

DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-2-140-164
УДК 624.072.2.014

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Оптимизация швеллерных и двутавровых гнутозамкнутых профилей с трубчатыми полками из листового проката разных толщин

А.С. Марутян

Колледж Пятигорского института (филиала) Северо-Кавказского федерального университета,
Российская Федерация, 357500, Пятигорск, пр-кт 40 лет Октября, д. 56
al_marut@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 6 февраля 2021 г.
Доработана: 4 апреля 2021 г.
Принята к публикации: 15 апреля 2021 г.

Для цитирования

Марутян А.С. Оптимизация швеллерных и двутавровых гнутозамкнутых профилей с трубчатыми полками из листового проката разных толщин // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 2. С. 140–164. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-2-140-164>

Аннотация. Представлено продолжение оптимизации швеллерных и двутавровых гнутозамкнутых профилей (ГЗП) с трубчатыми полками из листового проката разных толщин. Такие профили предназначены для легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК), которые отличаются высокими технико-экономическими показателями и массовым спросом в промышленно-гражданском строительстве, что подтверждает актуальность их дальнейшей проработки. Приведены основные итоги расчета оптимальной на изгиб компоновки составных сечений двутавровых ГЗП из листовых заготовок разных толщин, включая унифицированные по оптимальным параметрам швеллерных ГЗП. Цель исследования – показать, что характеристики ЛСТК можно дополнительно улучшить при помощи формообразования профилей, сочетающего в составном сечении прямые и круглые очертания замкнутых и открытых контуров. Методы. Посредством опытно-конструкторских проработок, решения оптимизационных задач и вариантного проектирования двутавровых профилей уточнены их составные сечения из листовых заготовок разных толщин, в том числе заготовок швеллерных профилей. Оригинальность двутавровых и швеллерных ГЗП подтверждена патентной экспертизой. Результаты. Двутавровый ГЗП состоит из двух трубчатых полок и одной стенки двойной толщины. Расчет оптимальной компоновки двутаврового ГЗП из листового проката разных толщин на изгиб показал, что несущая способность лимитирована отношением толщин полок и стенки его составного сечения. В частности, когда толщина полок в 2 раза больше толщины стенки, прочность максимальна при отношении размеров ширины и высоты 1/11, а когда толщина полок составляет 0,6 толщины стенки, прочность максимальна при отношении размеров 1/3,3. При отношениях размеров ширины и высоты двутавровых ГЗП 1/2,68...1/3 и швеллерных ГЗП 1/5,36...1/6 их составные сечения оптимально компоновать из унифицированных заготовок.

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

Марутян Александр Суменович, преподаватель, кандидат технических наук, доцент; Scopus Author ID: 57194604628, eLIBRARY SPIN-код: 8528-9956.

© Марутян А.С., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Optimization of channels and I-shaped bended closed profiles with tubular shelves from sheets of different thicknesses

Alexander S. Marutyan

Pyatigorsk Institute (branch) of the North Caucasus Federal University, 56 Prospekt 40 let Oktyabrya, Pyatigorsk, 357500, Russian Federation
al_marut@mail.ru

Article history

Received: February 6, 2021

Revised: April 4, 2021

Accepted: April 15, 2021

Abstract. The continuation of optimization of channels and I-beams bent closed profiles (BCP) with tubular flanges made of rolled sheet of different thicknesses is presented. Such profiles are intended for light steel thin-walled structures (LSWS), which are distinguished by high technical and economic indicators and massive demand in industrial and civil construction, which confirms the *relevance* of their further development. The main results of the calculation of the optimal bending arrangement of composite sections of I-beams from sheet blanks of different thicknesses, including channel-type BCPs unified in terms of optimal parameters, are also presented. *The aim of the study* is to show that the characteristics of the LSWS can be further improved by shaping profiles, combining straight and round outlines of closed and open contours in a composite section. *Methods.* By means of experimental design studies, solution of optimization problems and variant design of I-profiles, their composite sections from sheet blanks of different thicknesses, including blanks of channel profiles, have been refined. The originality of channels and I-shaped BCP has been confirmed by patent examination. *Results.* The I-shaped BCP consists of two tubular shelves and one double thickness wall. Calculation of the optimal layout of an I-shaped BCP made of rolled sheet of different thicknesses for bending showed that the bearing capacity is limited by the ratio of the thickness of the flanges and the wall of its composite section. In particular, when the thickness of the flanges is 2 times the wall thickness, the strength is maximum at a ratio of width to height of 1/11, and when the thickness of the flanges is 0.6 times the wall thickness, the strength is maximum at a ratio of 1/3.3. With the ratios of the width and height of I-shaped BCP of 1/2.68...1/3 and channel-type BCPs of 1/5.36...1/6, their composite sections should be optimally assembled from standardized blanks.

Keywords: bar structures, thin-walled structures, bent-closed profiles, gear fastenings, optimization of sections, calculation of optimal parameters

For citation

Marutyan A.S. Optimization of channels and I-shaped bended closed profiles with tubular shelves from sheets of different thicknesses. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(2): 140–164. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-2-140-164>

Введение

В настоящее время и обозримой перспективе двутавр остается одним из наиболее востребованных, знаковых профилей для строительной практики и теории, что дает все основания считать его конструктивной формой номер один [1–10]. Эта форма обладает весьма обширной областью рационального применения, где довольно заметное место занято двутавровыми профилями с трубчатыми полками, к числу которых можно отнести такие специфические конструкции, как подкрановая балка с ромбовидными полками (рис. 1, а) [11] или битрубобетонная балка с круглыми полками (рис. 1, б) [12].

В полной мере приведенное обобщение можно распространить на легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК), где тонколистовая оцинкованная сталь является основным конструкционным материалом [13–19], а ее соединения представляют собой резьбовые, заклепочные, замковые и другие виды креплений без повреждения антикоррозийного покрытия [20–26].

Наличие соосных отверстий позволяет при необходимости вместо заклепок использовать болтовые соединения в гнукотлепанных профилях двутавровых очертаний с трубчатыми полками пятиугольной формы и таком же профиле швеллерного очертания с трубчатыми полками трапециевидной формы (рис. 2, а) [27]. Двутавровый профиль сборно-разборной балки можно компоновать из двух одинаковых заготовок, на монтаже вкладываемых друг в друга и фиксируемых в единое составное сечение замковыми креплениями (рис. 2, б) [28]. Двойным функциональным назначением отличаются длинные винты-саморезы в

сталебетонной балке, где они обеспечивают цельность составного сечения двутаврового профиля с плоскопараллельными полками из двух гнутых швеллеров и двух горизонтальных полос, а также их сцепление с бетоном (рис. 2, в) [29]. Двутавровое сечение поясного элемента из парных сигма-профилей (Σ -образной формы), развернутых полками наружу, имеет в своем составе листовую фасонку, характерную для ферменных конструкций, и приваренные к ней цилиндрические втулки с отверстиями под болтовые крепления (рис. 2, з) [30]. Аналогичные сигма-профили, развернутые внутрь, образуют для рамной конструкции гнUTOболтовой двутавровый профиль с трубчатыми полками пятиугольной формы, а также парными листовыми накладками и брусчатыми вкладышами, которые снабжены соосными отверстиями (рис. 2, д) [31; 32].

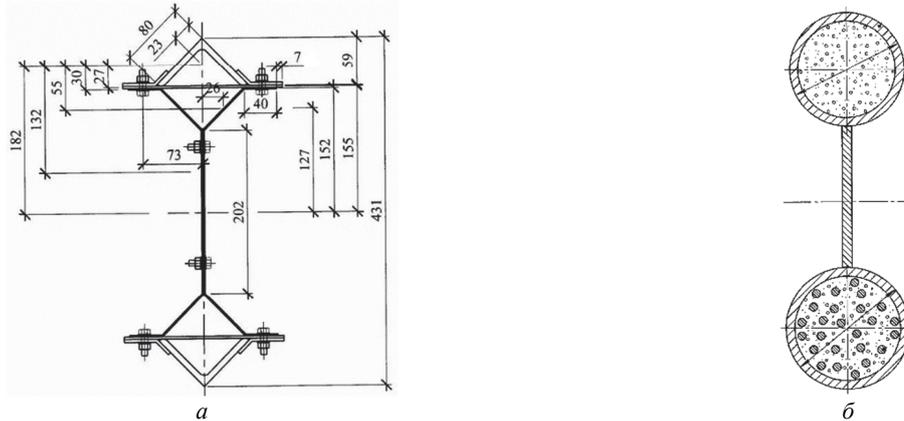


Рис. 1. Схемы двутавровых профилей с трубчатыми полками:
a – ромбовидной формы (подкрановая балка); *б* – круглой формы (битубобетонная балка)
Figure 1. Schemes of I-profiles with tubular shelves:
a – diamond-shaped (crane girder); *б* – round shape (bituminous concrete beam)

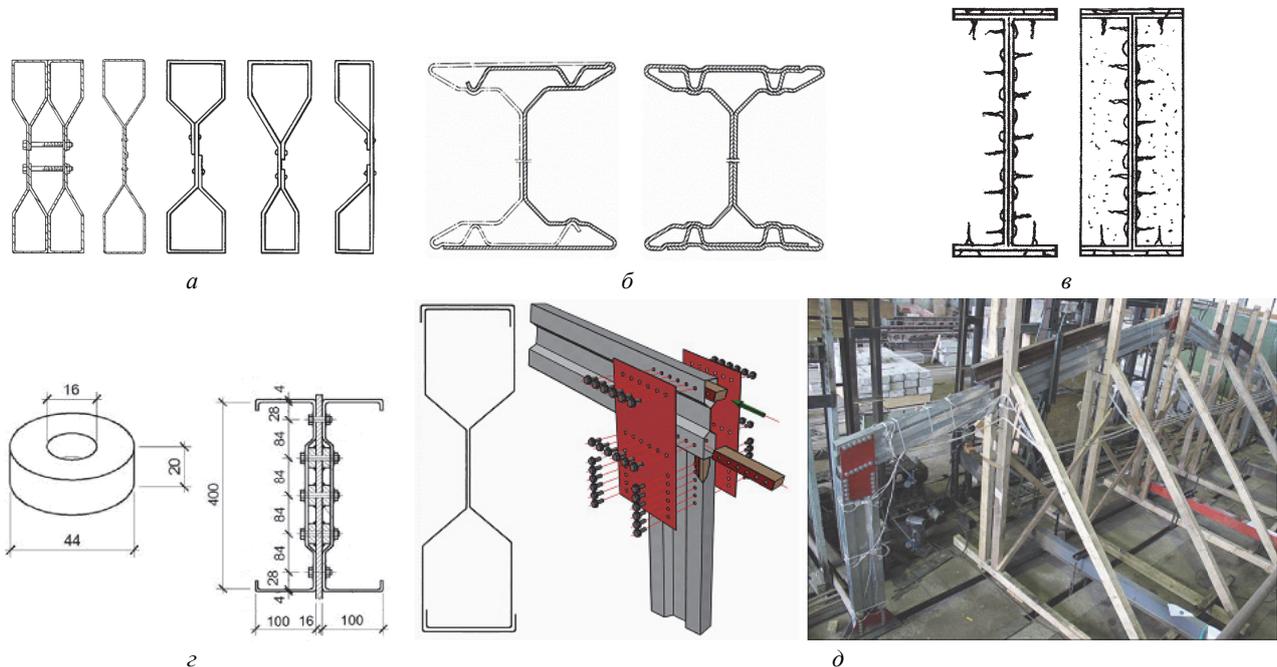


Рис. 2. Схемы двутавровых гнутых профилей:
a – с трубчатыми полками, болтовыми и клепаными соединениями; *б* – с трубчатыми полками и замковыми креплениями; *в* – с плоскопараллельными полками и винтами-саморезами; *г* – из парных сигма-профилей с плоскопараллельными полками, болтовыми соединениями, втулками и фасонкой; *д* – из парных сигма-профилей с трубчатыми полками, болтовыми соединениями, накладками и вкладышами
Figure 2. Schemes of I-shaped BCP:
a – with tubular shelves, bolted and riveted joints; *б* – with tubular shelves and locks; *в* – with plane-parallel shelves and self-tapping screws; *г* – from paired sigma profiles with plane-parallel shelves, bolted joints, bushings and gusset; *д* – from paired sigma profiles with tubular shelves, bolted connections, linings and liners

