

Гнutoзамкнутые профили и расчет их оптимальных параметров

А.С. Марутян

Институт сервиса, туризма и дизайна
(филиал Северо-Кавказского федерального университета) в г. Пятигорске
Российская Федерация, 357500, Пятигорск, проспект 40 лет Октября, 56

(поступила в редакцию: 08 сентября 2018 г.; доработана: 21 декабря 2018 г.; принята к публикации: 18 января 2019 г.)

Актуальность. В статье представлено новое техническое решение гнutoзамкнутых профилей, относящихся к легким стальным тонкостенным конструкциям (ЛСТК), которые отличаются высокими технико-экономическими показателями и массово используются в промышленно-гражданском строительстве.

Цель исследования – показать, что характеристики тонкостенных конструкций можно дополнительно повысить при помощи формообразования модификации профилей, сочетающей в своем составе контуры замкнутых и открытых очертаний.

Методы. Посредством опытно-конструкторских проработок и оптимизационно-проектных расчетов гнutoзамкнутых профилей разработано их новое техническое решение, оригинальность которого подтверждена патентной экспертизой.

Результаты. Новые гнutoзамкнутые профили (ГЗП) состоят из трубчатой части одиночной толщины и ребра двойной толщины. Для их изготовления без сварных, болтовых или заклепочных соединений листовая заготовка выполняется по всей длине с зубчатыми продольными кромками, зубцы которых расположены относительно друг друга в шахматном порядке и взаимно загнуты в пазах между собой после замыкания гнutoго профиля по его ребру. Загибы зубчатых креплений увеличивают толщину смятия и обеспечивают увеличение прочности соединений тонкостенных элементов на сдвиг. При равных габаритах по высоте и ширине ГЗП оптимизированы по критерию равноустойчивости, одинаковой из плоскости и в плоскости несущей конструкции. Дополнительно представлен ряд пятиугольных, треугольных и трапециевидных профилей, боковые грани которых наклонены относительно вертикали под углами 45 и 60 градусов.

Ключевые слова: стержневые конструкции, тонкостенные конструкции, гнutoзамкнутые профили, зубчатые крепления, оптимизация сечений, равноустойчивость, расчет оптимальных параметров

Введение

Предлагаемое в статье техническое решение относится к области строительства и может быть использовано в качестве стержневых элементов при разработке несущих конструкций зданий и сооружений различного назначения [1–6]. В частном случае это могут быть стержневые элементы поясов ферм прогонных и беспрогонных покрытий, а также других кровельных и каркасных систем [7–12]. Известны стержневые элементы, многогранное сечение которых образуют перегибом по длине обеих кромок листовой заготовки (штрипса) в обратных направлениях с формированием

фасонки на всем протяжении профиля и замыканием его сечения при помощи установки стяжных болтов (рис. 1, а) [13]. Такие сечения рекомендуются в качестве поясов стропильных ферм с решетками из стальных оцинкованных профилей [14]. Использование сечений с фасонкой по всей длине рационально в беспрогонных покрытиях, когда устойчивость из плоскости фермы обеспечена за счет укладки и крепления профилированного настила непосредственно по верхним поясам. Для прогонных покрытий предпочтительны сечения, одинаково устойчивые как из плоскости, так и в плоскости фермы.

Еще одно известное техническое решение представляет собой гнutoзамкнутый профиль прямоугольного сечения, наружная грань которого гофрирована, а I-образное ребро имеет фальцевое замыкание (рис. 1, б) [15]. Наиболее близким к пред-

лагаемому (принятым в качестве прототипа) является техническое решение, представляющее собой гнутый замкнутый профиль, выполненный в поперечном сечении квадратной или прямоугольной формы со стыком примерно по середине одной из граней. Каждая часть грани, на которой расположен стык, имеет продолжение в виде I - или Γ -образного ребра (рис. 1, а, в, з) [16]. Такой профиль эффективно конкурирует с двутавровыми балками.

Однако в качестве стержневого элемента, одинаково устойчивого как из плоскости, так и в плоскости несущей конструкции, он требует определенной доработки. В приведенных технических решениях, включая прототип, несущая способность гнутых замкнутых профилей обеспечена за счет использования при их изготовлении сварных, болтовых или заклепочных соединений, что вызывает определенный рост дополнительных затрат.

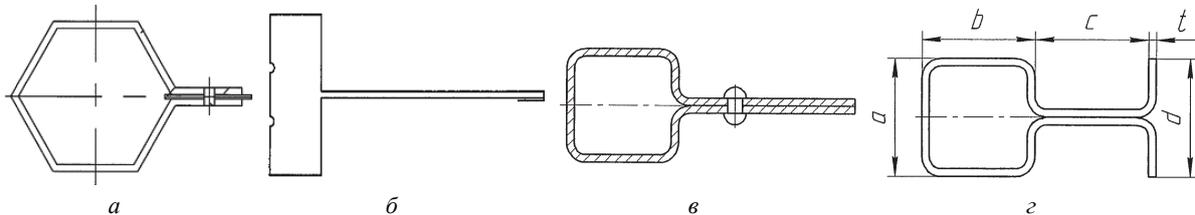


Рис. 1. Схемы гнутых замкнутых профилей:

а – многогранного; б – прямоугольного с гофрированной гранью;
в – прямоугольного с I -образным ребром; з – прямоугольного с Γ -образным ребром

[Figure 1. Schemes of curved closed profiles:

а – many-sided; б – rectangular with a corrugated edge; в – rectangular with an I -shaped rib; з – rectangular with L -shaped edge]

Прямоугольные гнутозамкнутые профили с зубчатыми креплениями

Техническим результатом предлагаемого решения является одинаковая устойчивость (равностойчивость) профилей из плоскости и в плоскости несущей конструкции, а также уменьшение дополнительных затрат. Указанный технический результат достигается тем, что в гнутом замкнутом (гнутозамкнутом) профиле прямоугольного сечения со стыком посередине одной из длинных граней, где каждая часть состыкованной грани имеет

продолжение в виде I -образного ребра, размер коротких граней в два раза меньше размера I -образных ребер и в три раза меньше размера длинных граней. Для изготовления гнутозамкнутого профиля без сварных [17], болтовых или заклепочных соединений его листовая заготовка выполняется с зубчатыми продольными кромками по всей длине, зубцы которых расположены относительно друг друга в шахматном порядке и взаимно загнуты в пазах между собой после замыкания гнутого профиля по I -образному ребру (рис. 2) [18].

