

К вопросу об экономической эффективности стальной балки, преднапряженной вытяжкой стенки

А.А. Чебровский, А.А. Иодчик

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск

Аннотация: В статье дана оценка экономической эффективности бистальной балки, предварительно напряженной вытяжкой стенки. Сравнение проведено с обычной бистальной балкой без предварительного напряжения с одинаковым поперечным сечением. Рассмотрены затраты на материал, на проектирование, на производство, на транспортировку и монтаж. Учитывается, что для создания предварительного напряжения всегда нужно больше затрат труда, поэтому изготовление преднапряженных конструкций дороже, чем обычных конструкций. Цель предварительного напряжения заключается в сокращении расхода стали на изготовление конструкции. Приведена структура трудовых затрат для изготовления конструкций. Проведен сравнительный анализ стоимости «в деле» погонного метра балки, предварительно напряженной вытяжкой стенки, и балки без преднапряжения в зависимости от трудоемкости их изготовления.

Ключевые слова: тонкостенная конструкция, бистальная балка, двутавровое сечение, предварительное напряжение, вытяжка стенки, вес конструкции, накладные расходы, трудоемкость изготовления, экономическая эффективность, индивидуальное проектирование, стоимость «в деле».

В настоящий момент проблема экономической эффективности бистальных балок преднапряженных беззатяжечным способом исследована не в полной мере. В этом направлении работали такие специалисты, как Кравчук В.А. [1], Лихтарников Я.М. [2-3], Стрелецкий Н.С. [4-5] и др. [6-8]. В иностранной литературе не встречаются исследования, посвященные бистальным балкам двутаврового поперечного сечения преднапряженным вытяжкой стенки, однако проблема поиска эффективных способов преднапряжения не менее актуальна [9-11].

Применение предварительного напряжения целесообразно, если затраты на материал, на проектирование, на производство, на транспортировку и монтаж такой конструкции меньше показателей обычной конструкции. Для работ по предварительному напряжению всегда нужно больше затрат труда, поэтому изготовление преднапряженных конструкций дороже, чем обычных конструкций. Таким образом, если преднапряжение

позволит сократить расход стали на изготовление конструкции, тогда стоимость «в деле» преднапряженной балки (ПНБ) будет меньше, по сравнению с обычной балкой (ОБ).

Для оценки экономической эффективности преднапряжения первым показателем является вес конструкции. Затраты металла определяют по чертежам проектных организаций, представленным, например, на рис. 1.

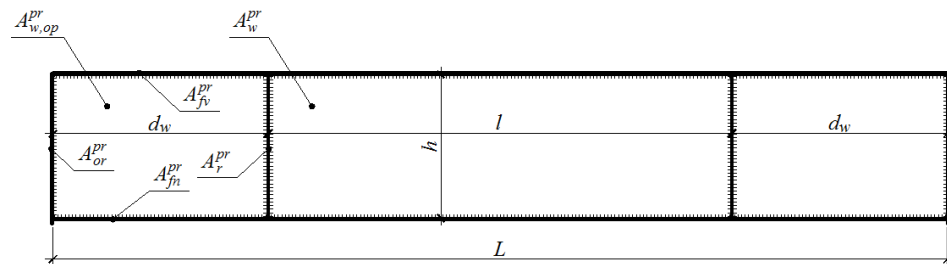


Рис. 1. - Балка двутаврового поперечного сечения

Вес преднапряженной конструкции G^{pr} можно определить по геометрическим характеристикам сечения:

$$G^{pr} = G_{yv}^{pr} + G_y^{pr}; \quad (1)$$

$$G_{yv}^{pr} = \rho_C V_{yv}^{pr} = \rho_C [A_{fv}^{pr} L + A_{fn}^{pr} L]; \quad (2)$$

$$G_y^{pr} = \rho_C V_y^{pr} = \rho_C [2d_w A_{w,op}^{pr} + A_w^{pr} l + h A_r^{pr} n_r^{pr} + h_{or} A_{or}^{pr} n_{or}], \quad (3)$$