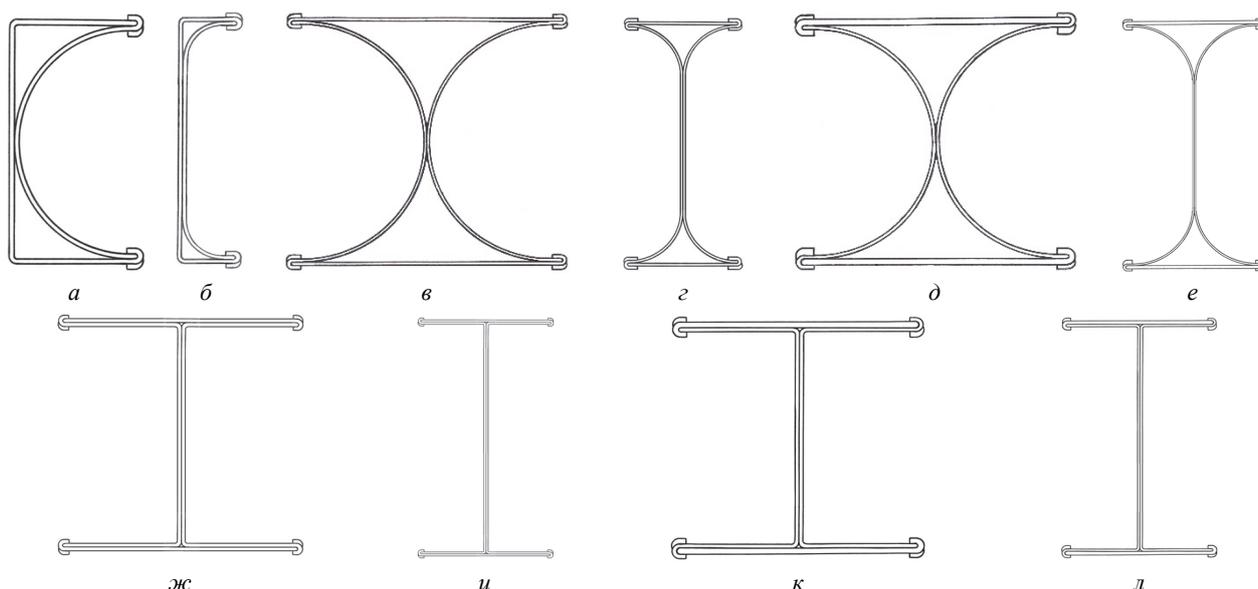


Рис. 3. Схемы швеллерных (*а, б*) и двутавровых ГЗП с трубчатыми (*в, г, д, е*) и плоскопараллельными (*ж, и, к, л*) полками
Figure 3. Schemes of channel (*а, б*) and I-beams with tubular (*в, г, д, е*) and plane-parallel (*ж, и, к, л*) shelves

Приведенный ряд профилей ЛСТК может быть продлен, если к нему приложить гнutoзамкнутые профили (ГЗП) с замыканиями зубчатых креплений заготовок из листового проката одинаковых толщин (рис. 3, *а–г*), специфика которых раскрыта достаточно подробно в прошлых публикациях [33–35]. Завершая вводную часть, остается обратить внимание на то, что совместное применение наружных заготовок швеллерных ГЗП и горизонтальных заготовок из листового проката разных толщин двутавровых ГЗП с трубчатыми полками позволяет компоновать такие же ГЗП с плоскопараллельными полками (рис. 3, *д–л*). При этом оптимизация и унификация листовых заготовок разных толщин может привести к существенному росту технико-экономических характеристик рассматриваемых профилей.

Материалы и методы

Значения основных параметров в плоскости наибольшей жесткости симметричного двутаврового профиля (рис. 4) можно представить с использованием приближенной методики расчета по средней линии его сечения, достаточно корректной для решения оптимизационных задач и вариантного проектирования:

$$W = \frac{(V/t_w)^{1/2} A^{3/2}}{4} \left(2 - \frac{3}{4}f\right) f^{1/2}; I = \frac{(V/t_w) A^2}{12} (3 - 2f) f;$$

$$i = \frac{(V/t_w)^{1/2} A^{1/2}}{2\sqrt{3}} (3f - 2f^2)^{1/2}; C = \frac{I t_w}{S} = \frac{2A(3-2f)}{3(2-f)} f,$$

где $V(U)$ – высота (ширина) по средней линии расчетного сечения; $t_w(t_f)$ – толщина стенки (полок) расчетного сечения; W – момент сопротивления; I – момент инерции; i – радиус инерции; C – сопротивление сечения срезу; S – статический момент полусечения; A – площадь поперечного сечения профиля; $f = (V t_w)/A$ [36].

Необходимо уточнить, что

$$V = h - t_f \text{ или } V = h_w + t_f,$$

где $h(h_w)$ – высота двутаврового профиля (высота его стенки); b – ширина того же профиля, $b = U$.

Для сравнительного анализа удобно использовать удельные характеристики, коими являются расчетные параметры профиля с единичной площадью поперечного сечения

$$\bar{W} = \frac{(V/t_w)^{1/2}}{4} (2 - \frac{4}{3}f)f^{1/2}; \bar{I} = \frac{V/t_w}{12} (3 - 2f)f;$$

$$\bar{i} = \frac{(V/t)^{1/2}}{2\sqrt{3}} (3f - 2f^2)^{1/2}; \bar{C} = \frac{2 - \frac{4}{3}f}{2 - f} f.$$

Отличительной особенностью решения оптимизационных задач двутавровых ГЗП с трубчатыми полками является не только компоновка в одном и том же составном сечении листовых заготовок разных толщин, но и возможность их унификации с точно такими же заготовками для швеллерных ГЗП с трубчатыми полками и двутавровыми ГЗП с плоскопараллельными полками, подобными прокатным двутаврам с параллельными гранями полок. При этом наружные горизонтальные заготовки гнutoзамкнутых двутавров могут быть из более тонкого, но прочного материала, что открывает определенные перспективы для бистальных балок и других, подобных ЛСТК с замыканиями, зубчатых креплений без сварных швов. Такие модификации могут улучшить технико-экономические показатели ЛСТК и расширить область их рационального применения, поскольку прокат бистальных профилей на рельсобалочных станах невозможен, а метод высокочастотной сварки позволяет создавать бистальные двутавры с поясами из высокопрочной стали [37].

Расчет двутавровых ГЗП с равными параметрами ширины и высоты

Чтобы определить расчетные параметры гнutoзамкнутого двутавра с равными размерами ширины и высоты ($n = U/V = 1/1$), в составном сечении которого пара круглых полуколец имеет одну толщину, а пара плоских граней трубчатых полок – другую толщину (рис. 5), необходимо ввести поправочный коэффициент k , учитывающий разницу этих толщин:

$$t_f/t_w = (t + kt)/(2t) = (1 + k)/2, \text{ откуда } k = 2(t_f/t_w) - 1,$$

где t_f – условная толщина полок, $t_f = t + kt = t(1 + k)$; t_w – условная толщина стенки, $t_w = 2t$; t – толщина полукольцевых заготовок; kt – толщина плоских заготовок.

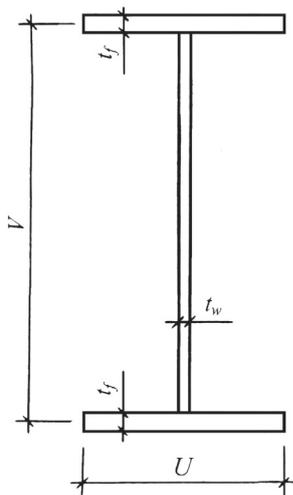


Рис. 4. Схема двутаврового профиля
Figure 4. Scheme of I-shaped profile

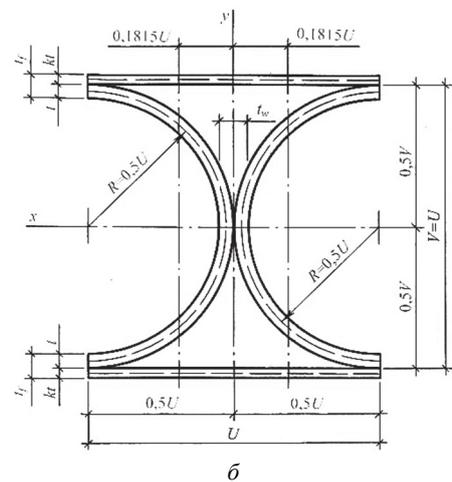
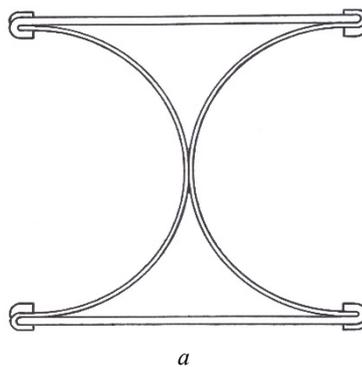


Рис. 5. Двутавровый ГЗП с равными параметрами ширины и высоты из листовых заготовок разных толщин (а), а также расчетная схема его сечения нетто (б)
Figure 5. I-shaped BCP with equal parameters of width and height from sheet blanks of different thicknesses (a) and design diagram of its net cross section (b)

Толщины полок и стенки представлены как условные из-за того, что листовые заготовки, формирующие двутавровый ГЗП, на расчетной схеме его поперечного сечения имеют лишь точечные касания. Однако их отношения позволяют уточнить пределы численных значений поправочного коэффициента, если для этого за ориентировочные параметры условно принять отношения полок и стенок горячекатаных двутавровых профилей из различных сортов:

– двутавры с уклоном внутренних граней полок по ГОСТ 8239–89¹:

$$t_f/t_w = 1,483...1,696 \text{ при } n = U/V = 1/3,158...1/1,653;$$

– двутавры с параллельными гранями полок по ГОСТ Р 57837–2017²:

$$t_f/t_w = 1,0...1,80 \text{ при } n = U/V = 1/3,030...1/0,8852;$$

– двутавры с параллельными гранями полок нестандартных размеров по ТУ 24107-016-00186269–2017³:

$$t_f/t_w = 1,0...1,80 \text{ при } n = U/V = 1/3,3687...1/0,9804.$$

С учетом приведенных параметров представляется целесообразным ограничить величину поправочного коэффициента:

– в нижнем пределе

$$k = 0,2 \text{ при } t_f/t_w = 0,6;$$

– в верхнем пределе

$$k = 3 \text{ при } t_f/t_w = 2,$$

где первый из двух пределов допустим, поскольку поправочный коэффициент с нулевым значением ($k = 0$ при $t_f/t_w = 0,5$) соответствует тому, что полки профиля остаются без замыканий зубчатых креплений.

Приняв поправочный коэффициент и уточнив его предельные (граничные) значения, формулы, апробированные расчетами швеллерных и двутавровых ГЗП из листовых заготовок одной толщины [31; 32], можно переписать для более общего случая с разными толщинами:

$$A = (2k + 3,14)tU; I_x = (0,5k + 0,3925)tU^3; I_y = (0,1666666k + 0,177467)tU^3.$$

Практическое значение имеет уточнение расчетных параметров с добавлением зубчатых креплений. Для этого в рассмотренном профиле необходимо подобрать размеры элементов зубчатого крепления (зубцов), которые должны быть не меньше 1/10 габаритного размера сечения согласно Своду правил РФ по проектированию стальных тонкостенных конструкций из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов⁴. В данном случае этот размер составляет $0,1U$, где U – размер гнутозамкнутого профиля по ширине.

В расчетных выкладках параметр зубчатых креплений (размер зубцов) отразится 8-кратным образом, так как двутавровый ГЗП имеет составное сечение из четырех листовых заготовок с продольными кромками зубчатой формы:

$$A_g = A + \Delta A = A + 4 \times 2 \times 0,1tU = A + 0,8tU.$$

Введение поправочного коэффициента для продолжения численных выкладок позволяет сделать расчетно-теоретическую предпосылку, допускающую применение констант ($A = \text{const}$, $t = \text{const}$), уже принятых при расчете двутавровых ГЗП с равными параметрами по ширине и высоте из листовых заготовок одной толщины, повторно для таких же профилей из заготовок разных толщин:

¹ ГОСТ 8239–89. Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент. М.: Издательство стандартов, 1990. 8 с.

² ГОСТ Р 57837–2017. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2017. 32 с.

³ ТУ 241-016-00186269–2017. Двутавры горячекатаные с параллельными гранями полок нестандартных размеров. Технические условия. Нижний Тагил: АО «ЕВРАЗ НТМК», 2017. 16 с.; ОСТ 8239–89. Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент. М.: Издательство стандартов, 1990. 8 с.

⁴ СП 260.132555800.16. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования. М., 2016. С. 16; У 241-016-00186269–2017. Двутавры горячекатаные с параллельными гранями полок нестандартных размеров. Технические условия. Нижний Тагил: АО «ЕВРАЗ НТМК», 2017. 16 с.

$$U = V = (A/t)/(2k + 3,14); U^2 = (A^2/t^2)/(2k + 3,14)^2;$$

$$W_x = 2I_x/V = 2(0,5k + 0,3925)tU^3/U = (k + 0,785)tU^2 = (A^2/t)(k + 0,785)/(4k^2 + 12,56k + 9,8596).$$

Чтобы найти экстремальное значение момента сопротивления W_x , его выражение необходимо продифференцировать по переменной k и, приравняв к нулю производную ($dW_x/dk = 0$), получить уравнение

$$4k^2 + 6,28k = 0 \text{ с корнем } k = -1,57.$$

Из этого результата вытекает, что экстремальное значение момента сопротивления ($W_x = W_{x,\max}$), можно определить, подставив в расчетные формулы граничные (предельные) величины поправочного коэффициента:

– при $t_f/t_w = 0,6 (k = 0,2)$

$$A = (2 \times 0,2 + 3,14)tU = 3,54tU; U = V = (A/t)/3,54 = 0,2824858A/t;$$

$$I_x = (0,5 \times 0,2 + 0,3925)tU^3 = 0,4925tU^3 = 0,4925t(0,2824858A/t)^3 = 0,0111018A^3/t^2;$$

$$I_y = (0,1666666 \times 0,2 + 0,177467)tU^3 = 0,2108003tU^3 = 0,2108003t(0,2824858A/t)^3 = 0,0047518A^3/t^2;$$

$$W_x = 2I_x/V = 2 \times 0,4925tU^3/U = 0,9850tU^2 = 0,9850t(0,2824858A/t)^2 = 0,0786012A^2/t;$$

$$A_g = A + \Delta A = 3,54tU + 4 \times 2 \times 0,1tU = 4,34tU;$$

$$A/A_g = 3,54/4,34 = 0,8156682;$$

– при $t_f/t_w = 2 (k = 3)$

$$A = (2 \times 3 + 3,14)tU = 9,14tU; U = V = (A/t)/9,14 = 0,1094091A/t;$$

$$I_x = (0,5 \times 3 + 0,3925)tU^3 = 1,8925tU^3 = 1,8925t(0,1094091A/t)^3 = 0,0024785A^3/t^2;$$

$$I_y = (0,1666666 \times 3 + 0,177467)tU^3 = 0,677467tU^3 = 0,677467t(0,1094091A/t)^3 = 0,0008872A^3/t^2;$$

$$W_x = 2I_x/V = 2 \times 1,8925tU^3/U = 3,7850tU^2 = 3,7850t(0,1094091A/t)^3;$$

$$A_g = A + \Delta A = 9,14tU + 4 \times 2 \times 0,1tU = 9,94tU;$$

$$A/A_g = 9,14/9,94 = 0,9195171,$$

где A и t – площадь сечения и толщина двутаврового ГЗП из листовых заготовок одинаковой толщины соответственно, $A = \text{const}$ и $t = \text{const}$.