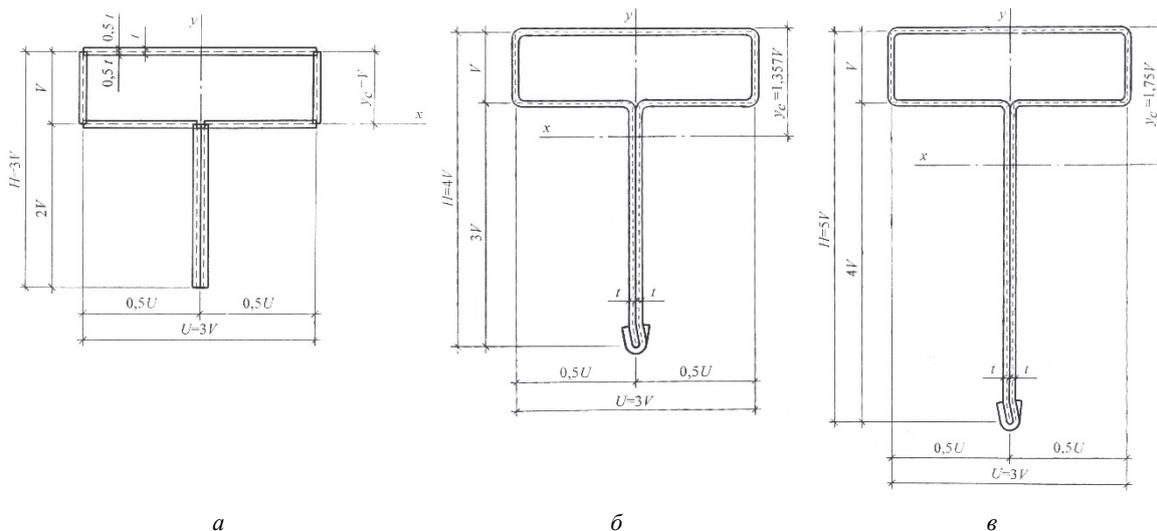


Рис. 2. Схемы гнутозамкнутых профилей (ГЗП):

а – расчетная схема профиля с $H/U = 3/3$; б – профиль с $H/U = 4/3$; в – профиль с $H/U = 5/3$ (пунктиром обозначены средние линии расчетных сечений)

[Figure 2. Schemes of curved closed profiles (CCP):

а – design profile scheme with $H/U = 3/3$; б – profile with $H/U = 4/3$; в – profile with $H/U = 5/3$ (the dashed lines represent the average lines of the calculated cross-sections)]

Предлагаемые гнутые замкнутые (гнутозамкнутые) профили обладают достаточно универсальным техническим решением, с реализацией которого для их изготовления можно использовать как зубчатые крепления, так и сварные, болтовые или заклепочные соединения. Если при этом размер коротких граней в два раза меньше размера I -образных ребер и в три раза меньше размера длинных граней, то равноустойчивость таких профилей обеспечена, то есть они обладают одинаковой устойчивостью из плоскости и в плоскости несущей конструкции. Равноустойчивость гнутозамкнутых профилей способствует эффективности их использования в поясах стропильных и подстропильных ферм прогонных покрытий. Применительно к поясам ферм беспрогонных покрытий рационально удлинить размеры реберных частей двойной толщины гнутозамкнутых профилей в зависимости от величин совместно действующих изгибающих моментов и сжимающих сил, развивая их расчет-

ное сечение в силовой плоскости несущей конструкции и сохраняя при этом уже обозначенные соотношения размеров длинных и коротких граней трубчатых частей одиночной толщины. Для изготовления гнутозамкнутых профилей без сварных, болтовых или заклепочных соединений параметры зубчатых продольных кромок их листовых заготовок целесообразно подобрать так, чтобы одним зигзагообразным резом формировать кромки сразу двух заготовок. Издержки производства при этом будут минимальными, что обеспечит уменьшение дополнительных затрат. Кроме того, загибы зубчатых креплений гнутозамкнутых профилей увеличивают толщину смятия, что может способствовать определенному росту несущей способности соединений тонкостенных элементов, работающих в основном на сдвиг (срез) и смятие [19–22]. Сами зубчатые крепления для большей надежности можно опрессовать (рис. 3).

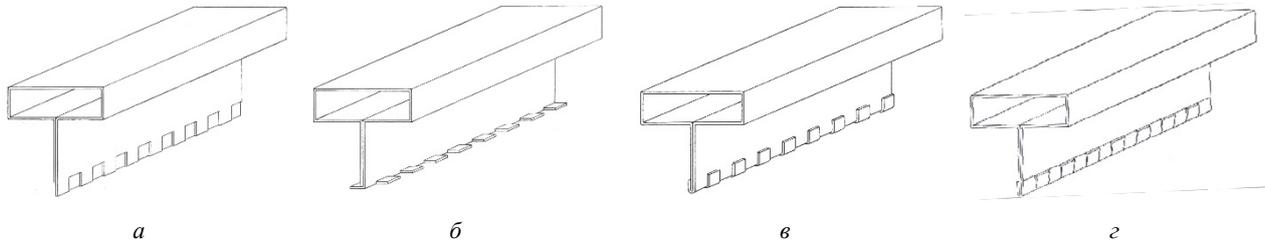


Рис. 3. Схемы замыкания зубчатых креплений равноустойчивого профиля:

a, б, в, з – очередность технологических операций

[Figure 3. Schemes of closing of toothed attachments of an equally stable profile:

a, б, в, з – sequence of technological operations]

Оптимизация прямоугольных гнутозамкнутых профилей

Для получения приведенного соотношения размеров прямоугольного гнутозамкнутого профиля с одинаковой устойчивостью из плоскости и в плоскости конструкции, а также количественной оценки его несущей способности необходимо рассчитать моменты инерции сечения I_x и I_y относительно главных центральных осей и приравнять их друг к другу. Расчетные выкладки при этом допустимо выполнять по средней линии тонкостенного сечения без учета угловых закруглений гнутозамкнутого профиля, а также без учета численных величин, содержащих значения толщины, возведенной во вторую и третью степень (t^2 , t^3) [23].

Рассматриваемое сечение гнутозамкнутого профиля можно представить составным из трубчатой части одиночной толщины и реберной части двойной толщины (рис. 2, *a*):

$$A = A_t + A_p = 2t(U + V) + 2t(U - V) = 4tU = 4ntV,$$

где A – расчетная площадь сечения гнутозамкнутого профиля; A_t – расчетная площадь трубчатой части; A_p – расчетная площадь реберной части; U – размер длинной грани профиля, равный его габаритам по ширине и высоте, $U = H$; V – размер короткой грани профиля; n – отношение размера длинной грани к размеру короткой грани, $1 \leq n = U / V$.

Ордината центра тяжести сечения относительно верхней грани гнутозамкнутого профиля составляет

$$y_0 = V(n + 1) / 4.$$

Момент инерции сечения относительно оси $x-x$:

$$I_x = tV^3((5/12)n^3 - (1/2)n^2 + (3/4)n).$$

Момент инерции сечения относительно оси $y - y$:

$$I_y = tV^3((1/6)n^3 - (1/2)n^2).$$

Получаем уравнение

$$I_x - I_y = 0;$$

$$n^2 - 4n + 3 = 0$$

с корнями $n_1 = 1$ и $n_2 = 3$.

