

## Экспериментальные исследования стальных двутавровых балок, предварительно напряженных без затяжек

*А.А. Иодчик, А.А. Чебровский, В.М. Бурцев*

*Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск*

**Аннотация:** В статье анализируются результаты экспериментальных исследований предварительно напряженных стальных двутавровых балок. Отмечаются особенности напряженного и деформированного состояний сварных стальных балок предварительно напряженных вытяжкой стенки и изгибом начального таврового элемента. Рассматриваются результаты численного эксперимента с данными балками, проведенного в ПК ЛИРА. Приведена сравнительная оценка результатов численных и натурных испытаний предварительно напряженных двутавровых балок с аналогичного сечения биметаллическими балками без предварительного напряжения.

**Ключевые слова:** вытяжка стенки, изгиб тавра, асимметрия сечения, численный эксперимент, испытательный стенд, напряжение, несущая способность, жесткость балки, деформация изгиба, местная устойчивость.

На протяжении последних 30-ти лет на кафедре «Строительные конструкции» (с 2015 г. кафедра «Промышленное и гражданское строительство») Тихоокеанского государственного университета (г. Хабаровск) проводились исследования различных методов создания предварительного напряжения в стальных балках двутаврового сечения без применения затяжек.

Данные балки изготавливались биметаллическими. Исходя из предположения о положительном влиянии предварительных растягивающих напряжений на работу стали в сжатой зоне изгибаемого элемента, стенка выполнялась из низкоуглеродистой стали С245 с нормативным сопротивлением по пределу текучести  $R_{yn} = 245 \text{ Н/мм}^2$ . Учитывая возникновение дополнительных сжимающих напряжений в присоединяемом поясе, поясные листы выполнялись из стали повышенной прочности с нормативным сопротивлением по пределу текучести не ниже  $R_{yn} = 355 \text{ Н/мм}^2$ .

Изучались стальные балки, предварительно напряженные двумя способами: вытяжкой стенки балки и изгибом начального элемента таврового сечения.

В 1-ом способе предварительное напряжение в балке производилось механической вытяжкой стенки на специально изготовленном стенде, с возможностью создания расчетной величины растягивающих усилий при помощи хватных и натяжных устройств. Уровень натяжения стенки контролировался при помощи показаний индикатора динамометра ДОР-20 и тензометров Аистова ТА-2.

Усилия, создающие предварительное напряжение, убирались после того, как напряжения в растянутой стенке становились не ниже принятого расчетного сопротивления стали для стенки балки. В этот момент перед снятием растягивающей нагрузки к стенке приваривался один из поясов.

В итоге, после снятия начальных усилий по поперечному тавровому сечению, составленному из стенки и присоединенного пояса, сформировалась эпюра предварительных нормальных напряжений. В завершение к полученному предварительно напряженному тавру приваривался второй пояс.

При 2-ом способе при помощи сварки выполнялась тавровая заготовка, состоящая из стенки балки и одного поясного листа. Как и в 1-ом методе, для стенки принималась низкоуглеродистая сталь, а для поясов – сталь повышенной прочности. Предварительное напряжение создавалось при изгибе тавра расчетной нагрузкой, также до момента выравнивания напряжений в стенке с величиной расчетного сопротивления стали. После этого к напряженному изгибом тавровому элементу приваривался второй поясной лист из стали повышенной прочности. Затем производится снятие нагрузки, создавшей предварительные напряжения. Присоединенный к тавру пояс «фиксирует» растягивающие напряжения в нижней зоне стенки,

---

получая при этом некоторые сжимающие напряжения за счет упругой работы материала стенки после снятия внешней нагрузки. В проектном положении балки поясной лист, присоединенный к тавровой заготовке, становится «верхним» и к нему в дальнейшем прикладывается расчетная нагрузка, при этом верхняя зона стенки балки изначально будет иметь растягивающие напряжения.

Таким образом, на стадии изготовления балки ставится задача создания предварительных напряжений такой величины, чтобы при действии эксплуатационной нагрузки максимальное значение напряжений сжатия не превышало расчетного сопротивления материала стенки из низкоуглеродистой стали.

Теоретические предпосылки, параметры аналитических расчетов и ключевые этапы создания стальных предварительно напряженных балок описанными методами подробно изложены в [1] и [2].

