

Анализ НДС составного сечения из тонкостенных профилей с учетом начальных геометрических несовершенств



**Корсун
Наталья
Дмитриевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры Строительных конструкций ФГБОУ ВШ Тюменский индустриальный университет
e-mail: korsunnd@tyuiu.ru



**Простакишина
Дарья
Анатольевна**

аспирант кафедры Строительных конструкций ФГБОУ ВШ Тюменский индустриальный университет
e-mail: d.prostackishina@yandex.ru

В статье рассмотрен вопрос задания начальных геометрических несовершенств при расчете тонкостенных конструкций, учет которых предусмотрен европейским стандартом EN 1993-1-3:2006 и отечественными нормами СП 260.1325800.2016. Представлена методика расчета элемента из спаренных стальных тонкостенных сигма-профилей, основанная на методе редуцированного сечения с учетом геометрических несовершенств профилей по стандартам изготовления. В результате расчета получены графики изменения напряжений в сечении при действии продольной сжимающей силы с изгибом в зависимости от степени редуцирования сечения и наличия начальных геометрических несовершенств.

Ключевые слова: тонкостенные конструкции, начальные геометрические несовершенства, осевое сжатие с изгибом, ЛСТК.

KORSUN N. D., PROSTAKISHINA D. A.
STRUCTURAL ANALYSIS OF STRESS AND STRAIN STATE OF PAIRED THIN-WALLED SECTION WITH INITIAL GEOMETRIC IMPERFECTIONS

The article deals with the problem of specifying the initial geometric imperfections in the calculation of thin-walled structures, the account of which is provided by the European standard EN 1993-1-3:2006 and Russian norms SP 260.1325800.2016. The article presents a method of calculating the element of paired steel thin-walled sigma-profiles, based on the method of reduced cross-section and account the geometric imperfections of the profiles according to manufacturing standards. Based on the results of the calculation, the graphs of stress changes in the cross section under the action of a longitudinal compressive force with a bend depending on the degree of reduction of the cross section and the presence of initial geometric imperfections are obtained.

Keywords: thin-walled structures, initial geometric imperfections, axial loading with bending, CFS.

Актуальность и цель исследования

В течение последнего десятилетия в отечественном строительстве широко применима технология с использованием легких стальных тонкостенных конструкций (далее по тексту — ЛСТК) [1].

ЛСТК — элементы, изготавливаемые из тонколистового проката толщиной менее 4 мм и шириной 500 мм и более [2] из сталей марок 250–350 по ГОСТ Р 52246 и стали 08пс по ГОСТ 1050, механические свойства которых определяются вдоль направления проката. Технология изготовления конструкций, согласно ГОСТ 14350–80, представляет собой профи-

лирование заготовок на профилегибочных агрегатах, что позволяет выпускать профили различных типоразмеров и форм, сокращая трудозатраты и расходы на материал [3].

Строительство с применением ЛСТК является наиболее индустриализованным и легко управляемым процессом, так как включает в себя максимальную заводскую готовность. Сооружения, возводимые из ЛСТК, представляют собой легкие каркасы, рамы которых объединяются между собой в пространственную систему. В качестве основных несущих конструкций каркаса из ЛСТК наиболее часто используются спаренные профили, соединен-

ные между собой в симметричное сечение болтами, самонарезающими винтами, а также заклепками.

Технология ЛСТК имеет ряд преимуществ, основным из которых является малый удельный вес конструкции, что позволяет снижать затраты на возведение фундамента, а также не использовать грузоподъемные механизмы при новом строительстве и реконструкции зданий в условиях стесненной городской застройки. Помимо этого, технология характеризуется отсутствием «мокрых процессов», что позволяет производить строительные работы в любой период года [3].

Однако существуют проблемы, ограничивающие развитие тонкостенных конструкций в отечественной строительной индустрии, основной из которых является недостаточная проработанность отечественной нормативной базы по проектированию элементов из ЛСТК [2]. Введенный в 2016 г. Свод правил на стальные тонкостенные конструкции [2], в основу которого положен европейский стандарт EN 1993-1-3:2006 [16], рекомендует для оценки реального поведения конструкций проводить расчеты, основываясь на экспериментальных данных, что требует дополнительных затрат при проектировании.