Очевидно, что при $n_1 = 1$ гнутозамкнутый профиль трансформируется в квадратную трубу, а при $n_2 = 3$ размер коротких граней в два раза меньше размера L -образных ребер и в три раза меньше размера длинных граней. Тогда гнутозамкнутые профили, оптимизированные по критерию равноустойчивости, имеют следующие характеристики поперечного сечения:

$$H = 3,0V; U = 3,0V; y_0 = V; A = 12,0tV;$$

$$I_x = I_y = 9,0tV^3; W_{x,\max} = 9,0tV^2;$$

$$W_{x,\min} = 4,50tV^2; W_y = 6,0tV^2;$$

$$i_x = i_y = 0,86603V.$$

При совместном действии изгибающих моментов и сжимающих сил, которые имеют место в поясах ферм беспрогонных покрытий, гнутозамкнутые профили рационально развивать в силовых плоскостях несущих конструкций. Для этого целесообразно принять полученные соотношения размеров ребер, длинных и коротких граней равноустойчивого сечения в качестве базовых, с тем чтобы применительно к каждому расчетному случаю развивать высоту сечения последовательно на один размер коротких граней (рис. 2, б, в). Так, если развить высоту на один размер коротких граней и повторить все расчетные выкладки, то гнутосварные профили будут иметь следующие характеристики поперечного сечения:

$$H = 4,0V; U = 3,0V; A = 14,0tV;$$

$$y_0 = 1,357V; I_x = 19,88tV^3; I_y = 9,0tV^3;$$

$$W_{x,\max} = 14,65tV^2; W_{x,\min} = 7,522tV^2;$$

$$W_y = 6,0tV^2; i_x = 1,192V; i_y = 0,8018V.$$

Сравнительный расчет гнутозамкнутых профилей

Для сравнения предлагаемых гнутозамкнутых профилей (новое техническое решение) с прототипом в качестве базового объекта принята панель верхнего пояса фермы из стали класса С255 с расчетной длиной в плоскости 3 м, а также внутренними усилиями $N = 412/2 = 206$ кН и $M = 16,7/2 = 8,35$ кН·м [14], уменьшенными в два раза соразмерно прототипу, который представлен гнутым замкнутым профилем с параметрами $a = 120$ мм, $b = 120$ мм, $c = 120$ мм, $d = 120$ мм при толщине $t = 2$ мм (рис. 1, з) и следующими характеристиками поперечного сечения [16]:

$$H = 242 \text{ мм}; U = 120 \text{ мм}; A = 16,8 \text{ см}^2;$$

$$y_0 = 121 \text{ мм}; I_x = 1114 \text{ см}^4; I_y = 247 \text{ см}^4;$$

$$W_x = 1114/12,1 = 92,07 \text{ см}^3;$$

$$W_y = 247/6 = 41,17 \text{ см}^3;$$

$$i_x = (1114/16,8)^{1/2} = 8,143 \text{ см};$$

$$i_y = (247/16,8)^{1/2} = 3,834 \text{ см}.$$

Упрощая расчет в сторону запаса прочности, совмещая сечения с наибольшими сжимающей силой и изгибающим моментом, по рекомендации Н.С. Москалева, для стальных конструкций легких зданий допустима проверка краевого напряженного состояния по формуле [24]

$$\sigma = N / (\varphi A) + M / W_x,$$

которую для большей наглядности можно переписать следующим образом

$$\sigma / R_y = N / (\varphi A R_y) + M / (W_x R_y),$$

где σ – расчетное значение суммарного напряжения; R_y – расчетное сопротивление конструкционного материала по пределу текучести; φ – коэффициент продольного изгиба.

Тогда проверка краевого напряженного состояния от совместного действия внутренних усилий в сечении панели из профиля по прототипу составит

$$\begin{aligned} \sigma / R_y &= N / (\varphi A R_y) + M / (W_x R_y) = \\ &= 20600 / (0,908 \times 16,8 \times 2400) + \\ &+ 83500 / (92,07 \times 2400) = 0,945, \end{aligned}$$

где расчетная гибкость панели $\lambda = l / i_x = 300 / 8,143 = 36,84$; условная гибкость панели $\bar{\lambda} = \lambda(R_y / E)^{1/2} = 36,84(2400 / 2100000)^{1/2} = 1,245 < 2,5$; расчетное сопротивление стали класса прочности С255 $R_y = 2400$ кгс/см²; модуль упругости стали $E = 2100000$ кгс/см²; коэффициент продольного изгиба $\varphi = 1 - 0,066(\bar{\lambda})^{3/2} = 1 - 0,066 \times 1,245^{3/2} = 0,908$ [25].

Новое техническое решение представлено гнутозамкнутым профилем, равноустойчивым из плоскости и в плоскости, со следующими параметрами:

$$\begin{aligned} A &= 12,0tV = 16,8 \text{ см}^2; \\ V &= A / (12,0t) = 16,8 / (12 \times 0,2) = 7,0 \text{ см}; \\ H &= 3,0V = 3,0 \times 7,0 = 21,0 \text{ см}; \\ U &= 3,0V = 3,0 \times 7,0 = 21,0 \text{ см}; \\ y_0 &= V = 7,0 \text{ см}; \\ I_x &= I_y = 9,0tV^3 = 9,0 \times 0,2 \times 7,0^3 = 617,4 \text{ см}^4; \\ W_{x,\max} &= 9,0tV^2 = 9,0 \times 0,2 \times 7,0^2 = 88,2 \text{ см}^3; \\ W_{x,\min} &= 4,50tV^2 = 4,5 \times 0,2 \times 7,0^2 = 44,1 \text{ см}^3; \\ W_y &= 6,0tV^2 = 6,0 \times 0,2 \times 7,0^2 = 58,8 \text{ см}^3; \\ i_x &= i_y = 0,86603V = 0,86603 \times 7,0 = 6,062 \text{ см}. \end{aligned}$$

Таким образом, проверка краевого напряженного состояния от совместного действия внутренних усилий в сечении панели из равноустойчивого профиля по новому техническому решению составит

$$\begin{aligned} \sigma / R_y &= N / (\varphi AR_y) + M / (W_x R_y) = \\ &= 20600 / (0,857 \times 16,8 \times 2400) + \\ &+ 83500 / (88,2 \times 2400) = 0,991, \end{aligned}$$

где $\lambda = 300 / 6,062 = 49,49$;

$$\begin{aligned} \bar{\lambda} &= 49,49(2400 / 2100000)^{1/2} = 1,673 < 2,5; \\ \varphi &= 1 - 0,066 \times 1,673^{3/2} = 0,857. \end{aligned}$$

Как видно, расчетное напряжение в новом техническом решении оказалось на $100(0,991 - 0,945) / (0,991 \dots 0,945) = 4,6 \dots 4,9$ % выше, чем в прототипе. Объяснить это можно тем, что габаритный

размер по высоте у прототипа на $100(242 - 211) / (242 \dots 211) = 12,9 \dots 14,7$ % больше, чем у нового решения, и профиль по новому решению в этих же пределах компактнее прототипа.