Необходимое количество образцов для испытания принималось согласно теории планирования эксперимента, при этом минимальное количество образцов балок разных видов определялось согласно зависимости:

$$m = \left( \frac{f(x)}{\varepsilon} \right)^2 \sigma^2, \quad (1)$$

где  $m$  – необходимое количество образцов;  $\varepsilon$  – интервал измерений;  $f(x)$  – функция, зависящая от измеряемых параметров;  $\sigma$  – квадратическая ошибка измеряемых параметров.

Принимая во внимание, что на этапе создания предварительного напряжения, характерного как для 1-го, так и для 2-го способов, присоединяемый к тавровому элементу поясной лист получает некоторые начальные напряжения сжатия, и с учетом этого, при назначении

---

поперечного сечения балок была обеспечена местная устойчивость сжатого пояса балки, по указаниям табл. 30 СНиП II-23-81\* Стальные конструкции.

Работа предварительно напряженных балок под нагрузкой изучалась, в том числе, заданием соответствующих параметров поперечного сечения, а именно  $h_w$  – высоты стенки и  $t_w$  – толщины стенки балки. При этом гибкость стенки была выбрана -  $\lambda_w = h_w/l = 200$ , соотношение -  $h_w/l = 1/5$ .

Принимая во внимание указанное соотношение, пролет испытываемых балок был принят:  $l = 200$  см, высота стенки  $h_w = 40$  см, толщина стенки  $t_w = 0,2$  см.

В таблице 1 представлены геометрические размеры некоторых образцов балок, испытанных в натурном эксперименте.

Таблица 1

Размеры элементов балок, испытанных в натурном эксперименте

Обозначение образцов	Вид балки	Количество балок	Размеры прокатных листов, мм		
			1-ый поясной лист	Присоединяемый лист	Лист стенки
Э-1		1	100×4	100×4	400×2
Э-3		1	100×4	100×4	400×2
Э-4		1	100×4	100×4	400×2
Н-3		1	100×4	100×4	400×2
Н-4		1	100×4	100×4	400×2
Н-5		1	100×4	100×4	400×2

Создание предварительно напряженных балок изгибом тавровой заготовки производилось на специальном стенде, установленном на испытательном прессе. В дальнейшем на этом стенде производились испытания всех образцов балок (рис. 1). Для испытываемых образцов была выбрана расчетная схема в виде горизонтального стержня длиной 2000 мм, шарнирно закрепленного по концам и загруженного двумя

сосредоточенными вертикальными силами  $P$ , приложенными каждая с отступом от опоры на 0,6 м (600 мм).

После установки балок на стенд в местах приложения внешней нагрузки были приварены к стенке промежуточные ребра жесткости.

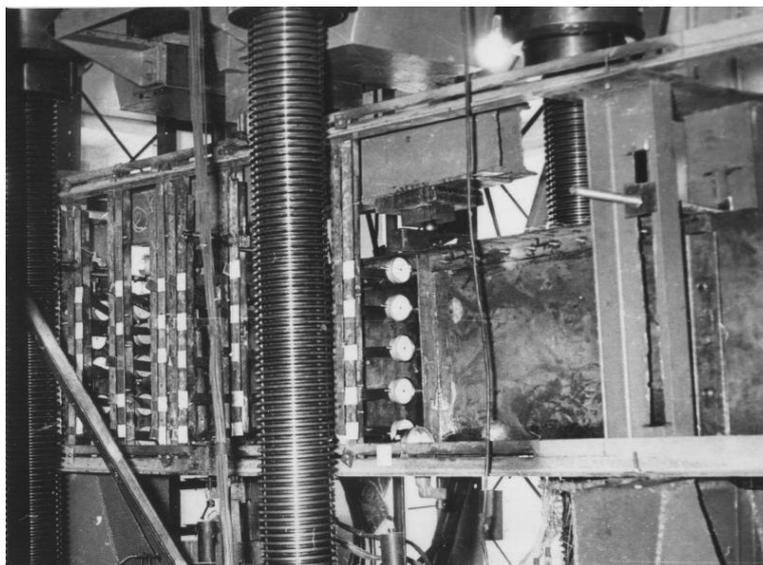


Рис. 1. - Испытательный стенд с установленной в нем балкой и измерительными приборами

Все образцы балок предварительно загружались на 10-12 минут нагрузкой, равной половине величины сосредоточенной силы, рассчитанной для обычных ненапряженных балок (Э-1 – Э-4).