Особенности расчета тонкостенных профилей определяются рядом существенных факторов [2]:

- потеря местной устойчивости отдельных участков сечения сжатой зоны;
- потеря устойчивости формы сечения;
- потеря общей устойчивости элемента;
- начальные геометрические несовершенства.

Последние возникают вследствие наличия упругих и упругопластических деформаций при изготовлении профиля путем холодной прокатки. Величины начальных геометрических несовершенств тонкостенных профилей рекомендуется назначать в зависимости от класса точности изготовления, исходя из ГОСТ 23188–2012. Для ЛСТК-профилей класс точности должен быть не ниже 5. Несмотря на то, что необходимость учета начальных геометрических несовершенств прописана в нормах [2], методика их учета отсутствует.

На основании изложенного сформулирована цель исследования: изучить влияние на НДС стержня составного симметричного сечения из sigma-профилей в условиях дей-

ствия продольной силы с изгибом начальных геометрических несовершенств профилей.

Обзор исследований работы легких стальных тонкостенных конструкций

Основоположителем расчета тонкостенных профилей является С. П. Тимошенко, в работах которого исследовано поведение консольных балок на общую устойчивость с эффектом кручения на основе теории пластин [4, 5]. В. З. Власовым разработана теория расчета тонкостенных балок открытых профилей при совместном действии изгиба и кручения, нормальные напряжения по данной теории зависят от поперечной силы, изгибающих моментов в двух плоскостях, а также изгибно-крутящего бимомента [6, 7]. Теория, предложенная В. З. Власовым, нашла свое продолжение в работах Б. М. Броуде, Е. А. Бейлина и др. [8].

В работах Г. И. Белого на основании метода редуцирования сечения построена инженерная методика, учитывающая коэффициенты устойчивости для различных видов нагружений образца, определена зависимость критической силы от величины относительного эксцентриситета [9–12]. Э. Л. Айрумян рассматривает общую и местную устойчивость холодногнутых балок и прогонов. На основании зарубежных норм разработана методика определения критической нагрузки с учетом гибкости стенки профиля [13–17]. А. А. Кикоть исследует влияние параметров стенки стального тонкостенного sigma-профиля на эффективность его работы в условиях изгиба, в ходе работы сделан вывод о влиянии ширины пояса, которое зависит от высоты профиля, толщины стенки и временного сопротивления стали, аналогичные исследования проводились для сечений с- и z-образных профилей [18–20].

Обобщая достижения в области исследований работы ЛСТК, можно констатировать, что хорошо изучены вопросы общей и местной устойчивости тонкостенных стержней в условиях поперечного изгиба, изгиба с кручением, продольно-поперечного изгиба и внецентренного сжатия с учетом дополнительных компонент усилий от смещения центра тяжести редуцированного сечения. Однако недостаточно исследованы вопросы учета начальных геометрических несовершенств при расчетах НДС тонкостенных стержней.

Методика расчета тонкостенного стержня с учетом различных видов начальных геометрических несовершенств

Методика расчета основана на аналитическом методе редуцированного сечения и закритической работе элемента, реализованном в отечественной и зарубежной нормативной литературе [2, 16]. Данный метод применим для профилей толщиной 0,45...15,0 мм при ограниченном диапазоне соотношений размеров сечений отдельных участков сечения (полки, стенки и отгибы):

$$\begin{cases} b/t \leq 100, \\ c/t \leq 40, \\ h/t \leq 300 \sin \varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где b — ширина полки; c — высота отгиба; h — высота профиля; t — толщина листа; φ — угол между стенкой и полкой.