Расчет профилей с учетом зубчатых креплений

Сравнение нового технического решения с его прототипом целесообразно продолжить, добавив в гнутозамкнутые профили зубчатые крепления взамен сварных, болтовых или заклепочных соединений. Для этого в рассмотренном равноустойчивом профиле необходимо подобрать размеры элементов зубчатого крепления (зубцов), которые должны быть не меньше $1/10$ полки (горизонтальной грани) или стенки (вертикальной грани) гнутого профиля¹. В данном случае этот размер составляет $0,1 \times 2V = 0,1 \times 2 \times 70 = 14$ мм, где $2V = 2 \times 70 = 140$ мм – размер реберной части гнутозамкнутого профиля (рис. 4).

Допустив на перспективу определенный резерв, размер элементов зубчатого крепления можно округлить до 20 мм. С учетом зубчатого крепления гнутозамкнутый профиль, одинаково устойчивый из плоскости и в плоскости несущей конструкции, будет иметь следующие характеристики поперечного сечения:

$$\begin{aligned} A_1 &= 12,0tV = 16,8 - 2 \times 2,0 \times 0,2 = 16,0 \text{ см}^2 - \\ &\text{расчетная площадь сечения нетто}; \\ V &= A_1 / (12,0t) = 16,0 / (12,0 \times 0,2) = 6,667 \text{ см}; \\ H &= 3,0V = 3,0 \times 6,667 = 20,001 \text{ см}; \\ U &= 3,0V = 3,0 \times 6,667 = 20,001 \text{ см}; \\ y_0 &= V = 6,667 \text{ см}; \\ I_x &= I_y = 9,0tV^3 = 9,0 \times 0,2 \times 6,667^3 = 533,41 \text{ см}^4; \\ W_{x,\max} &= 9,0tV^2 = 9,0 \times 0,2 \times 6,667^2 = 80,01 \text{ см}^3; \\ W_{x,\min} &= 4,50tV^2 = 4,5 \times 0,2 \times 6,667^2 = 40,004 \text{ см}^3; \\ W_y &= 6,0tV^2 = 6,0 \times 0,2 \times 6,667^2 = 53,34 \text{ см}^3; \\ i_x &= i_y = 0,86603V = 0,86603 \times 6,667 = 5,774 \text{ см}. \end{aligned}$$

¹ СП 260.1325800.2016. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования. М., 2016. С. 16.

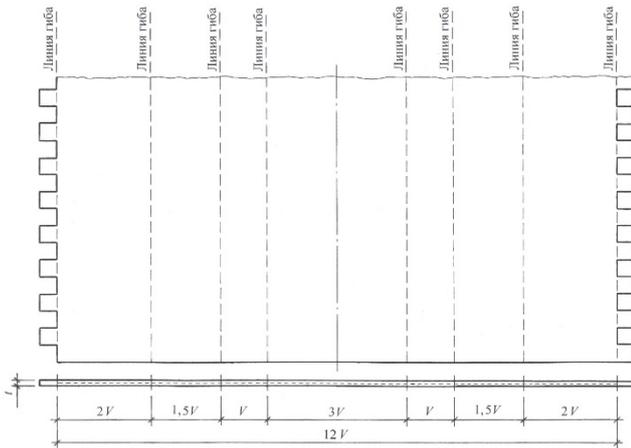


Рис. 4. Развертка листовой заготовки с зубчатыми кромками для равноустойчивого профиля
[Figure 4. Development of a sheet blank with serrated edges for an equally stable profile]

Проверка краевого напряженного состояния от совместного действия внутренних усилий в сечении панели из равноустойчивого профиля с зубчатым креплением по новому техническому решению составит:

$$\begin{aligned}\sigma / R_y &= N / (\varphi A_1 R_y) + M / (W_x R_y) = \\ &= 20600 / (0,846 \times 16,0 \times 2400) + \\ &+ 83500 / (80,01 \times 2400) = 1,069\end{aligned}$$

где $\lambda = 300 / 5,774 = 51,964$;

$$\bar{\lambda} = 51,964(2400 / 2100000)^{1/2} = 1,757 < 2,5;$$

$$\varphi = 1 - 0,066 \times 1,757^{3/2} = 0,846.$$

Перенапряжение в новом техническом решении составило 6,9 %. При этом габаритный размер по высоте у прототипа на 16,5...19,8 % больше, чем у нового решения. Поэтому, чтобы продолжить сравнение нового технического решения с прототипом, сечение гнutoзамкнутого профиля с зубчатым креплением нужно развить в плоскости фермы, удлинив его реберную часть на один размер короткой грани трубчатой части (рис. 2, б):

$$A_1 = 14,0tV = 16,8 - 2 \times 2,0 \times 0,2 = 16,0 \text{ см}^2;$$

$$V = A_1 / (14,0t) = 16,0 / (14,0 \times 0,2) = 5,714 \text{ см};$$

$$H = 4,0V = 4,0 \times 5,714 = 22,856 \text{ см};$$

$$U = 3,0V = 3,0 \times 5,714 = 17,142 \text{ см};$$

$$y_0 = 1,357V = 1,357 \times 5,714 = 7,857 \text{ см};$$

$$I_x = 19,88tV^3 = 19,88 \times 0,2 \times 5,714^3 = 741,77 \text{ см}^4;$$

$$I_y = 9,0tV^3 = 9,0 \times 0,2 \times 5,714^3 = 335,81 \text{ см}^4;$$

$$W_{x,\text{max}} = 14,65tV^2 = 14,65 \times 0,2 \times 5,714^2 = 95,66 \text{ см}^3;$$

$$W_{x,\text{min}} = 7,522tV^2 = 7,522 \times 0,2 \times 5,714^2 = 49,12 \text{ см}^3;$$

$$W_y = 6,0tV^2 = 6,0 \times 0,2 \times 5,714^2 = 36,18 \text{ см}^3;$$

$$i_x = 1,192V = 1,192 \times 5,714 = 6,811 \text{ см};$$

$$i_y = 0,8018V = 0,8018 \times 5,714 = 4,5815 \text{ см}.$$

Следовательно, проверка краевого напряженного состояния от совместного действия внутренних усилий в сечении панели из профиля с зубчатым креплением и высотой, развитой на один размер короткой грани, по новому техническому решению составит:

$$\begin{aligned}\sigma / R_y &= N / (\varphi A_1 R_y) + M / (W_x R_y) = \\ &= 20600 / (0,8801 \times 16,0 \times 2400) + \\ &+ 83500 / (95,66 \times 2400) = 0,973\end{aligned}$$

где $\lambda = 300 / 6,881 = 44,05$;

$$\bar{\lambda} = 44,05(2400 / 2100000)^{1/2} = 1,489 < 2,5;$$

$$\varphi = 1 - 0,066 \times 1,489^{3/2} = 0,8801.$$

Расчетное напряжение в новом техническом решении оказалось на 2,9...3,0 % выше, чем в прототипе. При этом габаритный размер по высоте у прототипа на 5,6...5,9 % больше, чем у нового решения, и профиль по новому решению в этих же пределах компактнее прототипа.