Вес обычной балки G^{ob} будет:

$$G^{ob} = G_{yv}^{ob} + G_y^{ob}; \quad (4)$$

$$G_{yv}^{ob} = \rho_C V_{yv}^{ob} = \rho_C [A_{fv}^{ob} L + A_{fn}^{ob} L]; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} G_y^{ob} &= \rho_C V_y^{ob} = \rho_C [2d A_{w,op}^{ob} + A_w^{ob} l + h A_r^{ob} n_r^{ob} + h_{or} A_{or}^{ob} n_{or}] = \\ &= \rho_C [A_w^{ob} L + h A_r^{ob} n_r^{ob} + h_{or} A_{or}^{ob} n_{or}], \end{aligned} \quad (6)$$

Вес балки дополним весом наплавленного металла швов в 1,5% от веса балки:

$$G_s^{pr} = 1,015(G_{yv}^{pr} + G_y^{pr}); \quad (7)$$

$$G_s^{ob} = 1,015(G_{yv}^{ob} + G_y^{ob}). \quad (8)$$

Отношение средних значений стоимости высокопрочной и обычной сталей будет:

$$\omega = \frac{C_{yv}}{C_y}. \quad (9)$$

В бистальной балке стенка выполнена из стали с расчетным сопротивлением R_y , а верхний и нижний пояса - R_{yv} . Отношение расчетных сопротивлений сталей будет:

$$\beta = \frac{R_{yv}}{R_y}. \quad (10)$$

Стоимость стали обоих типов конструкций будет равна:

$$C_C^{pr} = C_{yv} G_{yv}^{pr} + C_y G_y^{pr} = C_y (2,45 G_{yv}^{pr} + G_y^{pr}); \quad (11)$$

$$C_C^{ob} = C_{yv} G_{yv}^{ob} + C_y G_y^{ob} = C_y (2,45 G_{yv}^{ob} + G_y^{ob}), \quad (12)$$

В стоимость изготовления стальных конструкций входят затраты на заработную плату рабочих, на накладные расходы, которые делятся на цеховые, общезаводские и коммерческие. Согласно [5], стоимость проектирования по типовым проектам равна 2% от полной стоимости изготовления, при индивидуальном проектировании - 5%. Проектирование преднапряженной балки будет индивидуальным, а проектирование обычной балки – типовым.

Пусть C_{PI}^{pr} и C_{PI}^{ob} - расходы на изготовление, а T_{II}^{pr} и T_{II}^{ob} - трудоемкости изготовления балок, тогда стоимость изготовления будет равна:

$$C_{II}^{pr} = 1,05 \cdot C_{PI}^{pr} T_{II}^{pr}; \quad (13)$$

$$C_{II}^{ob} = 1,02 \cdot C_{PI}^{ob} T_{II}^{ob}, \quad (14)$$

Накладные расходы для изготовления будут одинаковыми:

$$C_{PI} = C_{PI}^{pr} = C_{PI}^{ob}. \quad (15)$$

Трудоемкость с учетом высокопрочной стали по методу [2] будет:

$$T_{II} = T_{II,y} K_1 K_2 G_s ; \quad (16)$$

$$K_2 = \alpha^{-b} ; \quad (17)$$

$$\alpha = \frac{G_{yv}}{G_y}, \quad (18)$$

Структура трудовых затрат для изготовления конструкций принимается согласно [3] и сведена в таблицу 1.

Таблица 1

Трудоемкость изготовления ПНБ и ОБ.

Наименование цеха	Операции	Трудо- емкость ПНБ в % к общему кол-ву чел.-ч/т	Трудо- емкость ОБ в % к общему кол-ву чел.-ч/т
Подготовка	Правка металла	4	4
Обработка	Разметка и наметка	7	7
	Резка механическая и кислородная	12	12
	Образование отверстий	2	2
	Строжка и фрезеровка деталей	1	1
	Вальцовка, правка и гибка	4	4
Итого		30	30
Сварочный цех	Закрепление стенки, натяжение, контроль натяжения	100*	-
	Сборка	30	30
	Сварка	33	33
	Механослесарные работы	2	2
	Фрезеровка конструкций	1	1
	Грунтовка и окраска	4	4
Итого по операциям сварочного цеха		170	70
Всего $T_{II,y}$, %		200	100