Метод использования эффективной площади предусматривает замену участков сечения на отдельные пластины с различным закреплением. Для сжатых участков сечения полные геометрические характеристики заменяются редуцированными с учетом потери местной устойчивости, для растянутых участков полные и эффективные характеристики совпадают. На редуцированных участках сечения при расчете изменяются толщина и ширина пластины путем умножения начальной толщины на коэффициент редукиции ρ . Коэффициент редукиции зависит от соотношения напряжений в элементе сечения, его гибкости, граничных условий закрепления пластины, а также коэффициента потери устойчивости.

Для краевого элемента жесткости, подкрепляющего полку, принимается допущение о том, что жесткость пружины равна бесконечности $K = \infty$, для части сечения с промежуточным элементом жесткости — аналогично.

После определения начального коэффициента редукиции производятся последующие итерации, в ходе которых определяется жесткость связей редуцированного сечения, а также коэффициент снижения несущей способности $\chi_{d,n}$, при последующих итерациях сжимающее напряжение уменьшается с учетом коэффициента снижения несущей способности до тех пор, пока не выполнится условие:

$$\chi_{d,n} \approx \chi_{d,(n-1)}, \text{ но } \chi_{d,n} \leq \chi_{d,(n-1)}. \quad (2)$$

Учет величины начальных геометрических несовершенств профилей

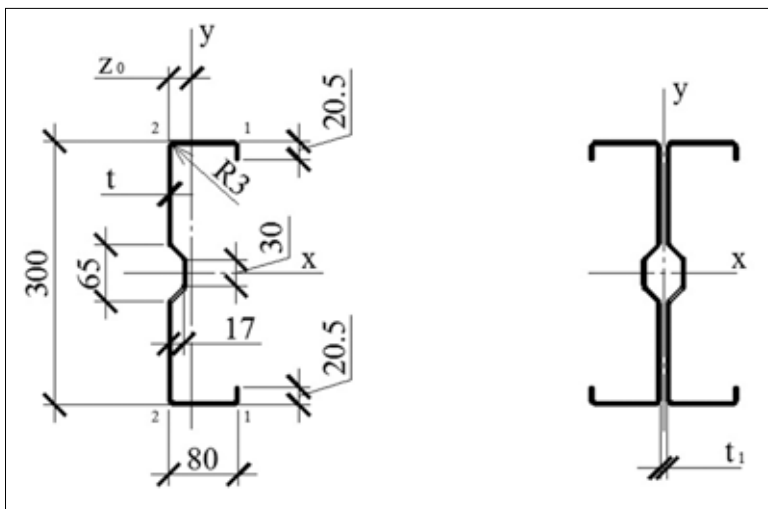


Иллюстрация 1. Геометрические размеры сигма-профиля и форма спаренного сечения. Авторы: Н. Д. Корсун, Д. А. Простакишина

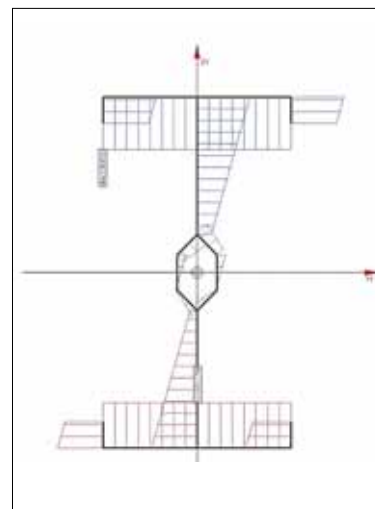


Иллюстрация 2. Схема распределения напряжений по сечению элемента при сжатии с изгибом без учета начальных геометрических несовершенств. Авторы: Н. Д. Корсун, Д. А. Простакишина

Таблица 1. Геометрические характеристики полного сечения

A, см ²	W _y , см ³	W _x , см ³	I _y , см ⁴	I _x , см ⁴
20,03	28,36	167,34	226,88	2 510,05

Таблица 2. Геометрические характеристики эффективного сечения при сжатии с изгибом без учета начальных геометрических несовершенств

A, см ²	W _y , см ³	W _x , см ³	I _y , см ⁴	I _x , см ⁴
11,63	17,93	32,70	143,42	753,25

производился согласно [2] для местных несовершенств исходя из соотношения:

$$\frac{e_0}{L} = \frac{1}{250}, \quad (3)$$

а для общих несовершенств в соответствии с ГОСТ 23188–2012 — для 5 класса точности элементов.