Полученные результаты сравнений подтверждают рациональность гнutoзамкнутых профилей как с зубчатыми креплениями, так и без них.

Модификации гнutoзамкнутых профилей

Численные выкладки, аналогичные приведенному расчету, показали, что профили других форм сечений не менее рациональны, чем прямоугольные. В частности, проработаны и оптимизированы по критерию равноустойчивости пятиугольные, треугольные и трапециевидные модификации, у которых боковые грани наклонены относительно вертикали под углами 45 и 60 градусов (рис. 5) [26–28]. Для сравнения геометрических характеристик базовых сечений за эталонные (100-процентные) значения приняты параметры прямоугольных профилей, а начальными и постоянными величинами при этом являются площадь сечения и толщина листовых заготовок (штрипсов): $A = \text{const}$ и $t = \text{const}$ (см. таблицу). Как видно, в представленном ряду гнutoзамкнутых профилей наибольшими значениями осевых моментов инерции сечения выделяются пятиугольные модификации, что вполне соответствует итогам оптимизационных расчетов пятигранных труб [29; 30].

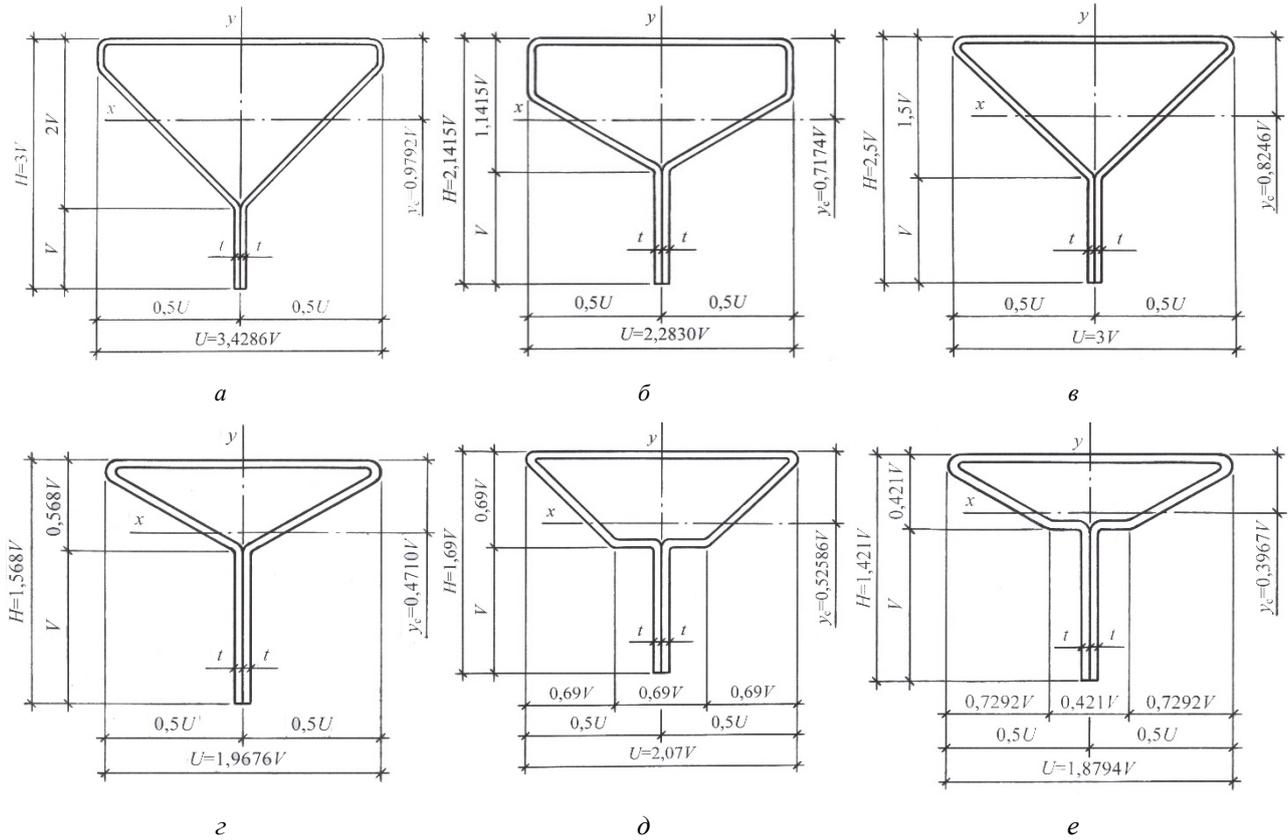


Рис. 5. Схемы базовых пятиугольных (а, б), треугольных (в, з) и трапециевидных (д, е) гнутозамкнутых профилей, оптимизированных по критерию равноустойчивости
 [Figure 5. Schemes of basic pentagonal (a, б), triangular (в, з) and trapezoidal (д, е) curved closed profiles, optimized by equal stability test]

Таблица

Расчетные параметры базовых сечений гнутозамкнутых профилей
 [Table. Estimated parameters of basic sections of closed-loop profiles]