Для контроля величин предварительных напряжений на начальном этапе, и измерения значений нормальных и касательных напряжений в процессе проведения натурных испытаний, на все представленные образцы были наклеены тензорезисторы. Схема расположения тензорезисторов на балках приведена на рис. 2, а.

В уровне верхнего пояса перемещения из плоскости изгиба измерялись на опорах балок и в середине пролета, а нижнем поясе измерения производились в середине пролета. Горизонтальные перемещения стенки из

---

плоскости изгиба в процессе испытаний фиксировались индикаторами часового типа, схема расстановки индикаторов представлена на рис. 2, б.

Для измерения вертикальных прогибов балок использовались прогибомеры Максимова, закрепленные на нижнем поясе балки. Места измерения вертикальных прогибов отмечены на рис. 2, б.

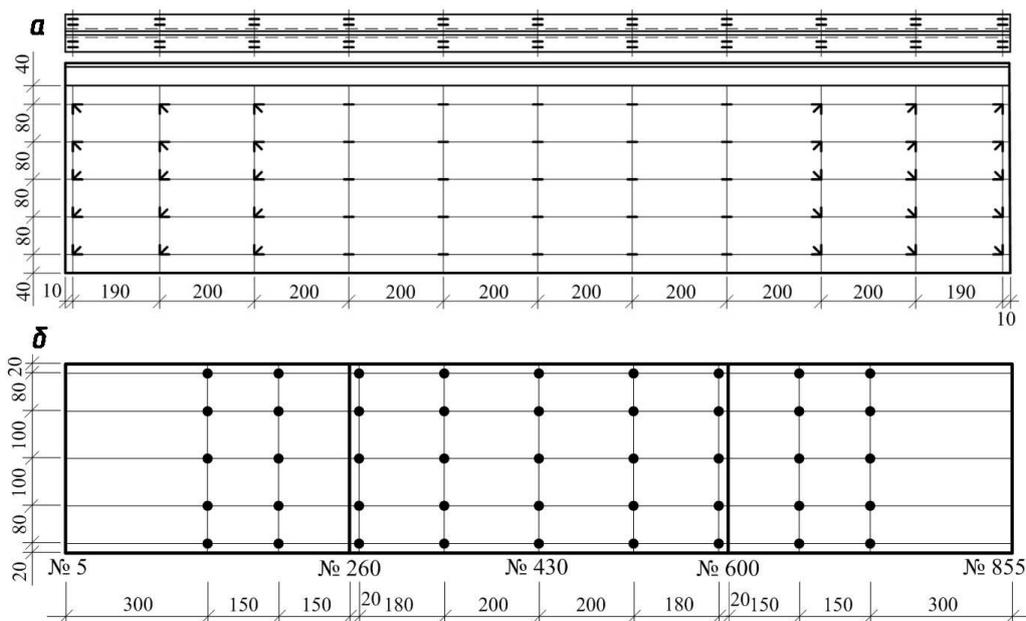


Рис. 2. - Схемы расположения измерительных приборов при испытании балок: а – схема наклейки тензрезисторов на пояс и стенку балки; б – схема расстановки индикаторов часового типа по стенке балки; № 5, № 260, № 430; № 600, № 855 – номера узлов, в которых измерялись вертикальные перемещения балок

При проведении экспериментальных исследований на стадии изготовления образцов ставилась задача получить картину распределения предварительных нормальных напряжений по высоте поперечного сечения тавра. В дальнейшем изучались напряженное и деформированное состояния балок, а также влияние предварительного напряжения на местную устойчивость стенки и сжатого пояса. Наиболее интересные особенности напряженного и деформированного состояния стальных предварительно

напряженных балок, анализ испытаний образцов, а также результаты численного эксперимента, проведенного по расчету данных балок, были опубликованы в гл. 3 [1] и гл. 8 [3].