Так как начальные несовершенства являются неконтролируемой численно и по направлению величиной, но создающей дополнительный эксцентриситет приложения продольной сжимающей силы, необходимо задаваться максимально возможным значением эксцентриситета для данной длины стержня.

Объектом исследования является элемент симметричного сечения из двух сигма-профилей размерами сечения $h \times b \times t = 300 \times 80 \times 2$ мм (Иллюстрация 1), длиной 4,5 м. Материал профиля — сталь 350 по ГОСТ Р 52246–2016. Геометрические характеристики полного сечения представлены в Таблице 1.

Расчетная длина стержня в плоскости изгибающего момента равна 4,5 м, из плоскости — 1,5 м, что соответствует реальной работе спа-

ренных сигма-профилей в составе каркаса здания.

Для определения редуцированных характеристик сечения в случае сжатия с изгибом без учета начальных геометрических несовершенств коэффициент редукиции ρ для сжатых полок определяется, как для случая центрального сжатия с учетом того, что максимальные напряжения сжатия равны пределу текучести стали $\sigma_{\max} = R_y$, эффективные характеристики растянутых полок соответствуют полным. Для элемента сечения с промежуточным элементом жесткости коэффициент редукиции ρ определяется исходя из соотношений напряжений сжатия и растяжения (Иллюстрация 2).

Эффективные геометрические характеристики сечения при сжатии с изгибом представлены на Иллюстрации 3 и в Таблице 2.

Для учета начальных геометрических несовершенств определим допуски прямолинейности для элемента длиной 4,5 м пятого класса точности (Иллюстрация 4). Максимально возможные искривления равны 30 мм.

В ходе исследования было выделено два характерных случая распределения напряжений по сечению в зависимости от приложения

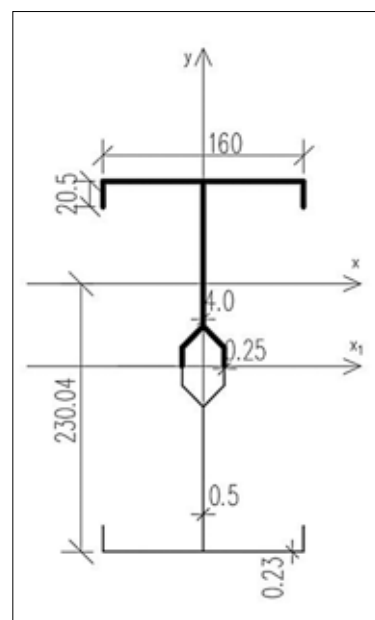


Иллюстрация 3. Эффективное поперечное сечение элемента при сжатии с изгибом без учета начальных геометрических несовершенств. Авторы: Н. Д. Корсун, Д. А. Простакишина

продольной сжимающей силы (Иллюстрация 5) (*случай 1* — смещение продольной силы по оси y на 30 мм без углового смещения; *случай 2* — смещение продольной силы по оси x с угловым смещением на ± 45 град.).

Вследствие переноса центра тяжести сечения при переходе от полных геометрических характеристик к эффективным возникают дополнительные напряжения от усилий ΔM_x и ΔM_y .