Гнутозамкнутые профили (ГЗП) [Curved closed profiles]								
Характеристики сечений [Cross section characteristics]	$H, A/t$	0,250000 100 %	0,276528 110,6 %	0,271621 108,6 %	0,270485 108,2 %	0,251298 100,5 %	0,251802 100,7 %	0,237451 95,0 %
	$U, A/t$	0,250000 100 %	0,316035 126,4 %	0,289569 115,8 %	0,324582 129,8 %	0,315341 126,1 %	0,308420 123,4 %	0,314050 125,6 %
	$V, A/t$	0,083333 100 %	0,092167 110,6 %	0,126837 152,2 %	0,108194 129,8 %	0,160267 192,3 %	0,148995 178,8 %	0,167101 200,5 %
	$y_0, A/t$	0,083333 100 %	0,090259 108,3 %	0,090993 109,2 %	0,089217 107,1 %	0,075486 90,6 %	0,078351 94,02 %	0,066289 79,55 %
	$I_x = I_y, A^3/t^2$	0,005207 100 %	0,007674 147,4 %	0,006938 133,2 %	0,006877 132,1 %	0,005630 108,1 %	0,005844 112,2 %	0,005324 102,2 %
	$W_{x,max}, A^2/t$	0,062410 100 %	0,056407 90,4 %	0,076377 122,4 %	0,078128 125,2 %	0,074592 119,5 %	0,075190 120,5 %	0,080650 129,2 %
	$W_{x,min}, A^2/t$	0,031250 100 %	0,027910 89,3 %	0,038478 123,1 %	0,038453 123,0 %	0,032026 102,5 %	0,033965 108,7 %	0,031235 99,96 %
	$W_y, A^2/t$	0,041666 100 %	0,030768 73,9 %	0,047832 114,8 %	0,042391 101,7 %	0,035710 85,7 %	0,038031 91,3 %	0,033912 81,4 %
$i_x = i_y, A/t$	0,072162 100 %	0,087603 121,4 %	0,083293 115,4 %	0,082928 114,9 %	0,075037 104,0 %	0,076514 106,0 %	0,073023 101,2 %	

Примечание. A и t – площадь сечения и толщина штрипса (листовой заготовки) соответственно, $A = \text{const}$ и $t = \text{const}$.
 [Notice. A and t – the cross-sectional area and the thickness of the strip (sheet blank) respectively, $A = \text{const}$ and $t = \text{const}$.]

Заключение

Полученные результаты сравнений подтверждают перспективность, рациональность и эффективность применения в несущих конструкциях предлагаемых гнutoзамкнутых профилей как без зубчатых креплений, так и с ними. В последнем случае ослабление расчетного сечения нетто из-за зубчатых продольных кромок толщиной $t = 2,0$ мм их штрипсов (листовых заготовок или формуемых полос) составило $A_1 / A = 16,0 / 16,2 = 0,9524$. Для сопоставления можно отметить, что обозначенное ослабление заметно меньше аналогичного ослабления от метрической резьбы:

$$D_1 / D = (1,567...1,729) / 2,0 = 0,7835...0,8645,$$

где D – наружный диаметр резьбы; $D = 2,0$ мм; D_1 – внутренний диаметр резьбы; $D_1 = 1,567$ мм при шаге резьбы 0,4 мм; $D_1 = 1,729$ мм при шаге резьбы 0,25 мм¹.

Если в метрической резьбе «лишний» металл в виде опилок и стружек тщательно утилизируют в качестве вторичного сырья (металлического лома), то в новом техническом решении, минимизируя отходы металла и уменьшая дополнительные затраты, одним зигзагообразным резом можно получить зубчатые продольные кромки сразу двух листовых заготовок для гнutoзамкнутых профилей. При этом универсальность их технического решения в случае необходимости позволяет, имея оптимизированное по критерию равноустойчивости сечение и отталкиваясь от него как от базового, по заданным проектом параметрам подбирать производные сечения за один-два шага. Представляется, что в дальнейшем аналогично и созвучно гнutoсварным профилям ГСП предлагаемые гнutoзамкнутые профили можно сокращенно маркировать ГЗП.

Список литературы

1. Орлова А.В., Жмарин Е.Н., Пармонов К.О. Энергетическая эффективность домов из легких стальных тонкостенных конструкций // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 6. С. 1–13.
2. Советников Д.О., Виденков Н.В., Трубина Д.А. Легкие стальные тонкостенные конструкции в многоэтажном строительстве. // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 3. С. 152–165.

3. Рыбаков В.А., Маслак Т.В., Федотова К.А., Смирнов А.В., Ананьева И.А. Реконструкция скатных крыш с использованием легких стальных тонкостенных конструкций // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 12. С. 20–48.

4. Ye J., Hajirasouliha I., Becque J., Eslami A. Optimum design of cold-formed steel beams using Particle Swarm Optimisation method // Journal of constructional steel research. 2016. No. 122. Pp. 80–93.

5. Ye J., Hajirasouliha I., Becque J., Pilakoutas K. Development of more efficient cold-formed steel channel sections in bending // Thin-walled structures. 2016. No. 101. Pp. 1–13.

6. Ye J., Becque J., Hajirasouliha I., Mojtabaie S.M., Limb J.B.P. Development of optimum cold-formed steel sections for maximum energy dissipation in uniaxial bending // Engineering structures. 2018. No. 161. Pp. 55–67.

7. Коротких А.В., Гербер А.А., Крылов И.И. Особенности работы фермы с перекрестной решеткой из тонкостенных оцинкованных профилей // Известия вузов. Строительство. 2011. № 10. С. 9–20.

8. Алексейцев А.В., Курченко Н.С. Деформации стальных стропильных ферм при ударных аварийных воздействиях // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 5. С. 3–13.

9. Атавин И.В., Мельников Б.Е., Семенов А.С., Чернышева Н.В., Яковлева Е.Л. Влияние жесткости узловых соединений на устойчивость и прочность тонкостенных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 4. С. 48–61.

10. Рыбаков В.А., Ал Али М., Пантелеев А.П., Федотова К.А., Смирнов А.В. Несущая способность стропильных систем из стальных тонкостенных конструкций в чердачных крышах // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 8. С. 28–39.

11. Yousefi A.M., Lim J.B.P., Clifton G.C. Web crippling design of cold-formed ferritic stainless steel unflipped channels with fastened flanges under end-two-flange loading condition // Journal of constructional steel research. 2019. No. 152. Pp. 12–28.

12. Ye J., Hajirasouliha I., Becque J. Experimental investigation of local-flexural interactive buckling of cold-formed steel channel columns // Twin-walled structures. 2018. No. 125. Pp. 245–258.

13. Патент РФ № 2633851. Строительный элемент для изготовления решетчатых конструкций / И.Л. Кузнецов, М.А. Салахутдинов, С.Ф. Саянов. 2017. Бюл. № 29. URL: <http://www1.fips.ru/ofpstorage/IZPM/2017.10.18/RUNWC1/000/000/002/633/851/%D0%98%D0%97-02633851-0001/document.pdf> (дата обращения: 05.07.2018).

14. Салахутдинов М.А., Кузнецов И.Л., Саянов С.Ф. Стальные фермы с поясами из труб многогранного сечения // Известия КГАСУ. 2016. № 4 (38). С. 236–242.

15. United States patent US 20070056240. Press-formable light-gauge truss framing element / Lakdas Nanayakara. 2007, March 15. URL: <http://www.freepatentsonline.com/y2007/0056240.html> (дата обращения: 05.07.2018).