Сравнительный расчет показывает, что замена листовых заготовок одной толщины на такие же заготовки разных толщин сопровождается ростом несущей способности гнутозамкнутого двутавра, когда условная толщина полок больше условной толщины стенки ($t_f/t_w > 1$). В противном случае, когда условная толщина полок меньше условной толщины стенки ($t_f/t_w < 1$), такая замена листовых заготовок вызывает снижение несущей способности. В частном случае, если принять, что сравниваемые профили имеют одинаковые размеры с их постоянным отношением $n = U/V = 1/1$, то при $t_f/t_w = 2$ несущая способность может увеличиться до $3 \times 1,785/3,785 = 1,4$ раза, а при $t_f/t_w = 0,60$ – уменьшиться до $5 \times 0,985/1,785 = 2,8$ раза.

В целом предлагаемое техническое решение представляется достаточно универсальным и эффективным для того, чтобы использование в нем листовых заготовок разных толщин обеспечило расширение области рационального применения гнутозамкнутых двутавров и швеллеров, включая компоновку их составных сечений с наиболее напряженными элементами из высокопрочных материалов по типу бистальных балок.

Расчет двутавровых ГЗП с разными параметрами ширины и высоты

Чем меньше параметр ширины относительно параметра высоты, тем больше контур профиля вытягивается в двутавровую форму, а его изогнутые грани меняют полукруглые очертания на полуплоскоовальные (рис. 6, а). В противном случае, когда параметр высоты меньше параметра ширины, контур профиля сплющивается в Н-образную форму, а его изогнутые грани из полукруглых становятся U-образными (рис. 6, в).

Для определения расчетных параметров двутаврового ГЗП с разными параметрами ширины и высоты ($n = U/V < 1/1$), в составном сечении которого пара изогнутых граней стенки имеет одну толщину, а пара плоских граней трубчатых полок – другую (рис. 7), можно еще раз воспользоваться поправочным коэффициентом, учитывающим разницу этих толщин. При этом очевидно, что обозначение толщины полка остается условным, а обозначение толщины стенки перестает быть таковым.

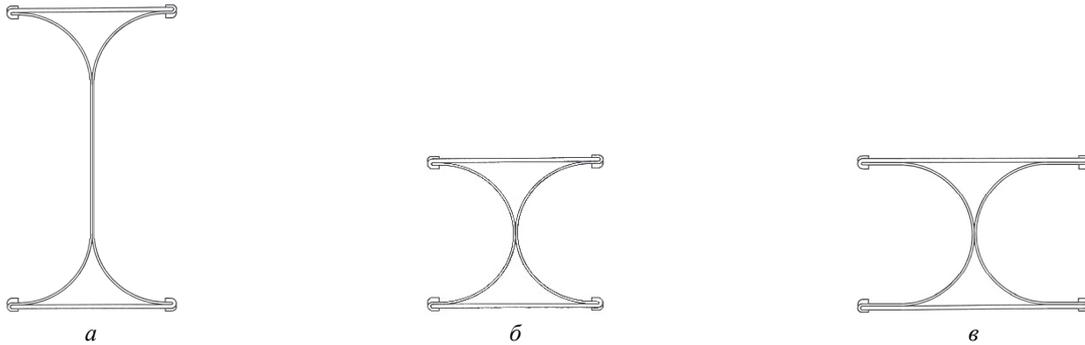


Рис. 6. Схемы двутавровых ГЗП с трубчатыми полками:
 а – при $n = U/V < 1/1$; б – при $n = U/V = 1/1$; в – при $n = U/V > 1/1$

Figure 6. Schemes of I-shaped BCP:
 а – with $n = U/V < 1/1$; б – with $n = U/V = 1/1$; в – with $n = U/V > 1/1$

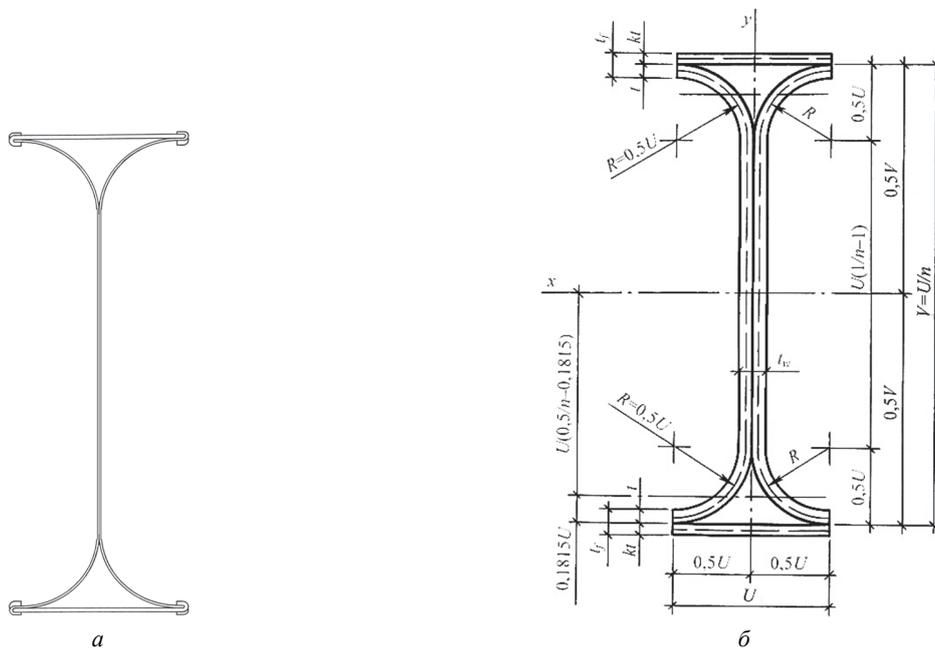


Рис. 7. Двутавровый ГЗП с разными параметрами ширины и высоты (а), а также расчетная схема его сечения нетто (б)
Figure 7. I-shaped BCP with different parameters of width and height (а) and design diagram of its net cross section (б)

Тогда еще одно введение поправочного коэффициента позволяет переписать расчетные формулы для общего случая в виде

$$A = tU(2/n + 2k + 1,14);$$

$$I_x = tU^3(0,1666666/n^3 + 0,285/n^2 + 0,5k/n^2 - 0,0699728/n + 0,0108234);$$

$$I_y = tU^3(0,1666666k + 0,1774902).$$

При контрольной проверке полученных формул можно протестировать, подставив в них уже известные значения переменных ($n = 1/5, 2; n = 1/1; k = 0, 2; k = 1; k = 3$), и получить расчетные выкладки, приведенные выше.

Тогда еще одно введение поправочного коэффициента позволяет переписать расчетные формулы для общего случая в виде

$$A = tU(2/n + 2k + 1,14);$$

$$I_x = tU^3(0,1666666/n^3 + 0,285/n^2 + 0,5k/n^2 - 0,0699728/n + 0,0108234);$$

$$I_y = tU^3(0,1666666k + 0,1774902).$$

Оптимизация двутавровых ГЗП с разными параметрами ширины и высоты

Чтобы продолжить оптимизационный расчет двутавровых ГЗП из листовых заготовок разных толщин, целесообразно для первого приближения подставить в расчетные формулы граничные (предельные) величины поправочного коэффициента, приняв отношение $n = U/V = 1/5, 2$, оптимальное для таких же профилей из заготовок одной толщины [35]:

– при $t_f/t_w = 0,6$ ($k = 0,2$)

$$A = tU(2 \times 0,2 + 11,58) = 11,98tU; U = 0,0834724A/t; V = 0,4356137A/t;$$

$$I_x = tU^3(13,617187 \times 0,2 + 31,095253) = 33,81869tU^3 = 33,81869t(0,0834724A/t)^3 = 0,0196691A^3/t^2;$$

$$I_y = tU^3(0,1666666 \times 0,2 + 0,1774902) = 0,2108235tU^3 = 0,2108235t(0,0834724A/t)^3 = 0,0001226A^3/t^2;$$

$$W_x = 2I_x/V = 2 \times 33,81869tU^3/(5,2186564U) = 12,960688tU^2 = 12,960688t(0,0834724A/t)^2 = 0,0903054A^2/t;$$

$$A_g = A + \Delta A = 11,98tU + 4 \times 2 \times 0,1tU = 12,78tU;$$

$$A/A_g = 11,98/12,78 = 0,9374021;$$

– при $t_f/t_w = 2$ ($k = 3$)

$$A = tU(2 \times 3 + 11,58) = 17,98tU; U = 0,0556173A/t; V = 0,2902475A/t;$$

$$I_x = tU^3(13,617187 \times 3 + 31,095253) = 71,946814tU^3 = 71,946814t(0,0556173A/t)^3 = 0,0123777A^3/t^2;$$

$$I_y = tU^3(0,1666666 \times 3 + 0,1774902) = 0,6774902tU^3 = 0,6774902t(0,0556173A/t)^3 = 0,0001165A^3/t^2;$$

$$W_x = 2I_x/V = 2 \times 71,946814tU^3/(5,2186564U) = 27,572924tU^2 = 27,572924t(0,0556173A/t)^2 = 0,0852908A^2/t;$$

$$A_g = A + \Delta A = 17,98tU + 4 \times 2 \times 0,1tU = 18,78tU;$$

$$A/A_g = 17,98/18,78 = 0,9574014,$$

где A и t – площадь сечения и толщина двутаврового ГЗП из листовых заготовок одинаковой толщины соответственно, $A = \text{const}$ и $t = \text{const}$.

Результаты первого приближения показывают, что и в этом расчетном случае замена листовых заготовок одинаковой толщины на такие же заготовки разных толщин сопровождается ростом несущей способности гнутозамкнутого двутавра, когда условная толщина полков больше толщины стенки ($t_f/t_w > 1$).

Когда же условная толщина полок меньше условной толщины стенки ($t_f/t_w < 1$), такая замена листовых заготовок вызывает снижение несущей способности. В частности, если принять, что сравниваемые профили имеют одинаковые размеры с их постоянным отношением $n = U/V = 1/5,2$, то при $t_f/t_w = 2$ несущая способность может увеличиться до $3 \times 17,197163/27,67185 = 1,8$ раза, а при $t_f/t_w = 0,60$ – уменьшиться до $5 \times 13,007188/17,197163 = 3,7$ раза.

Для продолжения оптимизационного расчета во втором приближении необходимо определить расчетные параметры двутавровых ГЗП из листовых заготовок разных толщин в зависимости от отношения их размеров ширины и высоты ($n = U/V$) с учетом граничных значений поправочного коэффициента:

– при $t_f/t_w = 0,6$ ($k = 0,2$)

$$A = tU(2/n + 2 \times 0,2 + 1,14) = tU(2/n + 1,54);$$

$$I_x = tU^3(0,1666666/n^3 + 0,285/n^2 + 0,5 \times 0,2/n^2 - 0,0699728/n + 0,0108234) = \\ = tU^3(0,1666666/n^3 + 0,385/n^2 - 0,0669728/n + 0,0108234);$$

$$I_y = tU^3(0,1666666 \times 0,2 + 0,1774902) = 0,2108235tU^3;$$

$$W_x = tU^2(0,3333332/n^2 + 0,770/n - 0,1399456 + 0,0216468n) = \\ = (A^2/t)(0,3333332/n^2 + 0,770/n - 0,1399456 + 0,0216468n)/(2/n + 1,54)^2,$$

где $U^2 = (A^2/t^2)/(2/n + 1,54)^2$, $A = \text{const}$, $t = \text{const}$;

– при $t_f/t_w = 2$ ($k = 3$)

$$A = tU(2/n + 2 \times 3 + 1,14) = tU(2/n + 7,14);$$

$$I_x = tU^3(0,1666666/n^3 + 0,285/n^2 + 0,5 \times 3/n^2 - 0,0699728/n + 0,0108234) = \\ = tU^3(0,1666666/n^3 + 1,785/n^2 - 0,0699728/n + 0,0108234);$$

$$I_y = tU^3(0,1666666 \times 3 + 0,1774902) = 0,677490tU^3;$$

$$W_x = tU^2(0,3333332/n^2 + 3,570/n - 0,1399456 + 0,0216468n) = \\ = (A^2/t)(0,3333332/n^2 + 3,570/n - 0,1399456 + 0,0216468n)/(2/n + 7,14)^2,$$

где $U^2 = (A^2/t^2)/(2/n + 7,14)^2$, $A = \text{const}$, $t = \text{const}$.