Эффективные геометрические характеристики сечения при сжа-

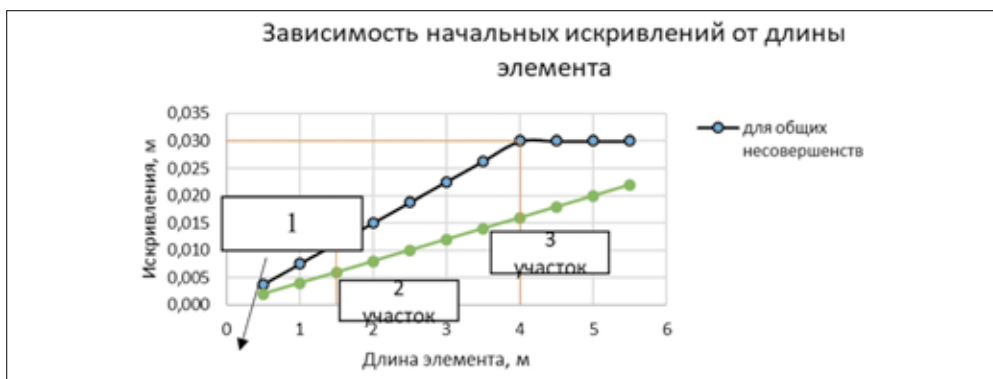


Иллюстрация 4. Зависимость начальных искривлений от длины элемента [2]

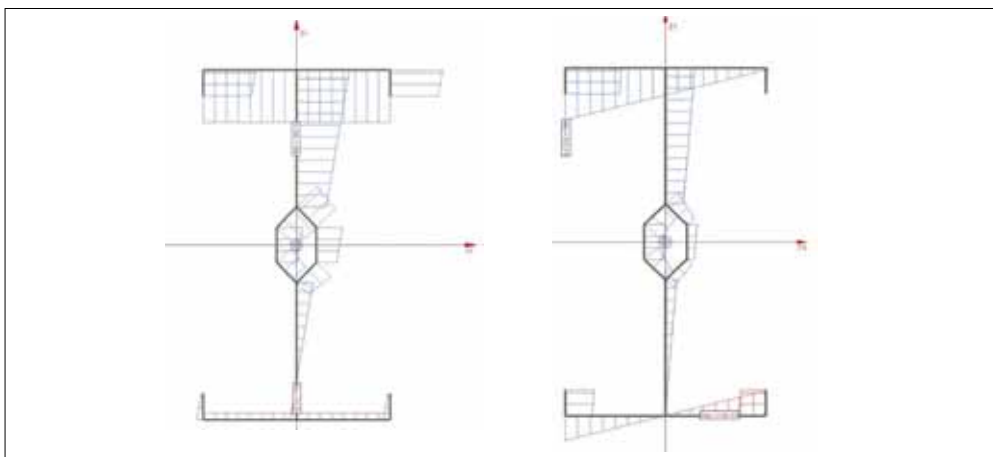


Иллюстрация 5. Распределение напряжений по сечению при сжатии с изгибом при учете начальных геометрических несовершенств.
Авторы: Н. Д. Корсун, Д. А. Простакишина