16. Патент РФ № 98155. Гнутый замкнутый профиль / Е.В. Левин. 2010. Бюл. № 28. URL: <http://www.fips.ru/Archive/PAT/2010FULL/2010.10.10/DOC/RUNWU1/00>

¹ ГОСТ 24705-2004. Резьба метрическая. Основные размеры. М.: Стандартинформ, 2005. С. 6.

0/000/000/098/155/DOCUMENT.PDF (дата обращения: 05.07.2018).

17. Патент РФ № 178154. Строительный элемент для изготовления решетчатых конструкций / И.Л. Кузнецов, М.А. Салахутдинов. 2017. Бюл. № 9. URL: <http://www1.fips.ru/ofpstorage/IZPM/2018.03.26/RUNWU1/000/000/000/178/154/%D0%9F%D0%9C-00178154-00001/document.pdf> (дата обращения: 05.08.2018).

18. Патент РФ № 2641333. Гнутозамкнутый профиль / А.С. Марутян. 2018. Бюл. № 2. URL: <http://www1.fips.ru/ofpstorage/IZPM/2018.01.18/RUNWC1/000/000/002/641/333/%D0%98%D0%97-02641333-00001/document.pdf> (дата обращения: 05.07.2018).

19. Кузнецов И.Л., Фахрутдинов А.Ф., Рамазанов Р.Р. Результаты экспериментальных исследований работы соединений тонкостенных элементов на сдвиг // Вестник МГСУ. 2016. № 12. С. 34–43.

20. Просяников Б.Д. Болтовое соединение с взаимным продавливанием соединяемых тонкостенных профилей // Вестник ТГАСУ. 2016. № 2. С. 130–138.

21. Elliot M.D., Teh L.N., Ahmed A. Behaviour and strength of bolted connections failing in shear // Journal of constructional steel research. 2019. No. 153. Pp. 320–329.

22. Zhanga Z., Wang J., Lia B., Zhao C. Seismic tests and numerical investigation of blind-bolted moment CFST frames infilled with thin-walled SPSWs // Thin-walled structures. 2019. No. 134. Pp. 347–362.

23. Марутян А.С. Оптимизация конструкций из трубчатых (гнутозамкнутых) профилей квадратных (прямоугольных) и ромбических сечений // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. № 1. С. 30–38.

24. Москалев С.Н., Попова Р.А. Стальные конструкции для легких зданий. М.: АСВ, 2003. С. 132.

25. Пособие по проектированию стальных конструкций. М.: ЦИТП, 1989. С. 17.

26. Патент РФ № 2645318. Пятиугольный гнутозамкнутый профиль / А.С. Марутян. 2018. Бюл. № 5.

URL: <http://www1.fips.ru/ofpstorage/IZPM/2018.02.20/RUNWC1/000/000/002/645/318/%D0%98%D0%97-02645318-00001/document.pdf> (дата обращения: 05.07.2018).

27. Патент РФ № 2651741. Треугольный гнутозамкнутый профиль / А.С. Марутян. 2018. Бюл. № 12. URL: <http://www1.fips.ru/ofpstorage/IZPM/2018.04.23/RUNWC1/000/000/002/651/741/%D0%98%D0%97-02651741-00001/document.pdf> (дата обращения: 05.07.2018).

28. Патент РФ № 2655056. Трапециевидный гнутозамкнутый профиль / А.С. Марутян. 2018. Бюл. № 15. URL: <http://www1.fips.ru/ofpstorage/IZPM/2018.05.23/RUNWC1/000/000/002/655/056/%D0%98%D0%97-02655056-00001/document.pdf> (дата обращения: 05.07.2018).

29. Копытов М.М., Матвеев А.В. Легкие металлоконструкции из пятигранных труб. Томск: STT, 2007. 124 с.

30. Марутян А.С. Оптимизация пятиугольных профильных труб новой модификации // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. № 3. С. 25–35.

Об авторе

Марутян Александр Суменович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела организации проектно-грантовой деятельности, филиал Северо-Кавказского федерального университета в г. Пятигорске (Пятигорск, Россия). *Область научных интересов:* легкие металлические конструкции зданий и сооружений. *Контактная информация:* e-mail – al_marut@mail.ru.

Для цитирования

Марутян А.С. Гнутозамкнутые профили и расчет их оптимальных параметров // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 1. С. 33–43. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-1-33-43

RESEARCH PAPER

Curved closed profiles and calculation of their optimal parameters

Alexander S. Marutyan

The Institute of Service, Tourism and Design
(branch of North-Caucasian Federal University) in Pyatigorsk
56 40 let Oktyabrya Ave, Pyatigorsk, 357500, Russian Federation

(received: September 08, 2018; revised: December 21, 2018; accepted: January 18, 2019)

Abstract. Relevance. A new technical solution of bent-closed profiles relating to light steel thin-walled structures (LSTS), which have high technical and economic indicators and are widely used in industrial and civil construction, is presented.

Aim of the research. The characteristics of thin-walled structures can be further enhanced by shaping the modification of profiles, combining in its composition the outlines of closed and open outlines.

Methods. By means of developmental studies and optimization and design calculations for bent-closed profiles, their new technical solution was developed, the originality of which was confirmed by patent examination.

Results. New curved closed profiles (CCP) consist of a tubular part of a single thickness and a double-thickness rib. For their manufacture without welded, bolted or riveted joints, the sheet blank is made along the entire length with serrated

longitudinal edges, the teeth of which are arranged relative to each other in a staggered manner and mutually bent in grooves between themselves after the curved profile is closed along its edge. The bends of the gear fasteners increase the thickness of the collapse and provide an increase in the shear strength of the joints of thin-walled elements. With equal dimensions in height and width of the CCP, they are optimized by the criterion of uniform stability, which is the same from the plane and in the plane of the supporting structure. Additionally, a series of pentagonal, triangular and trapezoidal profiles are presented, in which the lateral faces are inclined relative to the vertical at angles of 45 and 60 degrees.