Численный эксперимент проводился с использованием программных комплексов ЛИРА 9.6 и ЛИРА-САПР 2013. Для численного эксперимента были задействованы образцы, предварительное напряжение в которых производилось по 2-му способу (изгиб тавровой заготовки). Конечноэлементные модели балок как с предварительным напряжением (Н-ч), так и без него (Э), создавались с использованием 41-го конечного элемента (четырёхузлового), с разбивкой на данные элементы размерами 50 мм (высота)×40 мм (длина) – стенки балки, и 25 мм (ширина)×40 мм (длина) – поясных листов. Размеры моделей балок в численном эксперименте соответствовали размерам натуральных образцов, приведенным в табл. 1.

Начальное напряжение, создаваемое в балках механическим способом, в ПК ЛИРА моделировалось (условно) при помощи температурных воздействий. Причем величина температуры отдельных участков присоединяемого к тавровому элементу второго поясного листа рассчитывалась так, чтобы обеспечить равенство величин относительных температурных деформаций в узлах поясного листа и величин относительных силовых деформаций в соответствующих узлах нижней кромки стенки. Все этапы создания конечноэлементных моделей балок и результаты численного эксперимента полностью представлены в гл. 3 [1].

В качестве примера на рис. 3 показан характер распределения нормальных напряжений в элементах балки Н-3ч, загруженной сосредоточенными силами  $P = 120$  кН, при этом данная балка достигает максимальной несущей способности.

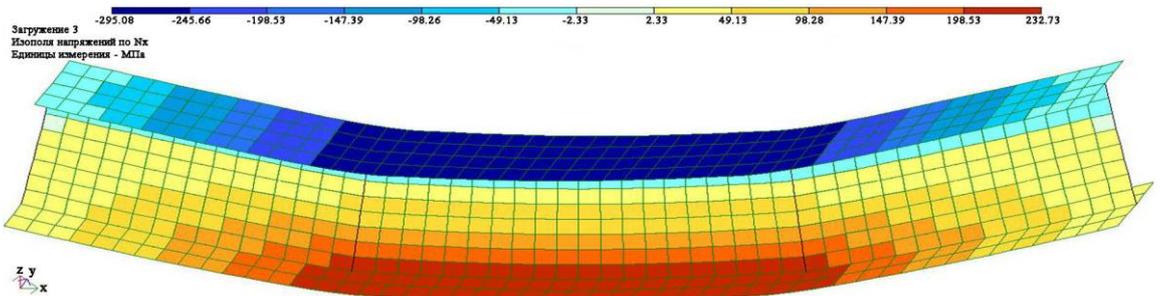


Рис. 3. - Характер распределения нормальных напряжений в поясах и стенке балки Н-3ч (действующая нагрузка  $P = 120$  кН)

Для сравнительной оценки деформированного состояния балки *Н-3ч* в численном эксперименте с деформированным состоянием точно такой же предварительно напряженной балки *Н-3* и балки без предварительного напряжения *Э-4* в натурном эксперименте, а также с аналогичной предварительно напряженной балкой *НТ*, рассчитанной ранее теоретическим методом (п. 1.3 [1]), на рис. 4 представлены значения вертикальных прогибов вышеперечисленных образцов балок при действии испытательной нагрузки  $P = 80$  кН.