Чтобы найти экстремальные значения моментов сопротивления W_x , их выражения необходимо продифференцировать по переменной n и, приравняв к нулю производные ($dW_x/dn = 0$), получить уравнение четвертой степени:

– при $t_f/t_w = 0,6$ ($k = 0,2$)

$$0,0513375n^4 + 0,2666884n^3 - 2,4284352n^2 - 2,7006308n + 1,0266675 = 0$$

с корнями

$$n_1 = -9,5487614; n_2 = -1,2987014; n_3 = 0,3013557; n_4 = 5,3513002;$$

– при $t_f/t_w = 2$ ($k = 3$)

$$1,1035452n^4 + 1,2364652n^3 - 185,73426n^2 - 35,10594n + 4,760004 = 0$$

с корнями

$$n_1 = -13,453334; n_2 = -0,2801120; n_3 = 0,0914105; n_4 = 12,521588.$$

Из найденных корней практический интерес представляют третьи, значения которых можно округлить до:

– при $t_f/t_w = 0,6$ ($k = 0,2$)

$$n = 0,3013557 = 1/3,3183377 \approx 1/3,3;$$

– при $t_f/t_w = 2$ ($k = 3$)

$$n = 0,0914105 = 1/10,939662 \approx 1/11.$$

Тогда расчетные параметры профилей, оптимизированных на изгиб, составят:

– при $t_f/t_w = 0,6$ ($k = 0,2$)

$$A = tU(2/0,3013557 + 1,54) = 8,1766755tU;$$

$$U = 0,122299A/t; V = 0,4058293A/t;$$

$$I_x = tU^3(0,1666666/0,3013557^3 + 0,385/0,3013557^2 - 0,0699728/0,3013557 + 0,0108234) = 10,117862tU^3 = 10,117862t(0,3013557A/t)^3 = 0,0185079A^3/t^2;$$

$$I_y = 0,2108235tU^3 = 0,210835t(0,122299A/t)^3 = 0,0003856A^3/t^2;$$

$$W_x = Wx^3_{x,\max} = 6,0981508t(0,122299A/t)^2 = 0,0912103A^2/t;$$

$$A_g = A + \Delta A = 8,1766755tU + 4 \times 2 \times 0,1tU = 8,9766755tU;$$

$$A/A_g = 8,1766755/8,9766755 = 0,9108801;$$

– при $t_f/t_w = 2$ ($k = 3$)

$$A = tU(2/0,0914105 + 7,14) = 29,019324tU;$$

$$U = 0,0344597A/t; V = 0,3769774A/t;$$

$$I_x = tU^3(0,1666666/0,0914105^3 + 1,785/0,0914105^2 - 0,0699728/0,0914105 + 0,0108234) = 431,07016tU^3 = 431,07016t(0,0344597A/t)^3 = 0,0176393A^3/t^2;$$

$$I_y = 0,6774902tU^3 = 0,6774902t(0,0344597A/t)^3 = 0,0000204A^3/t^2;$$

$$W_x = Wx^3_{x,\max} = 78,808679t(0,0344597A/t)^2 = 0,0935830A^2/t;$$

$$A_g = A + \Delta A = 29,019324tU + 4 \times 2 \times 0,1tU = 29,819324tU;$$

$$A/A_g = 29,019324/29,819324 = 0,9731717.$$

Для завершения оптимизационного расчета остается воспользоваться аналогичными вычислениями расчетных параметров профилей, оптимизированных на изгиб с шагом 0,1 в пределах всего обозначенного интервала ($0,6 \leq t_f/t_w \leq 2$), и их основные результаты систематизировать более развернуто в табличной форме (табл. 1).

Как видно из основных итогов оптимизационного расчета двутавровых ГЗП на изгиб, в пределах всего интервала изменения отношения толщин полок и стенок $t_f/t_w = 0,6 \dots 2,0$ моменты сопротивления их расчетных сечений максимальны, когда отношения размеров ширины и высоты составляют от $n = U/V = 1/11$ до $n = U/V = 1/3,3$. При этом чем больше отношение толщин полок и стенок, тем меньше относительное значение оптимальной ширины расчетного сечения нетто, а относительное значение оптимальной высоты изменяется малозаметно.

Расчетные параметры двутавровых ГЗП, оптимизированных на изгиб
 Table 1. Design parameters of I-shaped BCP optimized for bending

| t_f/t_w | $1/n = V/U$ | $U, A/t^*$ | $V, A/t$ | A/A_g | $I_x, A^3/t^2$ | $I_y, A^3/t^2$ | $W_{2x, \max}$ |
|-----------|-------------|------------|-----------|-----------|----------------|----------------|----------------|
| 0,6 | 3,3183377 | 0,1222990 | 0,4058293 | 0,9108801 | 0,0185079 | 0,0003856 | 0,0912012 |
| 0,7 | 3,7169042 | 0,1066802 | 0,3965200 | 0,9213667 | 0,0182365 | 0,0002964 | 0,0919827 |
| 0,8 | 4,1841599 | 0,0933853 | 0,3907390 | 0,9304850 | 0,0180642 | 0,0002259 | 0,0924617 |
| 0,9 | 4,6896198 | 0,0825134 | 0,3869564 | 0,9380768 | 0,0178418 | 0,0001746 | 0,0927329 |
| 1,0 | 5,2186564 | 0,0736522 | 0,3843655 | 0,9443567 | 0,0178643 | 0,0001375 | 0,0929547 |
| 1,1 | 5,7633067 | 0,0663719 | 0,3825216 | 0,9495796 | 0,0178087 | 0,0001103 | 0,0931121 |
| 1,2 | 6,3239506 | 0,0602849 | 0,3812387 | 0,9539909 | 0,0177129 | 0,0000900 | 0,0929228 |
| 1,3 | 6,8825256 | 0,0552332 | 0,3801439 | 0,9576832 | 0,0177365 | 0,0000784 | 0,0933146 |
| 1,4 | 7,4520757 | 0,0509057 | 0,3793531 | 0,9608590 | 0,0177123 | 0,0000629 | 0,0933816 |
| 1,5 | 8,0262554 | 0,0471864 | 0,3787301 | 0,9636239 | 0,0177513 | 0,0000536 | 0,0937411 |
| 1,6 | 8,6040674 | 0,0439596 | 0,3782313 | 0,9660270 | 0,0176780 | 0,0000462 | 0,0934771 |
| 1,7 | 9,1848028 | 0,0411360 | 0,3778260 | 0,9681396 | 0,0176675 | 0,0000401 | 0,0935218 |
| 1,8 | 9,7679048 | 0,0386461 | 0,3774914 | 0,9700102 | 0,0176552 | 0,0000352 | 0,0935396 |
| 1,9 | 10,352963 | 0,0364352 | 0,3772122 | 0,9716773 | 0,0176466 | 0,0000311 | 0,0935632 |
| 2,0 | 10,939662 | 0,0344597 | 0,3769774 | 0,9731717 | 0,0176393 | 0,0000204 | 0,0935830 |

Примечание: * $A = \text{const}$, $t = \text{const}$.

Note: * $A = \text{const}$, $t = \text{const}$.

Оптимизация унифицированных листовых заготовок разных толщин

Гнутые швеллеры и швеллерные ГЗП с трубчатыми полками при отношении параметров ширины и высоты 1/2, а также двутавровые ГЗП с трубчатыми и плоскопараллельными полками при отношении параметров ширины и высоты 1/1 сконструированы из одинаковых листовых заготовок одной и разных толщин, имеющих сечения гнутых швеллеров и круглых полуколец (рис. 8, а, б, в), что позитивно влияет на технико-экономические характеристики этих профилей и конструкций из них. При отношениях параметров ширины и высоты, отличных от 1/2 и 1/1, применение одинаковых листовых заготовок одной и разных толщин вполне возможно за счет повышения степени их унификации (рис. 8, г, д, е).

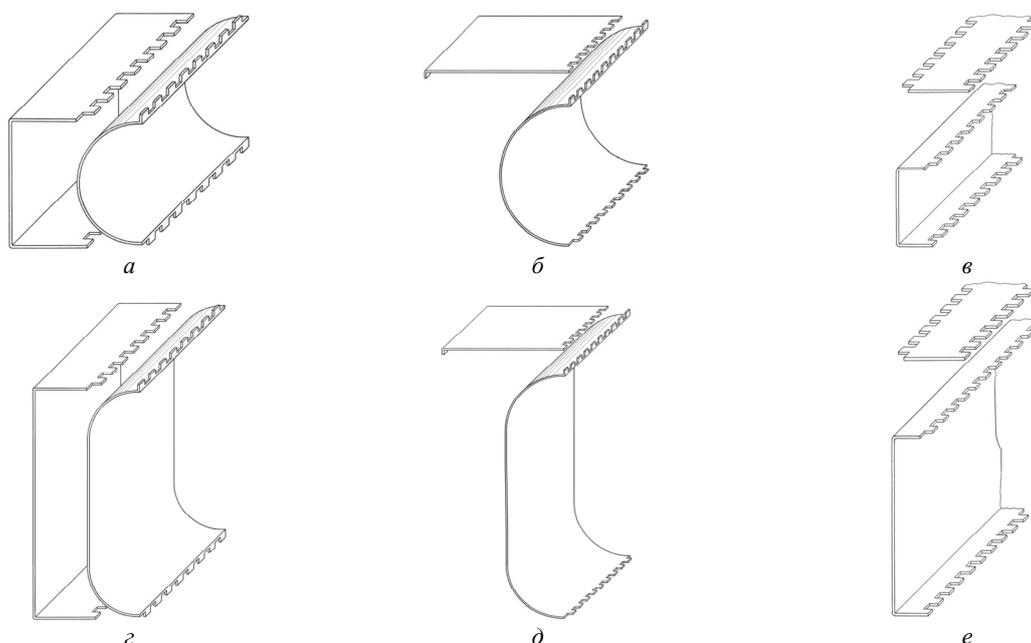


Рис. 8. Аксонометрии листовых заготовок швеллерных и двутавровых ГЗП при $n = U/V = 1/2$ (а), $n = U/V = 1/1$ (б, в) и $n = U/V < 1/2$ (з, д, е)

Figure 8. Axonometry of sheet blanks of channel and I-shaped BCP with $n = U/V = 1/2$ (a), with $n = U/V = 1/1$ (b) and with $n = U/V < 1/2$ (z, d, e)

Для оптимизационного расчета унифицированных заготовок целесообразно еще раз вернуться к задаче по раскрою гнутого швеллера с наибольшей прочностью на изгиб (рис. 9, а), решение которой полностью совпало с приближенным расчетом по средней линии его тонкостенного сечения [34]:

$$n = U/V = 1/6; U = 0,125A/t; V = 0,750A/t; x_0 = 0,015625A/t;$$

$$I_x = 0,0703125A^3/t; I_y = 0,0018807A^3/t^2; W_x = W_{2x,max}.$$

Очевидно, что это решение обеспечивает максимальную несущую способность на изгиб не только швеллерному профилю. С таким же успехом (за исключением абсциссы x_0) его можно распространить и на другие профильные формы из листового проката одной толщины ($t_f/t_w = 1$), где пара горизонтальных граней (полок) соединены вертикальной гранью (стенкой), например зетовые (Z-образные) и двутавровые (рис. 9, б). Более того, оптимизационная задача имеет продолжение, представляющее определенный практический интерес для случая с полками двойной толщины при $t_f/t_w = 2$ (рис. 9, в).

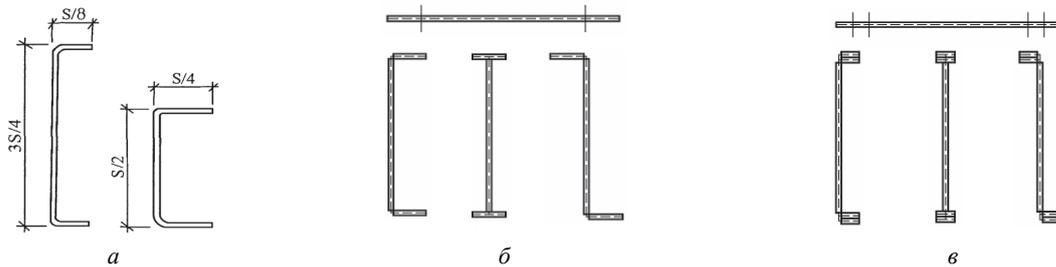


Рис. 9. Схемы профилей и их заготовок с полками одинарной (а, б) и двойной (в) толщины
Figure 9. Schemes of blanks with shelves of single (a, б) and double (в) thickness

Решение оптимизационной задачи для профилей с полками двойной толщины методом приближенного расчета по средней (срединной) линии их тонкостенного сечения можно представить следующим образом:

$$n = U/V; A = tU(1/n + 4);$$

$$I_x = tU^3(0,0833333/n + 1)/n^2; I_y = 0,6666666tU^3; W_x = tU^2(0,1666666/n + 2)/n,$$

где A – площадь расчетного сечения; $I_x(W_x)$ – момент инерции (момент сопротивления) того же сечения в плоскости наибольшей жесткости.