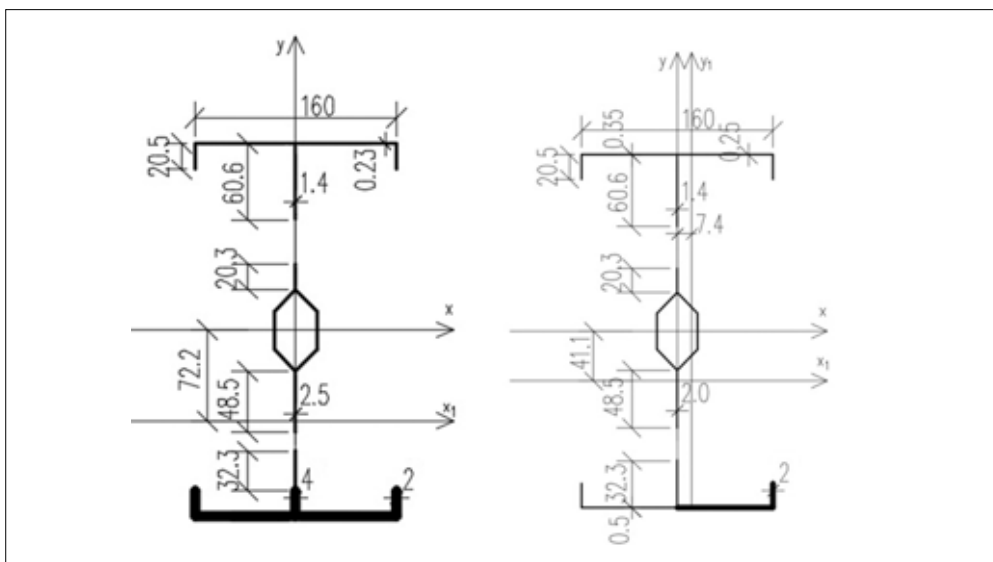


Иллюстрация 6. Эффективное поперечное сечение элемента при сжатии с изгибом с учетом начальных геометрических несовершенств. Авторы: Н. Д. Корсун, Д. А. Простакишина

Таблица 3. Геометрические характеристики эффективного сечения при сжатии с изгибом с учетом начальных геометрических несовершенств

Случай	$A, \text{см}^2$	$W_y, \text{см}^3$	$W_x, \text{см}^3$	$I_y, \text{см}^4$	$I_x, \text{см}^4$
1	9,84	17,78	42,45	142,24	943,22
2	8,75	9,73	48,54	93,15	958,27



Иллюстрация 7. Зависимость напряжений в эффективном сечении от напряжений в полном сечении без учета начальных геометрических несовершенств. Авторы: Н. Д. Корсун, Д. А. Простакишина



Иллюстрация 8. Зависимость напряжений в эффективном сечении от напряжений в полном сечении с учетом начальных геометрических несовершенств. Авторы: Н. Д. Корсун, Д. А. Простакишина

тии с изгибом при учете начальных несовершенств по случаям 1 и 2 представлены на Иллюстрации 6 и в Таблице 3.

Анализируя геометрические характеристики, можно сделать вывод об уменьшении площади сечения в сравнении со случаем, не учитывающим начальные геометрические несовершенства на 15 и 24% соответственно для случаев 1 и 2. Это связано с увеличением сжатой зоны сечения, также наблюдается увеличение момента сопротивления относительно горизонтальной оси (смещение оси центра тяжести эффективного сечения в сторону растянутого волокна) и уменьшение — относительно вертикальной. Максимальные напряжения в эффективном сечении наблюдаются для случая 2 при учете начальных геометрических несовершенств в плоскости, перпендикулярной плоскости изгиба.

На Иллюстрациях 7, 8 представлены графики изменения напряжений в сечении при действии продольной сжимающей силы с изгибом в зависимости от степени редуцирования сечения и наличия начальных геометрических несовершенств.

Заключение

Расчет напряжений в эффективном сечении при сжатии с изгибом без учета начальных геометрических несовершенств показал, что прирост напряжений происходит вследствие потери местной устойчивости отдельных элементов сечения, при этом упругопластическая работа материала наступает при достижении напряжений в полном сечении, равных $0,71R_y$.

При учете начальных несовершенств материал переходит в зону упругопластической работы при напряжениях в полном сечении, равных $0,58R_y$. Прирост напряжений

связан с возникновением дополнительных усилий ΔM_x и ΔM_y .