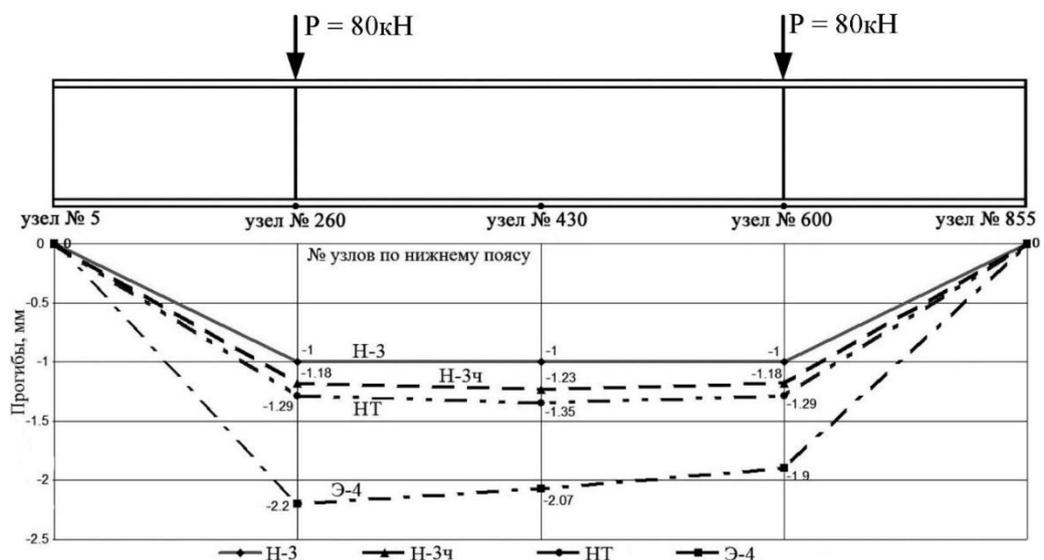


Рис. 4. - График вертикальных прогибов балок с нагрузками 80 кН:  
Н-3 – образец с предварительным напряжением в натурном эксперименте; Н-3ч – аналогичная по размерам модель, в численном

эксперименте; НТ – образец Н-3, в теоретических расчетах; Э-4 – такой же образец обычной биметаллической балки

Также было изучено влияние асимметрии сечения и высоты стенки на напряженное и деформированное состояния двутавровых балок предварительно напряженных по 2-му способу (изгибом). Несмотря на высказанное ранее в гл. 4 [1] предположение о том, что наиболее рациональным для данного типа предварительно напряженных балок является сечение с более развитым верхним (сжатым) поясом, проведенные в дальнейшем исследования показали большую эффективность двутаврового сечения развитым (примерно на 30 %) растянутым поясом. В свою очередь увеличение площади сечения сжатого пояса по сравнению с такой же балкой симметричного сечения может ухудшить напряженное и деформированное состояние балки, вызывая увеличение значений максимальных нормальных напряжений на 22 – 28 %, а вертикальных перемещений – на 23 – 26 %. Методика и результаты данного исследования приведены в гл. 3 [4].

В ходе натурных испытаний наиболее часто критические повреждения образцов (более 92 %) проявлялись в опорной части балок (рис. 5). Данные повреждения возникали из-за деформации стенки и сжатого пояса вследствие потери этими элементами балки местной устойчивости на участке между опорным ребром и ребром жесткости. Стоит отметить, что вопросы эффективности стальных тонкостенных балок, включая преднапряженные, интересуют многих исследователей в гражданском строительстве [5-6], в промышленности [7], и в том числе зарубежных [8-10].

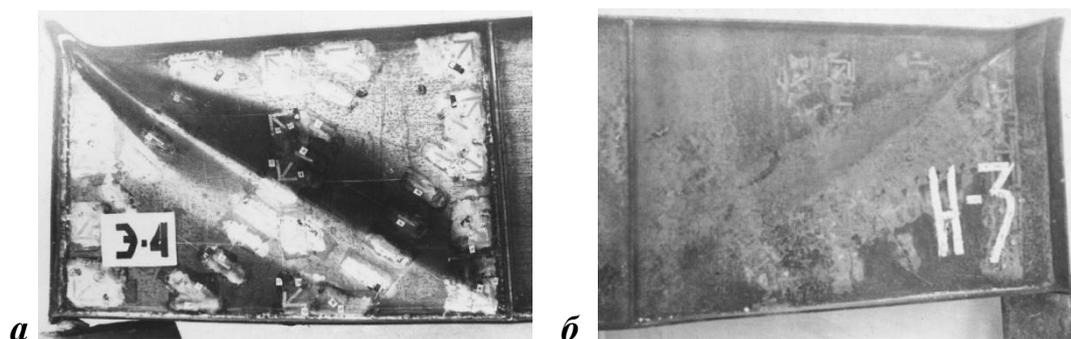


Рис. 5. - Критические повреждения образцов балок в ходе проведения натуральных испытаний: а – разрушение балки Э-4 (без предварительного напряжения); б – то же предварительно напряженной балки Н-3

В испытанных образцах предварительно напряженных балок при достижении ими максимальной несущей способности на более 70 % высоты стенки всё ещё действуют начальные растягивающие напряжения (рис. 3), повышая тем самым местную устойчивость стенки балки.