С учетом данных таблицы 1 трудоемкость изготовления запишется:

$$T_{II}^{ob} = T_{II,y}^{ob} K_1 K_2 = T_{II,y}^{ob} \cdot 1,16 \cdot \left[\frac{G_{yv}^{ob}}{G_y^{ob}} \right]^{-0,19} G_s^{ob}, \quad (19)$$

$$T_{II}^{pr} = T_{II,y}^{pr} K_1 K_2 = 2,0 \cdot T_{II,y}^{ob} \cdot 1,16 \cdot \left[\frac{G_{yv}^{pr}}{G_y^{pr}} \right]^{-0,19} G_s^{pr}, \quad (20)$$

Заводская себестоимость конструкций включает стоимость стали и стоимость изготовления:

$$C_3 = C_C + C_{II}. \quad (21)$$

Стоимость транспортирования:

$$C_T = \frac{C_{PT} G_s}{\alpha'}; \quad (22)$$

$$\alpha' = 1 - \frac{1 - \alpha}{\psi}; \quad (23)$$

$$\psi = \frac{G_s}{G_{sg}} = \frac{G_s}{G_{fv} + G_{fn} + G_w}, \quad (24)$$

Расходы на транспортирование 1 т. конструкций от станции отправления к месту монтажа будут одинаковые:

$$C_{PT} = C_{PT}^{pr} = C_{PT}^{ob}. \quad (25)$$

Стоимость сборки и установки конструкций равна:

$$C_M = C_{PM} K_P K_M G_s, \quad (26)$$

В бистальных балках из-за применения разных классов сталей увеличивается стоимость сборки и установки, поэтому вводится коэффициент K_M :

$$K_M = \frac{K_{yv} G_{yv} + K_y G_y}{G_s}, \quad (27)$$

Расходы на монтаж 1 т. конструкций будут одинаковые:

$$C_{PM} = C_{PM}^{pr} = C_{PM}^{ob}. \quad (28)$$

Таким образом, стоимость «в деле» можно выразить так:

$$C_K = C_C + C_{II} + C_T + C_M. \quad (29)$$

Сравнительный анализ стоимости «в деле» балки, предварительно напряженной вытяжкой стенки, и балки без преднапряжения, в зависимости от трудоемкости их изготовления представлен на рис. 2.

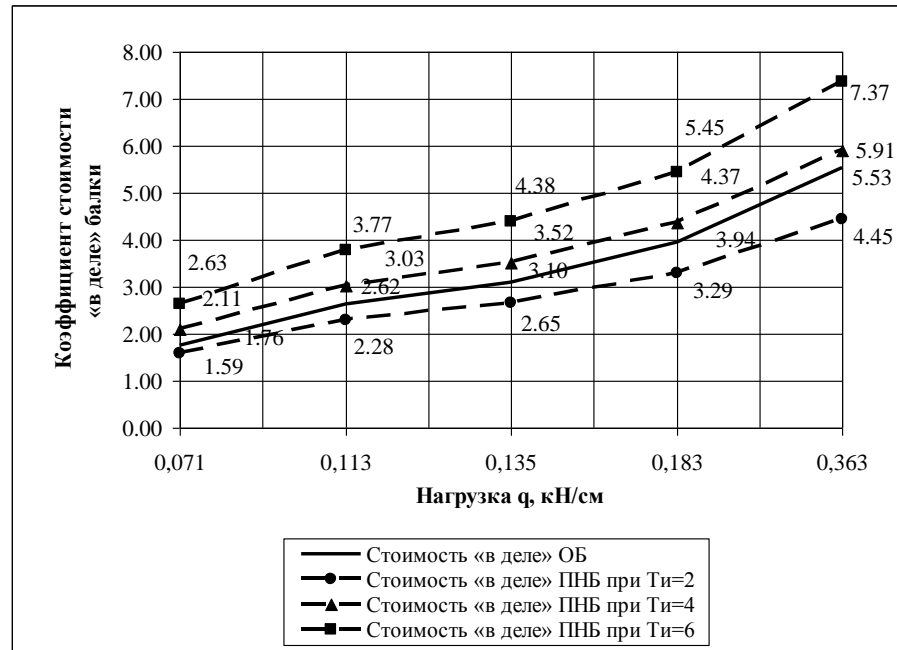


Рис. 2 - Стоимость «в деле» погонного метра ПНБ и ОБ, в зависимости от трудоемкости их изготовления

Таким образом, стоимость «в деле» ПНБ ниже ОБ, в том случае, когда стоимость изготовления ПНБ не более, чем в четыре раза превышает стоимость изготовления ОБ. Это необходимо учитывать при создании специального оборудования для изготовления такого типа ПНБ.