С учетом заданных размеров стальной полосы (листовой заготовки), принятых в качестве постоянных величин, выражение момента сопротивления можно переписать:

$$W_x = (A^2/t)(0,1666666/n^2 + 2/n)/(1/n + 4)^2,$$

где $U^2 = (A^2/t^2)/(1/n + 4)^2, A = \text{const}, t = \text{const}$.

Чтобы найти экстремальное значение момента сопротивления W_x , его выражение необходимо продифференцировать по переменной n и, приравняв к нулю производную ($dW_x/dn = 0$), получить уравнение второй степени:

$$n^2 + 0,1666666n - 0,0208333 = 0 \text{ с корнями } n_1 = -0,25 \text{ и } n_2 = 0,0833333.$$

Из найденных корней практический интерес представляет второй, значение которого можно округлить до $n = 0,0833333 = 1/12,000004 \approx 1/12$, получив следующие расчетные параметры:

$$t_f/t_w = 2; n = U/V = 1/12; U = 0,0625A/t; V = 0,750A/t;$$

$$I_x = 0,0703125A^3/t; I_y = 0,0001627A^3/t^2; W_x = W_{2x,max}.$$

Полученный результат показывает, что у тонкостенных профилей с полками одинарной толщины ($t_f/t_w = 1$) и полками двойной толщины ($t_f/t_w = 2$) оптимальные высоты имеют одинаковый размер, составляющий 3/4 ширины стальной полосы. Одинаковы при этом также расчетные параметры моментов инерции и сопротивления сечения в плоскости наибольшей жесткости, а в плоскости наименьшей жесткости расчетные параметры момента инерции уменьшаются более чем на целый порядок: $0,0018807/0,0001627 = 11,56$.

Применительно к ГЗП с трубчатыми полками разница между оптимальными отношениями размеров ширины и высоты их расчетных сечений нетто от оптимальных параметров раскрыя стальной полосы составила:

– для швеллерных при $t_f/t_w = 1$

$$100(6 - 5,68)/(6...5,68) = 5,3...5,6 \% [31];$$

– для двутавровых при $t_f/t_w = 1$

$$100(6 - 5,2)/(6...5,2) = 13,3...15,4 \% [32];$$

– для двутавровых при $t_f/t_w = 2$

$$100(12 - 10,939662)/(12...10,939662) = 8,8...9,7 \%$$

В последнем расчетном случае оптимальные параметры разнятся между собой в 1,5 раза меньше, чем в предыдущем, вероятно, из-за того, что с ростом толщины горизонтальных граней, сопровождаемым укорочением их ширины, уменьшаются оба замкнутых контура трубчатых полок двутавровых ГЗП, которые в пределе стремятся к плоскопараллельным очертаниям.

Таблица 2

Расчетные параметры ГЗП из унифицированных заготовок

| Профиль | $n = U/V *$ | U, V | A, tV | $\frac{I_x, tV^3}{\bar{I}_x, V^2}$ | $\frac{I_y, tV^3}{\bar{I}_y, V^2}$ | $\frac{W_x, tV^2}{\bar{W}_x, V}$ |
|---------|-------------|-----------|-----------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Швеллер | 1/2 | 0,50 | 3,570 | 0,5295833 | 0,0919103 | 1,0591666 |
| | | | | 0,1483426 | 0,0257451 | 0,2966853 |
| Двутавр | 1/1 | 1,0 | 5,140 | 0,89250 | 0,3441340 | 1,7850 |
| | | | | 0,1736381 | 0,0669521 | 0,3472762 |
| Швеллер | 1/5,68 | 0,1760563 | 2,5540512 | 0,3012541 | 0,0057893 | 0,6025082 |
| | | | | 0,1179514 | 0,0022667 | 0,2359029 |
| Двутавр | 1/2,84 | 0,3521126 | 3,1081024 | 1,9519776 | 0,0150245 | 3,9039552 |
| | | | | 0,6280287 | 0,0048339 | 1,2560574 |

Примечание: * $V = \text{const}, t = \text{const}$.

Table 2

Design parameters of BCP from standardized blanks

| Profile | $n = U/V *$ | U, V | A, tV | $\frac{I_x, tV^3}{\bar{I}_x, V^2}$ | $\frac{I_y, tV^3}{\bar{I}_y, V^2}$ | $\frac{W_x, tV^2}{\bar{W}_x, V}$ |
|----------|-------------|-----------|-----------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Channel | 1/2 | 0,50 | 3,570 | 0,5295833 | 0,0919103 | 1,0591666 |
| | | | | 0,1483426 | 0,0257451 | 0,2966853 |
| I-shaped | 1/1 | 1,0 | 5,140 | 0,89250 | 0,3441340 | 1,7850 |
| | | | | 0,1736381 | 0,0669521 | 0,3472762 |
| Channel | 1/5,68 | 0,1760563 | 2,5540512 | 0,3012541 | 0,0057893 | 0,6025082 |
| | | | | 0,1179514 | 0,0022667 | 0,2359029 |
| I-shaped | 1/2,84 | 0,3521126 | 3,1081024 | 1,9519776 | 0,0150245 | 3,9039552 |
| | | | | 0,6280287 | 0,0048339 | 1,2560574 |

Note: * $V = \text{const}, t = \text{const}$.

Из полученных результатов также следует, что выявленная разница оптимальных параметров с переходом от швеллерных ГЗП к двутавровым увеличилась более чем вдвое, поскольку вторые компонуются из пар первых за вычетом швеллерных стенок. Если принять, что оставшиеся швеллерные грани плоскоовальных очертаний имеют оптимальные размеры в пределах $V_1 = (5,68 \pm 0,32)U_1 = (5,36..6,0)U_1$, где несущая способность на изгиб приближена к своему максимуму, то в двутавровой компоновке эти размеры сократятся вдвое: $V = (2,84 \pm 0,16)U = (2,68..3,0)U$. Тогда полученные отношения размеров двутавровых ГЗП окажутся приближенными к оптимальным параметрам наиболее грузоподъемных прокатных двутавров балочного типа из стандартных сортаментов. Если развить компоновку составных сечений двутавровых ГЗП по высоте до их оптимальных на изгиб размеров $V = (5,2 \pm 0,8)U = (4,4..6,0)U$, то листовые заготовки швеллерных очертаний сузятся вдвое, достигая тех граничных пределов, где трубчатые полки условно трансформируются в сплошные: $V_1 = (10,4 \pm 1,6)U = (8,8..12,0)U_1$. Поэтому для унификации предпочтительнее те из листовых заготовок, которые обеспечивают максимум положительного эффекта в составных сечениях швеллерных и двутавровых, а в перспективе и других конструктивно-компоновочных форм ГЗП. В частности, следует добавить, что швеллерные заготовки с ортогональными сопряжениями вертикальных и горизонтальных граней, бесполезные для двутавровых ГЗП с трубчатыми полками, в следующих проработках являются формообразующими для двутавровых ГЗП с плоскопараллельными гранями полок и Н-образных ГЗП. Поскольку расчетные параметры таких профилей с использованием унифицированных заготовок могут представлять практический интерес, основные их значения можно свести вместе, приняв в качестве постоянных величин толщину и размер по высоте. Для большей наглядности кроме абсолютных величин геометрических (статических) характеристик расчетных сечений нетто можно также показать в знаменателях их удельные (приведенные) значения, соотнесенные с площадями этих сечений (табл. 2).

Результаты и обсуждение

Реализация двутавровых ГЗП с равными параметрами ширины и высоты

Пример реализации предлагаемого технического решения можно привести, если продолжить расчетные выкладки двутаврового ГЗП с $n = U/V = 1/1$ и трубчатыми полками из листового проката одной толщины ($t_f/t_w = 1$) [35], дополнив их такими же выкладками с листовыми заготовками разных толщин (рис. 10):

– при $t_f/t_w = 0,6$ ($k = 0,2$)

$$t = A_g/(4,34U) = 3,20/(4,34 \times 10,0) = 0,0737327 \approx 0,07 \text{ см};$$

$$kt = 0,2 \times 0,07 = 0,014 \text{ см};$$

$$A_g = 4,34 \times 0,07 \times 10,0 = 3,038 \text{ см}^2 (94,94 \%);$$

$$A = 3,54tU = 3,54 \times 0,07 \times 10,0 = 2,478 \text{ см}^2 (93,16 \%);$$

$$I_x = 0,0111018A^3/t^2 = 0,0111018 \times 2,478^3/0,07^2 = 34,47 \text{ см}^4 (86,18 \%);$$

$$I_y = 0,0047518A^3/t^2 = 0,0047518 \times 2,478^3/0,07^2 = 14,76 \text{ см}^4 (114,3 \%);$$

$$W_x = 2I_x/V = 2 \times 34,47/10,0 = 6,894 \text{ см}^3 (86,18 \%);$$

– при $t_f/t_w = 2$ ($k = 3$)

$$t = A_{gr}/(9,94U) = 3,20/(9,94 \times 10,0) = 0,0321931 \approx 0,032 \text{ см};$$

$$kt = 3 \times 0,032 = 0,096 \text{ см};$$

$$A_g = 9,94 \times 0,032 \times 10,0 = 3,181 \text{ см}^2 (99,41 \%);$$

$$A = 9,14tU = 9,14 \times 0,032 \times 10,0 = 2,925 \text{ см}^2 \text{ (110,0 \%)};$$

$$I_x = 0,0024785A^3/t^2 = 0,0024785 \times 2,925^3/0,032^2 = 60,57 \text{ см}^4 \text{ (151,4 \%)};$$

$$I_y = 0,0008872A^3/t^2 = 0,0008872 \times 2,925^3/0,032^2 = 21,68 \text{ см}^4 \text{ (167,9 \%)};$$

$$W_x = 2I_x/V = 2 \times 60,57/10,0 = 12,114 \text{ см}^3 \text{ (151,4 \%)}.$$

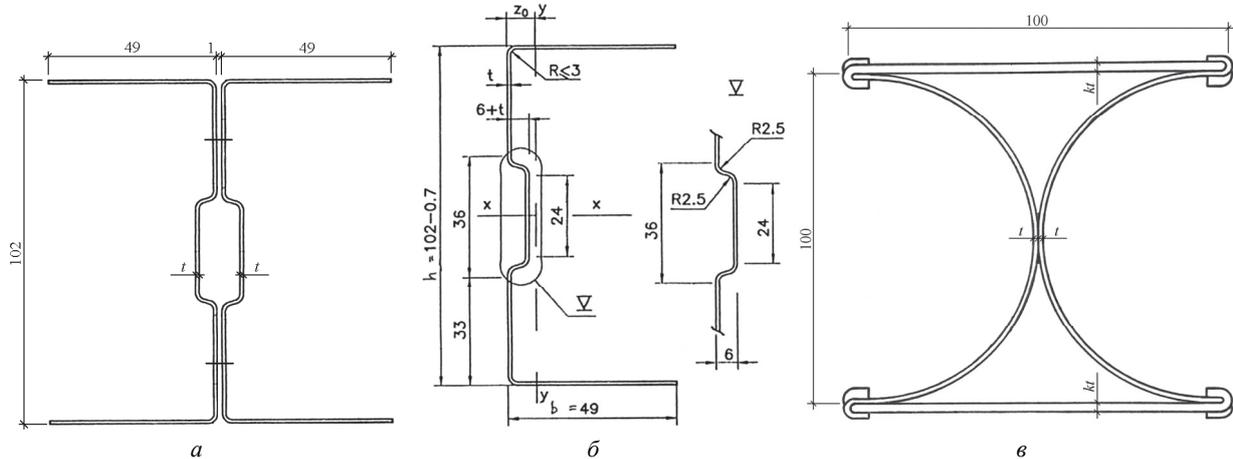


Рис. 10. Схемы тонкостенных профилей:

a – составного сечения двутавровой формы; *б* – швеллерного типа; *в* – двутаврового ГЗП