Полученные результаты натуральных испытаний и численных экспериментов позволяют утверждать, что использование асимметричного сечения с увеличенной на 30 % площадью растянутого пояса уменьшает значения максимальных напряжений в балке в среднем до 25 % по сравнению с балкой симметричного сечения.

На этапе создания предварительного напряжения балки получают начальный обратный выгиб, равный  $1/420-1/450$  длины балки. Деформативность изученных предварительно напряженных балок меньше, по сравнению с аналогичными биметаллическими балками на 45 – 68 %, в зависимости от их высоты сечения. Наибольший эффект от предварительного напряжения может быть получен в случае, когда под действием внешних нагрузок полностью преодолены предварительные напряжения и обратный выгиб балки.

В середине пролета балки предварительное напряжение способствует повышению местной устойчивости стенки балки на 37 – 46 %. Местная устойчивость присоединенного на стадии создания предварительного напряжения пояса, получающего дополнительные нормальные напряжения сжатия, снижается вследствие этого на 13 %.

Отклонения значений предварительных нормальных напряжений, полученных в балке с использованием описанных методов, по результатам натурных испытаний и расчетов в ПК ЛИРА составили не более 8,5 %.

### Литература

1. Иодчик А.А. Исследование напряженно-деформированного состояния стальных тонкостенных балок, предварительно напряженных изгибом тавра : дис. ... канд. техн. наук. - Улан-Удэ. 2013. - 161 с.
  2. Кравчук В.А. Металлические строительные конструкции, предварительно напряженные продольной деформацией стенки : дис. ... д-ра техн. наук / В. А. Кравчук, - СПб., 1998. - 554 с.
  3. Кравчук В.А. Стальные стержни, предварительно напряженные без затяжек. Научное издание. - М.: Издательский дом АСВ, 2015. - 552 с.
  4. Иодчик А.А., Чебровский А.А. Совершенствование методики расчета стальных двутавровых балок, предварительно напряженных без затяжек. - Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2020. - 178 с.
  5. 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/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2018/5398/).
  6. 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/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4788/).
  7. Гайдаров Ю.В. Предварительно напряженные стальные конструкции в промышленном строительстве. М.: Госстройиздат, 1960. - 88 с.
-

8. 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/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823118313065/).

9. 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/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823107001747/).

10. 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/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823117304329/).

### References

1. Iodchik A.A. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya stal'nykh tonkostennykh balok, predvaritel'no napryazhennykh izgibom tavra [Investigation of the stress-strain state of steel thin-walled beams, prestressed by bending of the T-bar] dis. ... kand. tekhn. nauk, Ulan-Ude. 2013. 161 p.

2. Kravchuk V.A. Metallicheskie stroitel'nye konstruksii, predvaritel'no napryazhennye prodol'noy deformatsiey stenki [Metal building structures, prestressed by longitudinal stretching of the web] dis. ... d-ra tekhn. nauk. SPb., 1998. 554 p.

3. Kravchuk V.A. Stal'nye sterzhni, predvaritel'no napryazhennye bez zatyazhek [Steel rods, prestressing without tendons] nauchnoe izdanie. M., 2015. 552 p.

4. Iodchik A.A., Chebrovskiy A.A. Sovershenstvovanie metodiki rascheta stal'nykh dvutavrovykh balok, predvaritel'no napryazhennykh bez zatyazhek [Improvement of the methodology for calculating steel I-beams, prestressed without tendons]. Khabarovsk. 2020. 178 p.

5. Evtushenko A.M., Nuriev V.E', Zotov P.V., Moreva I.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2018/5398/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2018/5398/).

6. Reshetnikov A.A. Kornet V.YU. Leonova D.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4788/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4788/).

7. Gaydarov YU.V. Predvaritel'no napryazhennye stal'nye konstruksii v promyshlennom stroitel'stve [Prestressed steel structures in industrial construction]. M.: Gosstoyizdat, 1960. 88 p.

8. Hadjipantelis N., Gardner L., Wadee 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/).

---



9. 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/).

10. 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/).