Литература

1. Кравчук В.А. Конструкции, предварительно напряженные без затяжек. Оптимальное проектирование: Учебное пособие. Хабаровск, 2010. - 221 с.
2. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. Москва, 1979. - 319 с.
3. Лихтарников Я.М. Техничко-экономические основы проектирования строительных конструкций: Учеб. пособие для вузов. Киев, 1980. - 240 с.

4. Стрелецкий Н.С. Металлические конструкции. Москва, 1961. - 776 с.
5. Стрелецкий Н.С. Проектирование и изготовление экономичных металлических конструкций. Москва, 1964. - 360 с.
6. Чебровский А.А. Совершенствование методики расчета стальных балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А.А. Чебровский, - Улан-Удэ. 2015. - 232 с.
7. Евтушенко А.М., Нуриев В.Э., Зотов П.В., Морева И.С. Технология легких стальных тонкостенных конструкций и её особенности. // Инженерный вестник Дона, 2018, №4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2018/5398/.
8. Решетников А.А. Корнет В.Ю. Леонова Д.А. Сравнительный анализ методик расчета тонкостенных стальных балок С-образного профиля по отечественным и зарубежным нормам. // Инженерный вестник Дона, 2018, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4788/.
9. Hadjipantelis N., Gardner L., Wadee M. A. Design of prestressed cold-formed steel beams. // Thin-Walled Structures, 2019, №140, pp. 565-578. URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823118313065/.
10. Blum A., Chodorowska D. Experimental analysis of prestressed thin-walled structures stability. // Thin-Walled Structures, 2007, №45, pp. 834-839. URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823107001747/.
11. Wen-Fu Zhang. Symmetric and antisymmetric lateral–torsional buckling of prestressed steel I-beams. // Thin-Walled Structures, 2018, №122, pp. 463-479. URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823117304329/.

References

1. Kravchuk V.A. Konstruktsii, predvaritel'no napryazhennyye bez zatyazhek. Optimal'noe proektirovanie [Structures prestressed without tendons. Optimal Design] Uchebnoe posobie. Khabarovsk, 2010. 221 p.
-

2. Likhtarnikov YA.M. Variantnoe proektirovanie i optimizatsiya stal'nykh konstruktsiy [Variant design and optimization of steel structures]. Moskva, 1979. 319 p.
 3. Likhtarnikov YA.M. Tekhniko-ekonomicheskie osnovy proektirovaniya stroitel'nykh konstruktsiy [Technical and economic foundations for the design of building structures] Ucheb. posobie dlya vuzov. Kiev, 1980. 240 p.
 4. Streletskiy N.S. Metallicheskie konstruktsii [Metal constructions]. Moskva, 1961. 776 p.
 5. Streletskiy N.S. Proektirovanie i izgotovlenie ekonomichnykh metallicheskiykh konstruktsiy [Design and manufacture of economical metal structures] Moskva, 1964. 360 p.
 6. Chebrovskiy A.A. Sovershenstvovanie metodiki rascheta stal'nykh balok, predvaritel'no napryazhennykh vytyazhkoy stenki [Improvement of the methodology for calculating steel beams prestressed by wall stretching] dis. ... kand. tekhn. nauk. Ulan-Ude, 2015. 232 p.
 7. Evtushenko A.M., Nuriev V.E', Zotov P.V., Moreva I.S. Inzhenernyy vestnik Dona, 2018, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2018/5398/.
 8. Reshetnikov A.A. Kornet V.YU. Leonova D.A. Inzhenernyy vestnik Dona, 2018, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4788/.
 9. Hadjipantelis N., Gardner L., Wade M. A. Thin-Walled Structures, 2019, №140, pp. 565-578. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823118313065/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823118313065/).
 10. Blum A., Chodorowska D. Thin-Walled Structures, 2007, №45, pp. 834-839. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823107001747/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823107001747/).
 11. Wen-Fu Zhang. Thin-Walled Structures, 2018, №122, pp. 463-479. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823117304329/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823117304329/).
-