Список использованной литературы

- 1 Айрумян Э. Л. Перспективы ЛСТК в России / Э. Л. Айрумян, Н. И. Каменщиков, М. А. Липленко // СтройПРОФИЛЬ. — 2013. — №10. — С. 12–17.
- 2 СП 260.1325800.2016. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов / Минстрой России. — М., 2016. — 124 с.
- 3 Рыбаков В. А. Применение полусдвиговой теории В. И. Сливкера для анализа напряженно-деформированного состояния систем тонкостенных стержней: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.04. — СПб., 2012. — 21 с.
- 4 Тимошенко С. П. Устойчивость упругих систем. Добавление: В. З. Власов. Тонкостенные упругие стержни и оболочки с жестким открытым профилем. — М.: Л., 1946.
- 5 Тимошенко С. П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек: избр. работы / Под ред. Э. И. Григолюка. — М.: Наука, 1971. — 807 с.
- 6 Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни. — М.: Физматгиз, 1959. — 568 с.
- 7 Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни (прочность, устойчивость, колебания). — М.; Л.: Гос. изд-во строит. лит., 1940. — 276 с.
- 8 Корчак М. Д. Влияние геометрических несовершенств на несущую способность легких металлических конструкций: Автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.23.01. — Электросталь, 1993. — 39 с.
- 9 Белый Г. И. Пространственная устойчивость элементов конструкций из стальных холодногнутых профилей / Г. И. Белый, И. В. Астахов // Монтажные и специальные работы в строительстве. — 2006. — №9.
- 10 Белый Г. И. К определению редуцированных сечений стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций // Вестн. гражданских инженеров. — 2017. — №5 (64). — С. 33–37.
- 11 Белый Г. И. О расчете упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформированной схеме с учетом касательных напряжений деформаций и деформаций сдвига // Металлические конструкции и испытания сооружений. — 1985. — № 62. — С. 10–20.

