонные конструкции для нового строительства и реконструкции [Текст]: дис. ... доктора техн. наук: 05.23.01 / Избаш Михаил Юльевич. – Харьков, 2008. – 282 с.
10. Маренин, В. Ф. Результаты испытания стальных балок, напряжённых электротермическим способом [Текст] / В. Ф. Маренин, Б. М. Второв // Промышленное строительство. – 1969. – № 11. – С. 41–43.
11. Narmashiri, K. Flexural strengthening of steel I-beams by using CFRP strips [Електронний ресурс] / Kambiz Narmashiri, N. H. Ramli Sulong and Mohd Zamin Jumaat // International Journal of the Physical Sciences. – 2011. – Vol. 6(7). – P. 1620–1627. – Режим доступу до статті: <http://www.academicjournals.org/ijps/pdf/pdf2011/4Apr/Narmashiri%20et%20al.pdf>.
12. Пенц, В. Ф. Розрахунок міцності металевих балок, які підсилені горизонтальною затяжкою [Текст] / В. Ф. Пенц, Ю. О. Кушнір // Ресурсо-економічні матеріали, конструкції та будівлі: 36. наук. праць. – Рівне, 2009. – Випуск 18. – С. 514–520.
13. Pisani, M. A. Beams prestressed with unbonded tendons at ultimate [Текст] / M. A. Pisani, E. Nicoli // Canadian Journal of Civil Engineering. – 1996. – Vol. 23, No. 6. – P. 1220–1230.
14. Chen, S. Load carrying capacity of composite beams prestressed with external tendons under positive moment [Електронний ресурс] / S. Chen, P. Gu // Journal of Constructional Steel Research. – 2005. – Vol. 61. – P. 515–530. – Режим доступу до статті: <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/scholar/downpaper/chenshiming-5>.
15. Choi, Dong-Ho. External Post-tensioning of Composite Bridges by a Rating Equation Considering the Increment of a Tendon Force Due to Live Loads [Електронний ресурс] / Dong-Ho Choi, Yong-Sik Kim and Hoon Yoo // Steel Structures. – 2008. – Vol. 8. – P. 109–118. – Режим доступу до статті: [http://www.ceric.net/kssc/KSSC_3_2008_8_2_109\(C\).pdf](http://www.ceric.net/kssc/KSSC_3_2008_8_2_109(C).pdf).
16. Особенности предварительно напряжения сталежелезобетонных конструкций [Текст] / А. Л. Шагин, М. Ю. Избаш, В. В. Асанов, Р. Н. Шемет // Будівельні конструкції. – К.: НДІБК, 2003. – Вип. 59. – С. 565–571.
10. Marenin, V. F.; Vtorov, B. M. Results of steel beam test, stressed by electrothermal process. In: *Industrial engineering*, 1969, No. 11, p. 41–43. (in Russian)
11. Narmashiri, Kambiz; Ramli Sulong, N. H. and Mohd Zamin Jumaat. Flexural strengthening of steel I-beams by using CFRP strips. In: *International Journal of the Physical Sciences*, 2011, Vol. 6(7), p.1620–1627. Accessed at: <http://www.academicjournals.org/ijps/pdf/pdf2011/4Apr/Narmashiri%20et%20al.pdf>.
12. Pents, V. F.; Kushnir, Yu. O. Power calculation of steel beams, strengthened by horizontal tie rod. In: *Collection of scientific papers «Resource efficient material, building and structures»*. Rivne, 2009. Issue 18, p. 514–520. (in Ukrainian)
13. Pisani, M. A.; Nicoli, E. Beams prestressed with unbonded tendons at ultimate. In: *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1996, Vol. 23, No. 6, p. 1220–1230.
14. Chen, S.; Gu, P. Load carrying capacity of composite beams prestressed with external tendons under positive moment. In: *Journal of Constructional Steel Research*, 2005, Vol. 61, p. 515–530. Accessed at: <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/scholar/downpaper/chenshiming-5>.
15. Choi, Dong-Ho; Kim, Yong-Sik and Yoo, Hoon. External Post-tensioning of Composite Bridges by a Rating Equation Considering the Increment of a Tendon Force Due to Live Loads. In: *Steel Structures*, 2008, Vol. 8, p. 109–118. Accessed at: [http://www.ceric.net/kssc/KSSC_3_2008_8_2_109\(C\).pdf](http://www.ceric.net/kssc/KSSC_3_2008_8_2_109(C).pdf).
16. Shagin, A. L.; Izbash, M. Yu.; Asanov, V. V.; Shemet, R. N. Special features of prestressing of steel and concrete structures. In: *Building constructions*, Kyiv: NDIBK, 2003, Issue 59, p. 565–571. (in Russian)

Кушнір Юлія Олександрівна – аспірант; кафедра конструкцій з металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наукові інтереси: дослідження напружено-деформованого стану сталевих та сталебетонних балок, підсилення балок попередньо напруженими затяжками.

Кушнір Юлія Александровна – аспірант; кафедра конструкцій из металла, дерева и пластмасс Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Научные интересы: исследование напряженно-деформированного состояния стальных и сталебетонных балок, усиление балок предварительно напряженными затяжками.

Iuliia Kushnir – postgraduate student; Department of Metal, Timber and Plastic Structures of the Poltava National Technical University named in honor of Yuri Kondratyuk. Research interests: investigations of the stressed and strained state of steel beams and composite beams of steel concrete, beams which are reinforced with prestressed braces.