Keywords: core constructions, thin-walled constructions, curved closed profiles, gear fastenings, section optimization, equability, calculation of optimal parameters

References

1. Orlova A.V., Zhmarin E.N., Paramonov K.O. (2013). Power efficiency of houses from light-gauge steel structures. *Construction of unique buildings and structures*, (6), 1–13. (In Russ.)
2. Sovetnikov D.O., Videnkov N.V., Trubina D.A. (2015). Light gauge steel framing in construction of multi-storey buildings. *Construction of unique buildings and structures*, (3), 152–165. (In Russ.)
3. Rybakov V.A., Maslak T.V., Fedotova K.A., Smirnov A.V., Ananeva I.A. (2017). Reconstruction of pitched roofs using steel thin-walled structures. *Construction of unique buildings and structures*, (12), 20–48. (In Russ.)
4. Ye J., Hajirasouliha I., Becque J., Eslami A. (2016). Optimum design of cold-formed steel beams using particle swarm optimisation method. *Journal of constructional steel research*, (122), 80–93. (In Russ.)
5. Ye J., Hajirasouliha I., Becque J., Pilakoutas K. (2016). Development of more efficient cold-formed steel channel sections in bending. *Thin-walled structures*, (101), 1–13.
6. Ye J., Becquea J., Hajirasouliha I., Mojtabaie S.M., Lim J.B.P. (2018). Development of optimum cold-formed steel sections for maximum energy dissipation in uniaxial bending. *Engineering structures*, (161), 55–67. (In Russ.)
7. Korotkikh A.V., Gerber A.A., Krylov II. (2011). Features of the work farm with a cross bar of thin walled zinc coated profiles. *News of higher educational institutions. Construction*, (10), 9–20. (In Russ.)
8. Alekseytsev A.V., Kurchenko N.S. (2017). Deformations of steel roof trusses under shock emergency action. *Magazine of civil engineering*, (5), 3–13. (In Russ.)
9. Atavin I.V., Melnikov B.E., Semenov A.S., Chernysheva N.V., Yakovleva E.L. (2018). Influence of stiffness of node on stability and strength of thin-walled structure. *Magazine of civil engineering*, (4), 48–61. (In Russ.)
10. Rybakov V.A., Al Ali M., Panteleev A.P., Fedotova K.A., Smirnov A.V. (2017). Bearing capacity of rafter systems made of steel thin-walled structures in attic roofs. *Magazine of civil engineering*, (8), 28–39. (In Russ.)
11. Yousefi A.M., Lim J.B.P., Clifton G.C. (2019). Web crippling design of cold-formed ferritic stainless steel unlipped channels with fastened flanges under end-two-flange loading condition. *Journal of constructional steel research*, (152), 12–28.
12. Ye J., Hajirasouliha I., Becquea J. (2018). Experimental investigation of local-flexural interactive buckling of cold-formed steel channel columns. *Twin-walled structures*, (125), 245–258.
13. Kuznetsov I.L., Salakhutdinov M.A., Sayanov S.F. (2017). *Construction element for manufacturing lattice structures* (Patent RUS No. 2633851. Byul. No. 29). Available from: <http://www1.fips.ru/ofpstorage/IZPM/2017.10.18/RUNWC1/000/000/002/633/851/%D0%98%D0%97-02633851-00001/document.pdf> (In Russ.)
14. Salakhutdinov M.A., Kuznetsov I.L., Sayanov S.F. (2016). Steel trusses with belts made of pipes of polyhedral cross-section. *Izvestiya KGASU*, (4), 236–242. (In Russ.)
15. Nanayakkara L. (2007, March 15). *Press-formable light-gauge truss framing element* (United States patent US 20070056240).
16. Levin E.V. (2010). *Curved closed profile* (Patent RUS No. 98155. Byul. No. 28). Available from: <http://www.fips.ru/Archive/PAT/2010FULL/2010.10.10/DOC> (In Russ.)
17. Kuznetsov I.L., Salakhutdinov M.A. (2018). *Construction element for manufacturing lattice structures* (Patent RUS No. 178154. Byul. No. 9). Available from: <http://www1.fips.ru/ofpstorage/IZPM/2018.03.26/RUNWU1/000/000/000/178/154/%D0%9F%D0%9C-00178154-00001/document.pdf> (In Russ.)
18. Marutyan A.S. (2018). *Curved closed profile* (Patent RUS No. 2641333. Byul. No. 2). Available from: <http://www1.fips.ru/ofpstorage/IZPM/2018.01.18/RUNWC1/000/000/002/641/333/%D0%98%D0%97-02641333-00001/document.pdf> (In Russ.)
19. Kuznetsov I.L., Fakhruddinov A.F., Ramazanov R.R. (2016). Results of experimental studies of the work of compounds of thin-walled elements on shear. *Bulletin of MGSU*, (12), 34–43. (In Russ.)
20. Prosyaniykov B.D. (2016). Bolted joint with reciprocal punch of connected slender sections. *Bulletin of TGASU*, (2), 130–138. (In Russ.)
21. Elliot M.D., Teh L.N., Ahmed A. (2019). Behaviour and strength of bolted connections failing in shear. *Journal of constructional steel research*, (153), 320–329.
22. Zhanga Z., Wanga J., Lia B., Zhaoa C. (2019). Seismic tests and numerical investigation of blind-bolted moment CFST frames infilled with thin-walled SPSWs. *Thin-walled structures*, (134), 347–362.
23. Marutyan A.S. (2016). Optimization of structures from tubular (roll-welded) profiles of square (rectangular) and rhombic sections. *Construction mechanics and calculation of structures*, (1), 30–38. (In Russ.)
24. Moskalev S.N., Popova R.A. (2003). Steel structures for light buildings. Moscow: ASV Publ. 132. (In Russ.)

25. *Manual on the design of steel structures*. (1989). Moscow: TsITP Publ., 17. (In Russ.)

26. Marutyán A.S. (2018). *Pentagonal formed profile* (Patent RUS No. 2645318. Byul. No. 5). Available from: <http://www1.fips.ru/ofpstorage/IZPM/2018.02.20/RUNWC1/000/000/002/645/318/%D0%98%D0%97-02645318-00001/document.pdf> (In Russ.)

27. Marutyán A.S. (2018). *Triangular hollow profile* (Patent RUS No. 2651741. Byul. No. 12). Available from: <http://www1.fips.ru/ofpstorage/IZPM/2018.04.23/RUNWC1/000/000/002/651/741/%D0%98%D0%97-02651741-00001/document.pdf> (In Russ.)

28. Marutyán A.S. (2018). *Trapezoidal closed profile* (Patent RUS No. 2655056. Byul. No. 15). Available from: <http://www1.fips.ru/ofpstorage/IZPM/2018.05.23/RUNWC1/000/000/002/655/056/%D0%98%D0%97-02655056-00001/document.pdf> (In Russ.)

29. Kopytov M.M., Matveev A.V. (2007). *Light metal structures from pentahedral pipes*. Tomsk: STT Publ., 124. (In Russ.)

30. Marutyán A.S. (2016). Optimization of pentagonal shaped pipes of a new modification. *Construction mechanics and calculation of structures*, (3), 25–35. (In Russ.)

About the author

Alexander S. Marutyán – PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Department of Project Grant Organization, branch of the North-Caucasian Federal University in Pyatigorsk. *Research interests*: light metal structures of buildings and structures. *Contacts*: e-mail – al_marut@mail.ru.

For citation

Marutyán A.S. (2019). Curved closed profiles and calculation of their optimal parameters. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(1), 33–43. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-1-33-43 (In Russ.)