Figure 10. Schemes of bent profiles:

a – composite section of I-shaped; *б* – channel type; *в* – I-shaped BCP

Таблица 3

Расчетные параметры гнутых и гнutoзамкнутых профилей с равными параметрами ширины и высоты

| Профили | Характеристики сечений | | | | | |
|---|------------------------|---------------------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | $A, \text{ см}^2$ | $A_g, \text{ см}^2$ | A/A_g | $I_x, \text{ см}^4$ | $I_y, \text{ см}^4$ | $W_x, \text{ см}^3$ |
| [[102×99 (2ПГС100Ш) $t = 0,8 \text{ мм}$ | 2,66 100 % | 3,20 100 % | 0,831 | 40,0 100 % | 12,91 100 % | 8,0 100 % |
| ГЗП 100×100 $t = 0,5 \text{ мм}$ $kt = 0,5 \text{ мм}$ | 2,584 97,14 % | 2,970 92,81 % | 0,865 | 45,36 113,4 % | 17,49 135,5 % | 9,08 113,5 % |
| ГЗП 100×100 $t = 0,7 \text{ мм}$ $kt = 0,014 \text{ мм}$ | 2,478 93,16 % | 3,038 94,94 % | 0,816 | 34,47 86,18 % | 14,76 114,3 % | 6,894 86,18 % |
| ГЗП 100×100 $t = 0,32 \text{ мм}$ $kt = 0,96 \text{ мм}$ | 2,925 110,0 % | 3,181 99,41 % | 0,920 | 60,57 151,4 % | 21,68 167,9 % | 12,114 151,4 % |
| [[102×99 2ПГС100Ш $t = 0,9 \text{ мм}$ | 3,04 100 % | 3,60 100 % | 0,844 | 45,0 100 % | 14,54 100 % | 9,0 100 % |
| ГЗП 100×100 $t = 0,6 \text{ мм}$ $kt = 0,6 \text{ мм}$ | 3,101 102,0 % | 3,564 99,0 % | 0,865 | 54,44 121,0 % | 20,99 144,4 % | 10,89 121,0 % |
| ГЗП 100×100 $t = 0,8 \text{ мм}$ $kt = 0,016 \text{ мм}$ | 2,847 93,65 % | 3,472 96,44 % | 0,816 | 40,03 88,96 % | 17,13 117,8 % | 8,01 89,0 % |
| ГЗП 100×100 $t = 0,36 \text{ мм}$ $kt = 0,108 \text{ мм}$ | 3,292 108,3 % | 3,578 99,39 % | 0,920 | 68,23 151,6 % | 24,42 168,0 % | 13,65 151,7 % |

| Профили | Характеристики сечений | | | | | |
|--|------------------------|--------------------|---------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | $A, \text{см}^2$ | $A_g, \text{см}^2$ | A/A_g | $I_x, \text{см}^4$ | $I_y, \text{см}^4$ | $W_x, \text{см}^3$ |
| [[102×99 (2ПГС100Ш) $t = 1,0 \text{ мм}$ | 3,44 100 % | 4,0 100 % | 0,860 | 50,0 100 % | 16,22 100 % | 10,0 100 % |
| ГЗП 100×100 $t = 0,65 \text{ мм}$ $kt = 0,65 \text{ мм}$ | 3,359 97,65 % | 3,861 96,53 % | 0,865 | 58,95 117,9 % | 22,73 140,1 % | 11,79 117,9 % |
| ГЗП 100×100 $t = 0,9 \text{ мм}$ $kt = 0,018 \text{ мм}$ | 3,203 93,11 % | 3,906 97,65 % | 0,816 | 45,04 90,08 % | 19,28 118,9 % | 9,01 90,10 % |
| ГЗП 100×100 $t = 0,4 \text{ мм}$ $kt = 1,2 \text{ мм}$ | 3,658 106,3 % | 3,976 99,40 % | 0,920 | 75,82 151,6 % | 27,14 176,3 % | 15,16 151,6 % |

Table 3

Design parameters of bent and bent closed profiles with equal parameters of width and height

| Profiles | Cross section characteristics | | | | | |
|---|-------------------------------|--------------------|---------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | $A, \text{см}^2$ | $A_g, \text{см}^2$ | A/A_g | $I_x, \text{см}^4$ | $I_y, \text{см}^4$ | $W_x, \text{см}^3$ |
| [[102×99 (2ПГС100Ш) $t = 0,8 \text{ мм}$ | 2,66 100% | 3,20 100% | 0,831 | 40,0 100 % | 12,91 100% | 8,0 100% |
| BCP 100×100 $t = 0,5 \text{ мм}$ $kt = 0,5 \text{ мм}$ | 2,584 97,14% | 2,970 92,81% | 0,865 | 45,36 113,4% | 17,49 135,5% | 9,08 113,5% |
| BCP 100×100 $t = 0,7 \text{ мм}$ $kt = 0,014 \text{ мм}$ | 2,478 93,16% | 3,038 94,94% | 0,816 | 34,47 86,18% | 14,76 114,3% | 6,894 86,18% |
| BCP 100×100 $t = 0,32 \text{ мм}$ $kt = 0,96 \text{ мм}$ | 2,925 110,0% | 3,181 99,41% | 0,920 | 60,57 151,4% | 21,68 167,9% | 12,114 151,4% |
| [[102×99 2ПГС100Ш $t = 0,9 \text{ мм}$ | 3,04 100% | 3,60 100% | 0,844 | 45,0 100% | 14,54 100% | 9,0 100% |
| BCP 100×100 $t = 0,6 \text{ мм}$ $kt = 0,6 \text{ мм}$ | 3,101 102,0% | 3,564 99,0% | 0,865 | 54,44 121,0% | 20,99 144,4% | 10,89 121,0% |
| BCP 100×100 $t = 0,8 \text{ мм}$ $kt = 0,016 \text{ мм}$ | 2,847 93,65% | 3,472 96,44% | 0,816 | 40,03 88,96% | 17,13 117,8% | 8,01 89,0% |
| BCP 100×100 $t = 0,36 \text{ мм}$ $kt = 0,108 \text{ мм}$ | 3,292 108,3% | 3,578 99,39% | 0,920 | 68,23 151,6% | 24,42 168,0% | 13,65 151,7% |
| [[102×99 (2ПГС100Ш) $t = 1,0 \text{ мм}$ | 3,44 100% | 4,0 100% | 0,860 | 50,0 100% | 16,22 100% | 10,0 100% |
| BCP 100×100 $t = 0,65 \text{ мм}$ $kt = 0,65 \text{ мм}$ | 3,359 97,65% | 3,861 96,53% | 0,865 | 58,95 117,9% | 22,73 140,1% | 11,79 117,9% |
| BCP 100×100 $t = 0,9 \text{ мм}$ $kt = 0,018 \text{ мм}$ | 3,203 93,11% | 3,906 97,65% | 0,816 | 45,04 90,08% | 19,28 118,9% | 9,01 90,10% |
| BCP 100×100 $t = 0,4 \text{ мм}$ $kt = 1,2 \text{ мм}$ | 3,658 106,3% | 3,976 99,40% | 0,920 | 75,82 151,6% | 27,14 176,3% | 15,16 151,6% |

Продолженный расчет показывает, что при еще одной замене профиля базового объекта на двутавровый ГЗП расход конструкционного материала уменьшается, а геометрические (статические) характеристики расчетного сечения увеличиваются. Исключением является профиль с условной толщиной полок, меньшей условной толщины стенки ($t_f/t_w = 0,6$), у которого эти характеристики в плоскости максимальной жесткости ниже, чем у профиля базового объекта. Практический интерес представляют расчетные выкладки, где для базового объекта приняты две менее тонкостенные пары ПГС100Ш сечениями $102 \times 49 \times 0,9$ мм и $102 \times 49 \times 1,0$ мм [34; 38], а основные результаты сведены в табл. 3.

Как видно, расчетный переход от составных двутавров из гнутых профилей швеллерного типа к двутавровым ГЗП сопровождается с одной стороны уменьшением расхода конструкционного материала, а с другой стороны увеличением геометрических (статических) характеристик, и как следствие, ростом несущей способности. Снижением несущей способности в плоскости конструкции отличаются только двутавровые ГЗП с условной толщиной полок, меньшей условной толщины стенки ($t_f/t_w = 0,6$). Выявленное снижение рационально компенсировать за счет использования в листовых заготовках повышенной тонкостенности более прочного конструкционного материала. В целом же полученные результаты можно принять в качестве достаточно корректного обоснования перспективности предлагаемых профилей для их дальнейшей проработки, оптимизации и применения в строительных конструкциях.

Реализация двутавровых ГЗП с разными параметрами ширины и высоты

Еще один пример реализации предлагаемого технического решения можно привести, если продолжить расчетные выкладки двутаврового ГЗП с $n = U/V = 1/5,2$ (оптимальной компоновки) и трубчатymi полками из листового проката одной толщины ($t_f/t_w = 1$) [35], дополнив их такими же выкладками с листовыми заготовками разных толщин (рис. 11):

– при $t_f/t_w = 0,6$ ($k = 0,2$)

$$n = U/V = 0,3013557 = 1/3,3183377 \approx 1/3,3; V = 30,0 \text{ см (100 \%);}$$

$$U = nV = 0,3013557 \times 30,0 = 9,040671 \approx 9,04 \text{ см (56,50 \%);}$$

$$t = A_{gr}/(8,9766755U) = 20,03/(8,9766755 \times 9,04) = 0,2468294 \approx 0,246 \text{ см;}$$

$$kt = 0,2 \times 0,246 = 0,0492 \text{ см;}$$

$$A_g = 8,9766755 \times 0,246 \times 9,04 = 19,96 \text{ см}^2 \text{ (99,65 \%);}$$

$$A = 8,1766755tU = 8,1766755 \times 0,246 \times 9,04 = 18,18 \text{ см}^2 \text{ (156,3 \%);}$$

$$I_x = 0,0185079A^3/t^2 = 0,0185079 \times 18,18^3/0,246^2 = 452,07 \text{ см}^4 \text{ (60,02 \%);}$$

$$I_y = 0,0003856A^3/t^2 = 0,0003856 \times 18,18^3/0,246^2 = 38,287 \text{ см}^4 \text{ (26,70 \%);}$$

$$W_x = 2I_x/V = 2 \times 452,07/30,0 = 30,138 \text{ см}^3 \text{ (92,17 \%);}$$

– при $t_f/t_w = 2$ ($k = 3$)

$$n = U/V = 0,0914105 = 1/10,939662 \approx 1/11; V = 30,0 \text{ см (100 \%);}$$

$$U = nV = 0,0914105 \times 30,0 = 2,742315 \approx 2,74 \text{ см (17,13 \%);}$$

$$t = A_g / (29,819324U) = 20,03 / (29,819324 \times 2,74) = 0,2451503 \approx 0,245 \text{ см};$$

$$kt = 3 \times 0,245 = 0,735 \text{ см};$$

$$A_g = 29,819324 \times 0,245 \times 2,74 = 20,018 \text{ см}^2 (99,94 \%);$$

$$A = 29,019324tU = 29,019324 \times 0,245 \times 2,74 = 19,597 \text{ см}^2 (168,5 \%);$$

$$I_x = 0,0176393A^3/t^2 = 0,0176393 \times 19,597^3/0,245^2 = 2211,7 \text{ см}^4 (293,6 \%);$$

$$I_y = 0,0001165A^3/t^2 = 0,0001165 \times 19,597^3/0,245^2 = 14,607 \text{ см}^4 (10,18 \%);$$

$$W_x = 2I_x/V = 2 \times 2211,7/30,0 = 147,4 \text{ см}^3 (450,8 \%),$$

где в качестве эталонных (100-процентных) значений приняты расчетные параметры двутаврового профиля базового объекта (табл. 4), скомпонованного из парных сигма-профилей (Σ -образной формы) сечением $300 \times 161 \times 2,0$ мм [35; 39].

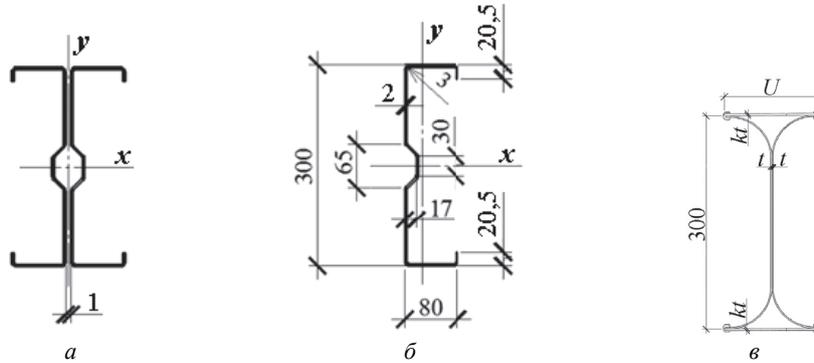


Рис. 11. Схемы тонкостенных профилей:
 а – составного сечения двутавровой формы; б – Σ -образного типа; в – двутаврового ГЗП
Figure 11. Schemes of bent profiles:
 а – composite section of I-shaped; б – channel type; в – I-shaped BCP