- 12 Белый Г. И. Новые положения в инженерной методике расчета на устойчивость стальных стержневых элементов конструкций из холодногнутых профилей // Вестн. гражданских инженеров — 2017. — № 2 (61). — С. 75–80.
 - 13 Айрумян Э. Л. Исследование работы стальной фермы из холодногнутых профилей с учетом их местной и общей устойчивости / Э. Л. Айрумян, Г. И. Белый // Промышленное и гражданское строительство. — 2010. — № 5. — С. 41–44.
 - 14 Айрумян Э. Л. Особенности расчета стальных конструкций из тонкостенных гнутых профилей // Монтажные и специальные работы в строительстве. — 2008. — № 3. — С. 2–7.
 - 15 Айрумян Э. Л. Рекомендации по расчету стальных конструкций из тонкостенных гнутых профилей // СтройПрофиль. — 2009. — № 8 (78). — С. 12–14.
 - 16 Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1–3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Ref. No. EN 1993-1-3:2006. — Brussels: European Committee for n, 2006. — 125 p.
 - 17 AISI S100–2007 North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2007.
 - 18 Кикоть А. А. Программа расчета прогибов изгибаемых элементов из стальных тонкостенных профилей / А. А. Кикоть, М. Н. Корницкая, Е. В. Мурзин // Проектирование и строительство в Сибири. — 2010. — № 4 (58). — С. 8–10.
 - 19 Кикоть А. А. Влияние ширины пояса и параметров стенки на эффективность стального холодногнутого профиля сигмаобразного сечения при работе на изгиб / А. А. Кикоть, В. В. Григорьев // Инженерно-строительный журнал. — 2013. — № 1. — С. 97–101.
 - 20 Кикоть А. А. Влияние ширины поясов и отгибов в сечениях с- и z-образных стальных тонкостенных гнутых профилей на эффективность работы в условиях изгиба // Ползуновский вестник. — 2011. — № 1. — С. 1–6.
- Список испол'зованной литературы**
- 1 Ajrumyan Eh. L. Perspektivy LSTK v Rossii / Eh. L. Ajrumyan, N. I. Kamenshchikov, M. A. Liplenko // StrojPROFIL'. — 2013. — № 10. — С. 12–17.
 - 2 SP 260.1325800.2016. Konstrukcii stal'nye tonkostennye iz holodnognutyh ocinkovannyh profilej i gofrirovannyh listov / Minstroy Rossii. — М., 2016. — 124 s.
 - 3 Rybakov V. A. Primenenie polusdvigovoj teorii V. I. Slivkera dlya analiza napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sistem tonkostennyh sterzhnej: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 01.02.04. — SPb., 2012. — 21 s.
 - 4 Timoshenko S. P. Ustojchivost' uprugih sistem. Dobavlenie: V. Z. Vlasov. Tonkostennye uprugie sterzhni i obolochki s zhestkim otkrytym profilem. — М.; Л., 1946.
 - 5 Timoshenko S. P. Ustojchivost' sterzhnej, plastin i obolochek: izbr. raboty / Pod red. Eh. I. Grigolyuka. — М.: Nauka, 1971. — 807 s.
 - 6 Vlasov V. Z. Tonkostennye uprugie sterzhni. — М.: Fizmatgiz, 1959. — 568 s.
 - 7 Vlasov V. Z. Tonkostennye uprugie sterzhni (prochnost', ustojchivost', kolebaniya). — М.; Л.: Gos. izd-vo stroit. lit., 1940. — 276 s.
 - 8 Korchak M. D. Vliyanie geometricheskikh nesovershenstv na nesushchuyu sposobnost' legkih metallicheskih konstrukcij: Avtoref. dis. ... d-ra. tekhn. nauk: 05.23.01. — Ehlektrostal', 1993. — 39 s.
 - 9 Belyj G. I. Prostranstvennaya ustojchivost' ehlementov konstrukcij iz stal'nyh holodnognutyh profilej / G. I. Belyj, I. V. Astahov // Montazhnye i special'nye raboty v stroitel'stve. — 2006. — № 9.
 - 10 Belyj G. I. K opredeleniyu reducirovannyh sechenij sterzhnevyyh ehlementov legkih stal'nyh tonkostennyh konstrukcij // Vestn. grazhdanskikh inzhenerov. — 2017. — № 5 (64). — С. 33–37.
 - 11 Belyj G. I. O raschete uprugoplasticheskikh tonkostennyh sterzhnej po prostranstvenno-deformirovannoj skheme s uchetom kasatel'nyh napryazhenij deformacij i deformacij sdviga // Metallicheskie konstrukcii i ispytaniya sooruzhenij. — 1985. — № 62. — С. 10–20.
 - 12 Belyj G. I. Novye polozheniya v inzhenernoj metodike rascheta na ustojchivost' stal'nyh sterzhnevyyh ehlementov konstrukcij iz holodnognutyh profilej // Vestn. grazhdanskikh inzhenerov — 2017. — № 2 (61). — С. 75–80.
 - 13 Ajrumyan Eh. L. Issledovanie raboty stal'noj fermy iz holodnognutyh profilej s uchetom ih mestnoj i obshchej ustojchivosti / Eh. L. Ajrumyan, G. I. Belyj // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. — 2010. — № 5. — С. 41–44.
 - 14 Ajrumyan Eh. L. Osobennosti rascheta stal'nyh konstrukcij iz tonkostennyh gnutyh profilej // Montazhnye i special'nye raboty v stroitel'stve. — 2008. — № 3. — С. 2–7.
 - 15 Ajrumyan Eh. L. Rekomendacii po raschetu stal'nyh konstrukcij iz tonkostennyh gnutyh profilej // StrojProfil'. — 2009. — № 8 (78). — С. 12–14.
 - 16 Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1–3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Ref. No. EN 1993-1-3:2006. — Brussels: European Committee for n, 2006. — 125 p.
 - 17 AISI S100–2007 North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2007.
 - 18 Kikot' A. A. Programma rascheta progibov izgibaemykh ehlementov iz stal'nyh tonkostennyh profilej / A. A. Kikot', M. N. Kornickaya, E. V. Murzin // Proektirovanie i stroitel'stvo v Sibiri. — 2010. — № 4 (58). — С. 8–10.
 - 19 Kikot' A. A. Vliyanie shiriny poyasa i parametrov steni na ehffektivnost' stal'nogo holodnognutogo profilya sigmaobraznogo secheniya pri rabote na izgib / A. A. Kikot', V. V. Grigor'ev // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. — 2013. — № 1. — С. 97–101.
 - 20 Kikot' A. A. Vliyanie shiriny poyasov i otgibov v secheniyah s- i z- obraznyh stal'nyh tonkostennyh gnutyh profilej na ehffektivnost' raboty v usloviyah izgiba // Polzunovskij vestnik. — 2011. — № 1. — С. 1–6.