Таблица 4

Расчетные параметры гнутых и гнutoзамкнутых профилей с разными параметрами ширины и высоты

| Профили | Характеристики | | | | | |
|--|-------------------|---------------------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | $A, \text{ см}^2$ | $A_g, \text{ см}^2$ | A/A_g | $I_x, \text{ см}^4$ | $I_y, \text{ см}^4$ | $W_x, \text{ см}^3$ |
| [[300×161 (2Σ 300×80) $t = 2,0$ мм | 11,63 100 % | 20,03 100 % | 0,581 | 753,25 100 % | 143,42 100 % | 32,70 100 % |
| ГЗП 300×57,5 $t = 2,4$ мм $kt = 2,4$ мм | 18,74 161,1 % | 19,84 99,06 % | 0,945 | 2041,14 271,0 % | 15,676 10,93 % | 136,076 416,1 % |
| ГЗП 300×90,4 $t = 2,46$ мм $kt = 0,492$ мм | 18,18 156,3 % | 19,96 99,65 % | 0,911 | 452,07 60,02 % | 38,287 26,70 % | 30,138 92,17 % |
| ГЗП 300×27,4 $t = 2,45$ мм $kt = 7,35$ мм | 19,597 168,5 % | 20,018 99,94 % | 0,979 | 2211,7 293,6 % | 14,607 10,18 % | 147,4 450,8 % |
| ГЗП 300×106 $t = 1,96$ мм $kt = 1,96$ мм | 18,324 157,6 % | 19,987 99,79 % | 0,917 | 2325,36 308,7 % | 80,334 56,01 % | 155,02 474,1 % |

| Профили | Характеристики | | | | | |
|---|-------------------|--------------------|---------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | $A, \text{см}^2$ | $A_g, \text{см}^2$ | A/A_g | $I_x, \text{см}^4$ | $I_y, \text{см}^4$ | $W_x, \text{см}^3$ |
| ГЗП 300×106 $t = 2,35 \text{ мм}$ $kt = 0,470 \text{ мм}$ | 17,985 154,6 % | 19,978 99,74 % | 0,9002 | 1885,07 250,3 % | 59,007 41,14 % | 125,67 384,3 % |
| ГЗП 300×106 $t = 1,38 \text{ мм}$ $kt = 4,140 \text{ мм}$ | 18,753 161,2 % | 19,923 99,47 % | 0,941 | 2962,91 393,3 % | 111,35 77,64 % | 197,5 604,1 % |
| ГЗП 300×161 $t = 1,62 \text{ мм}$ $kt = 1,62 \text{ мм}$ | 17,910 154,0 % | 19,996 99,83 % | 0,896 | 2490,86 330,7 % | 232,66 162,2 % | 166,06 507,9 % |
| ГЗП 300×161 $t = 2,05 \text{ мм}$ $kt = 0,410 \text{ мм}$ | 17,383 149,5 % | 20,023 99,97 % | 0,868 | 1963,84 260,7 % | 180,36 125,8 % | 130,92 400,4 % |
| ГЗП 300×161 $t = 1,06 \text{ мм}$ $kt = 3,18 \text{ мм}$ | 18,545 159,5 % | 19,910 99,40 % | 0,931 | 3135,90 416,3 | 299,7 208,9 % | 209,1 639,3 % |

Table 4

Design parameters of bent and bent closed profiles with different parameters of width and height

| Profiles | Cross section characteristics | | | | | |
|--|-------------------------------|--------------------|---------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | $A, \text{см}^2$ | $A_g, \text{см}^2$ | A/A_g | $I_x, \text{см}^4$ | $I_y, \text{см}^4$ | $W_x, \text{см}^3$ |
| [[300×161 (2Σ 300×80) $t = 2,0 \text{ мм}$ | 11,63 100% | 20,03 100% | 0,581 | 753,25 100% | 143,42 100% | 32,70 100% |
| BCP 300×57,5 $t = 2,4 \text{ мм}$ $kt = 2,4 \text{ мм}$ | 18,74 161,1% | 19,84 99,06% | 0,945 | 2041,14 271,0% | 15,676 10,93% | 136,076 416,1% |
| BCP 300×90,4 $t = 2,46 \text{ мм}$ $kt = 0,492 \text{ мм}$ | 18,18 156,3% | 19,96 99,65% | 0,911 | 452,07 60,02% | 38,287 26,70% | 30,138 92,17% |
| BCP 300×27,4 $t = 2,45 \text{ мм}$ $kt = 7,35 \text{ мм}$ | 19,597 168,5% | 20,018 99,94% | 0,979 | 2211,7 293,6% | 14,607 10,18% | 147,4 450,8% |
| BCP 300×106 $t = 1,96 \text{ мм}$ $kt = 1,96 \text{ мм}$ | 18,324 157,6% | 19,987 99,79% | 0,917 | 2325,36 308,7% | 80,334 56,01% | 155,02 474,1% |
| BCP 300×106 $t = 2,35 \text{ мм}$ $kt = 0,470 \text{ мм}$ | 17,985 154,6% | 19,978 99,74% | 0,9002 | 1885,07 250,3% | 59,007 41,14% | 125,67 384,3% |
| BCP 300×106 $t = 1,38 \text{ мм}$ $kt = 4,140 \text{ мм}$ | 18,753 161,2% | 19,923 99,47% | 0,941 | 2962,91 393,3% | 111,35 77,64% | 197,5 604,1% |
| BCP 300×161 $t = 1,62 \text{ мм}$ $kt = 1,62 \text{ мм}$ | 17,910 154,0% | 19,996 99,83% | 0,896 | 2490,86 330,7% | 232,66 162,2% | 166,06 507,9% |
| BCP 300×161 $t = 2,05 \text{ мм}$ $kt = 0,410 \text{ мм}$ | 17,383 149,5% | 20,023 99,97% | 0,868 | 1963,84 260,7% | 180,36 125,8% | 130,92 400,4% |
| BCP 300×161 $t = 1,06 \text{ мм}$ $kt = 3,18 \text{ мм}$ | 18,545 159,5% | 19,910 99,40% | 0,931 | 3135,90 416,3 | 299,7 208,9% | 209,1 639,3% |

Как видно, расход конструкционного материала уменьшается, а геометрические (статические) характеристики расчетного сечения нетто увеличиваются в плоскости максимальной жесткости и уменьшаются в плоскости минимальной жесткости соразмерно сужению ширины трубчатых полок двутаврового ГЗП оптимальной компоновки при неизменной высоте ($V = \text{const}$). Продолжить оптимизационный

расчет можно применительно к двутавровым ГЗП с $n = U/V = 1/2,84$ и трубчатыми полками из унифицированных заготовок с размерами, оптимальными для швеллерных ГЗП. Очевидно, что полученные результаты аналогичны предыдущим (табл. 4), однако степень снижения расчетных характеристик в плоскости минимальной жесткости уменьшилась из-за расширения трубчатых полок двутаврового ГЗП унифицированной компоновки при неизменной высоте ($V = \text{const}$). Завершить расчетные выкладки целесообразно для двутавровых ГЗП с теми же размерами ширины и высоты, что и у профиля базового объекта ($U = \text{const}$ и $V = \text{const}$). На этот раз материалоемкость двутавровых ГЗП также уменьшается, а геометрические (статические) характеристики их расчетных сечений нетто увеличиваются как в плоскости максимальной жесткости, так и минимальной.

Заключение

Расчетные параметры двутавровых ГЗП с трубчатыми полками из листового проката разных толщин и основные результаты их оптимизации более наглядны на графиках в зависимости от отношения толщин их полок и стенки (рис. 12), где обозначения с единицей в индексе относятся к параметрам гнутозамкнутых двутавров, имеющих одинаковые размеры ширины и высоты: $n = U/V = 1/1$. По оси ординат для единиц измерений использованы обозначения площади сечения и толщины листовой полосы, подлежащей зигзагообразному резу на четыре заготовки: $A = \text{const}$, $t = \text{const}$.

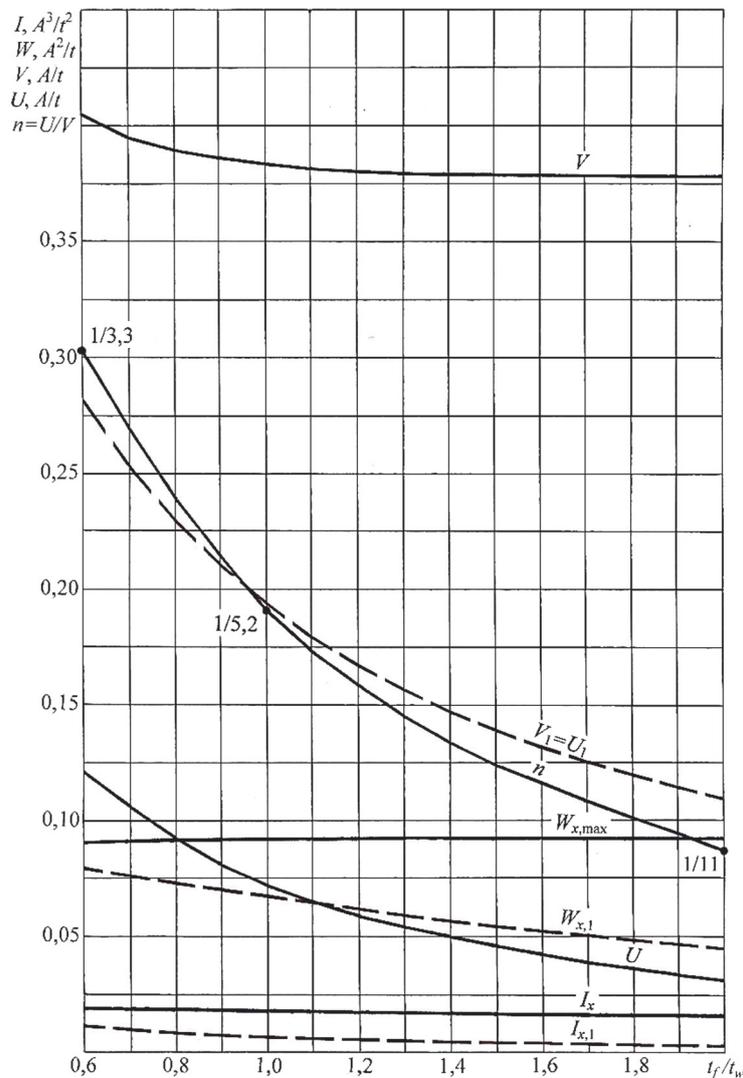


Рис. 12. Графики расчетных параметров двутавровых ГЗП в зависимости от отношения толщин их полок и стенки
Figure 12. Graphs of the design parameters of I-shaped BCP in depending on the ratio of the thicknesses of their shelves and wall

Итоговые графики позволяют сделать некоторые выводы и обобщения.

1. Двутавровый ГЗП с двойной стенкой и двумя трубчатыми полками из листовых заготовок разных толщин имеет составное сечение, момент сопротивления которого максимален при отношении размеров ширины и высоты, изменяемом в зависимости от изменения отношения толщин его полок и стенки. В частности, когда толщина полок в 2 раза больше толщины стенки, момент сопротивления максимален при отношении размеров ширины и высоты 1/11 по средней линии расчетного сечения, а когда толщина полок составляет 0,6 толщины стенки, момент сопротивления максимален при отношении размеров ширины и высоты 1/3,3 по средней линии расчетного сечения.

2. Если отношение размеров ширины и высоты двутаврового ГЗП составляет 1/1 по средней линии расчетного сечения, внутренние грани его стенки и полки имеют в разрезе форму круглого полукольца. Размерные параметры такого профиля обладают фиксированными значениями, при которых ширина равна радиусу, высота – диаметру полукольцевой грани, а абсолютные значения этих параметров зависят от отношения толщин его полок и стенки. Если развить профиль в ширину при постоянной высоте, равной диаметру, то его двутавровое очертание трансформируется в Н-образное. В случае развития профиля по высоте при постоянной ширине, равной радиусу, увеличивается его сходство с прокатными и сварными двутаврами.

3. При отношениях размеров ширины и высоты двутавровых ГЗП в пределах от 1/2,68 до 1/3 их составные сечения можно компоновать с использованием унифицированных заготовок, заимствованных у швеллерных ГЗП, оптимизированных на изгиб. Расчетные параметры таких двутавровых профилей приближены к оптимальным параметрам наиболее грузоподъемных прокатных двутавров балочного типа.

4. Двутавровые ГЗП с трубчатыми полками из листового проката равной и разных толщин по новому техническому решению достаточно рациональны и эффективны. Их можно считать вполне пригодными для использования в легких тонкостенных конструкциях зданий и сооружений. В частности, прослеживается определенная перспективность их дальнейших проработок применительно к стержням и балкам с перфорированными стенками, включая профили с плоскопараллельными полками.

Список литературы

1. Ляхович Л.С., Акимов П.А., Тухфатуллин Б.А. Об одной задаче оптимизации конструкций с учетом требований устойчивости, прочности, при ограничениях первой частоты собственных колебаний // *Academia. Архитектура и строительство*. 2020. № 4. С. 76–82. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2020-4-76-82>
2. Ляхович Л.С., Акимов П.А., Тухфатуллин Б.А. Оценка близости к проекту минимальной материалоемкости решения об оптимизации ширины кусочно-постоянных участков полки стержней двутаврового поперечного сечения при ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний // *Вестник ТГАСУ*. 2020. Т. 22. № 4. С. 114–125. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-4-114-125>
3. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Assessment of the proximity of design to minimum material capacity solution of problem of optimization of the flange width of I-shaped cross-section rods with allowance for stability constraints or constraints for the value of the natural frequency and strength requirements // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2020. Vol. 16. No 2. Pp. 71–82. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2020-16-2-71-82>
4. Перельмутер А.В. *Очерки по истории металлических конструкций*. М.: СКАД Софт; Изд-во АСВ, 2015. С. 28–42.
5. Перельмутер А.В. Конструктивная форма номер один // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2012. № 1. С. 27–39.
6. Кузнецов Д.Н., Сазыкин В.Г. Напряженно-деформированное состояние стального двутавра в составе комбинированной балки: в 3 ч. Ч. 1 // *Известия вузов. Строительство*. 2019. № 11. С. 5–16.
7. Кузнецов Д.Н., Сазыкин В.Г. Напряженно-деформированное состояние стального двутавра в составе комбинированной балки: в 3 ч. Ч. 2 // *Известия вузов. Строительство*. 2019. № 12. С. 13–23.
8. Кузнецов Д.Н., Сазыкин В.Г. Напряженно-деформированное состояние стального двутавра в составе комбинированной балки: в 3 ч. Ч. 3 // *Известия вузов. Строительство*. 2020. № 1. С. 18–33.
9. Туснин А.Р., Абдурахмонов А.Х. Несущая способность центрально-сжатого двутаврового стержня при стесненном кручении // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 9. С. 21–27. <https://doi.org/10.33622/7019.2020.09.21-27>
10. Абдурахмонов А.Х. Численный анализ устойчивости центрально-сжатого двутаврового стержня при стесненном кручении // *Строительство: наука и образование*. 2020. Т. 10. Вып. 4. Ст. 2. С. 11–27. <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2020.4.2>
11. Гарькин И.Н., Лаптанкин А.С. Циклические испытания подкрановых балок на выносливость // *Региональная архитектура и строительство*. 2020. № 3. С. 68–77.

12. Патент РФ № 2739271. Битрубобетонная балка // Д.И. Парышев, А.В. Ильтяков, В.И. Копырин, О.Ю. Моисеев, Ю.А. Агафонов, И.Г. Овчинников, В.М. Шеренков, И.И. Овчинников, В.В. Харин, Д.А. Харин, В.В. Воронкин, И.П. Попов. 2020. Бюл. № 36. URL: <http://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/739/271/%D0%98%D0%97-02739271-00001/DOCUMENT.PDF> (дата обращения 02.02.2021).
13. Белов Г.И. Развитие методов расчета стержневых элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 3. С. 43–54. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-3-43-54>
14. Белов Г.И. Аналитически-численный метод расчета на устойчивость стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4. С. 39–46. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-4-39-46>
15. Косенков В.В., Шуринов А.В. Уточнение методов расчета конструкций из стальных тонкостенных холодногнутой профилей // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 10. С. 65–76. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.10.65-76>
16. Fan S., Chen M., Li S., Ding Z., Shu G., Zheng B. Stainless steel lipped C-section beams: numerical modelling and development of design rules // Journal of Constructional Steel Research. 2019. No 152. Pp. 29–41.
17. 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.
18. Lawson R.M., Bastab A. Deflection of C-section beams with circular web openings // Thin-Walled Structures. 2019. No 134 Pp. 277–290.
19. Chen W., Ye J., Zhao Q., Jiang J. Full-scale experiments of gypsum-sheathed cavity-insulated cold formed steel walls under different fire conditions // Journal of Constructional Steel Research. 2020. No 164. 105809.
20. Li Z., Li T., Xiao Y. Connections used for cold-formed steel frame shear walls sheathed with engineered bamboo panels // Journal of Constructional Steel Research. 2020. No 164. 105787.
21. Назмеева Т.В., Сивохин А.Д. Напряженно-деформированное состояние узла крепления каркасно-обшивной навесной стены на основе стального холодногнутого профиля // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 10. С. 41–45.
22. Солодов Н.В., Водяхин Н.В., Ищук Я.Л. Повышение несущей способности нахлесточного соединения тонколистовых деталей // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 30–37. https://doi.org/10.34031/article_5da44cc0ad5700.29474015
23. Широков В.С., Соловьёв А.В., Иголкин С.А. Испытание соединения на вытяжных заклепках с пуклевкой // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10. № 3. С. 21–25. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2020.03.4>
24. Li Z., Li T., Xiao Y. Connections used for cold-formed steel frame shear walls sheathed with engineered bamboo panels // Journal of Constructional Steel Research. 2020. No 164. 105787.
25. Тонакян М.М. Исследование факторов негеометрического характера, влияющих на изготовление и монтаж стальных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5 (82). С. 141–146. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-5-141-146>
26. Оносов Г.В., Силина Н.Г. Коррозионная стойкость стального тонколистового оцинкованного проката // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 10. С. 4–8.
27. United States Patent No 6131362. Sheet metal beam / Robert V. Buecker. 2000, Oct. 17.
28. Патент РФ № 2043467. Сборно-разборная двутавровая балка М.Е. Докторов с полыми полками / М.Е. Докторов. 1995. Бюл. № 24. URL: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2043467&TypeFile=html (дата обращения: 02.02.2021).
29. Патент РФ № 185608. Сталебетонная составная балка / Ф.С. Замалиев, Э.Ф. Замалиев, Э.Г. Биккинин, Б.Т. Исмагилов, А.И. Гайнутдинов. 2018. Бюл. № 35. URL: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2685013&TypeFile=html (дата обращения: 02.02.2021).
30. 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.
31. Патент РФ № 2478764. Гнутый стальной профиль и составной строительный элемент на его основе / Л.В. Енджиевский, А.В. Тарасов, И.В. Тарасов. 2013. Бюл. № 10. URL: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2478764&TypeFile=html (дата обращения: 02.02.2021).
32. Енджиевский Л.В., Тарасов А.В. Численные и экспериментальные исследования рамы каркаса здания из тонколистовой стали // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 10. С. 52–54.
33. Марутян А.С. Гнутозамкнутые профили и расчет их оптимальных параметров // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 1. С. 33–43. <https://doi.org/10.22363-1815-5235-2019-15-1-33-43>
34. Марутян А.С. Сравнительный расчет оптимальных параметров швеллерных гнутых и гнутозамкнутых профилей // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 6. С. 415–432. <https://doi.org/10.22363-1815-5235-2019-15-6-415-432>
35. Марутян А.С. Двутавровые гнутозамкнутые профили с трубчатыми полками и расчет оптимальной компоновки их составных сечений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 5. С. 334–350. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-5-334-350>

36. Каплун Я.А. Стальные конструкции из широкополочных двутавров и тавров / под ред. Н.П. Мельникова. М.: Стройиздат, 1981. С. 10–12.
37. Мельников Н.П. Металлические конструкции. Современное состояние и перспективы развития. М.: Стройиздат, 1983. С. 82.
38. Рекомендации по проектированию, изготовлению монтажу ограждающих и несущих конструкций из стальных гнутых профилей повышенной жесткости. М.: ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова, 1999. С. 8–11.
39. Корсун Н.Д., Простакишина Д.А. Анализ НДС составного сечения из тонкостенных профилей с учетом начальных геометрических несовершенств // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2018. № 4. С. 83–88.

References

1. Lyahovich L.S., Akimov P.A., Tuhfatullin B.A. On one problem of optimization of structures, taking into account the requirements of stability, strength, with restrictions on the first frequency of natural vibrations. *Academia. Architecture and construction*. 2020;(4):76–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2020-4-76-82>
2. Lyahovich L.S., Akimov P.A., Tuhfatullin B.A. Estimation of the proximity to the project of the minimum material consumption of the decision on the optimization of the width of piecewise-constant sections of the flange of the I-beam cross-section under stability constraints or by the value of the first natural vibration frequency. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of Construction and Architecture*. 2020;22(4):114–125. (In Russ.) <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-4-114-125>
3. Lyahovich L.S., Akimov P.A., Tuhfatullin B.A. Assessment of the proximity of design to minimum material capacity solution of problem of optimization of the flange width of I-shaped cross-section rods with allowance for stability constraints or constraints for the value of the national frequency and strength requirements. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2020;16(2):71–82. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2020-16-2-71-82>
4. Perelmuter A.V. *Essays on the history of metal structures*. Moscow: SKAD Soft Publ.; Publishing House ASV; 2015. p. 28–42. (In Russ.)
5. Perelmuter A.V. Constructive form number one. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2012;(1):27–39. (In Russ.)
6. Kuznecov D.N., Sazykin V.G. Stress-strain state of a steel I-beam as part of a combined beam (part 1). *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2019;(11):5–16. (In Russ.)
7. Kuznecov D.N., Sazykin V.G. Stress-strain state of a steel I-beam as part of a combined beam (part 2). *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2019;(12):13–23. (In Russ.)
8. Kuznecov D.N., Sazykin V.G. Stress-strain state of a steel I-beam as part of a combined beam (part 3). *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020;(1):18–33. (In Russ.)
9. Tusnin A.R., Abdurahmonov A.H. Bearing capacity of a centrally compressed I-beam in constrained torsion. *Industrial and Civil Engineering*. 2020;(9):21–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.33622/-7019.2020.09.21-27>
10. Abdurahmonov A.H. Numerical analysis of stability of a centrally compressed I-beam under constrained torsion. *Construction: Science And Education*. 2020;10(4):11–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2020.4.2>
11. Garkin I.N., Lashtankin A.S. Numerical analysis of stability of a centrally compressed I-beam under constrained torsion. *Regional Architecture and Engineering*. 2020;(3):68–77. (In Russ.)
12. Paryshev D.I., Iltyakov A.V., Kopyrin V.I., Moiseev O.Y., Agafonov Y.A., Ovchinnikov I.G., Sherenkov V.M., Ovchinnikov I.I., Harin V.V., Harin D.A., Voronkin V.V., Popov I.P. *Bituminous concrete beam*. Russian Federation patent No. 2739271. Bulletin No 36. (In Russ.) Available from: <https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/739/271/%D0%98%D0%97-02739271-00001/DOCUMENT.PDF> (accessed 02.02.2021).
13. Belov G.I. Development of methods for calculating bar elements of steel structures under multi-parameter loading. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020;(3):43–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-3-43-54>
14. Belov G.I. An analytical-numerical method for calculating the stability of rod elements of light steel thin-walled structures. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020;(4):39–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-4-39-46>
15. Kosenkov V.V., Shurinov A.V. Refinement of methods for calculating structures from steel thin-walled cold-formed sections. *Industrial and Civil Engineering*. 2020;(10):65–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.10.65-76>
16. Fan S., Chen M., Li S., Ding Z., Shu G., Zheng B. Stainless steel lipped C-section beams: numerical modelling and development of design rules. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019;(152):29–41.
17. Ye J., Hajirasouliha I., Becque J., Pilakoutas K. Development of more efficient cold-formed steel channel sections in bending. *Thin-Walled Structures*. 2016;(101):1–13.
18. Lawsons R.M., Bastab A. Deflection of C-section beams with circular web openings. *Thin-Walled Structures*. 2019;(134):277–290.
19. Chen W., Ye J., Zhao Q., Jiang J. Full-scale experiments of gypsum-sheathed cavity-insulated cold formed steel walls under different fire conditions. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020;(164):105809.
20. Li Z., Li T., Xiao Y. Connections used for cold-formed steel frame shear walls sheathed with engineered bamboo panels. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020;(164):105787.

21. Nazmeeva T.V., Sivohin A.D. Refinement of methods for calculating structures from steel thin-walled cold-formed sections. *Industrial and Civil Engineering*. 2018;(10):41–45. (In Russ.)
22. Solodov N.V., Vodyahin N.V., Ishchuk Ya.L. Increasing the bearing capacity of the overlap connection of thin sheet parts. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2019;(9):30–37. (In Russ.) https://doi.org/10.34031/article_5da44cc0ad5700.29474015
23. Shirokov V.S., Solovov A.V., Igolkin S.A. Testing of the joints on pop rivets with bulge. *Urban Construction and Architecture*. 2020;10(3):21–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2020.03.4>
24. Li Z., Li T., Xiao Y. Connections used for cold-formed steel frame shear walls sheathed with engineered bamboo panels. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020;(164):105787.
25. Tonakanyan M.M. Investigation of non-geometric factors affecting the manufacture and installation of steel structures. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020;5(82):141–146. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-5-141-146>
26. Onosov G.V., Silina N.G. Corrosion resistance of galvanized sheet steel. *Industrial and Civil Engineering*. 2020;(10):4–8. (In Russ.)
27. Buecker R.V. *Sheet metal beam*. United States Patent No 6131362. 2000, Oct. 17.
28. Doktorov M.E. *Collapsible I-beam M.E. Doktorova with hollow shelves*. Russian Federation patent No 2043467. 1995. Bulletin No 24. (In Russ.) Available from: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2043467&&TypeFile=html (accessed: 02.02.2021).
29. Zamaliev F.S., Zamaliev E.F., Bikinin E.G., Ismagilov B.T., Gajnutdinov A.I. *Steel concrete composite beam*. Russian Federation patent No 185608. 2018. Bulletin No 35. (In Russ.) Available from: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2685013&TypeFile=html (accessed: 02.02.2021).
30. Kuznecov I.L., Fahrutdinov A.F., Ramazanov R.R. Results of experimental studies of the shear performance of joints of thin-walled elements. *Vestnik MGSU*. 2016;(12):34–43. (In Russ.)
31. Endzhievskij L.V., Tarasov A.V., Tarasov I.V. *Curved steel profile folded steel profile and a composite building element based on it*. Russian Federation patent No 2478764. 2013. Bulletin No 10. (In Russ.) Available from: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2478764&TypeFile=html (accessed: 02.02.2021).
32. Endzhievskij L.V., Tarasov A.V. Numerical and experimental studies of the frame of the building frame made of sheet steel. *Industrial and Civil Engineering*. 2012;(10):52–54. (In Russ.)
33. Marutyan A.S. Bent profiles and calculation of their optimal parameters. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Building*. 2019;15(10):33–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363-1815-5235-2019-15-1-33-43>
34. Marutyan A.S. Comparative calculation of the optimal parameters of bent and bent-closed channels. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019;15(6):415–432. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363-1815-5235-2019-15-6-415-432>
35. Marutyan A.S. I-beams bent-closed profiles with tubular shelves and calculation of the optimal arrangement of their composite sections. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(5):334–350. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-5-334-350>
36. Kaplun Y.A. *Steel structures from wide-flange I-beams and T-beams*. Moscow: Strojizdat Publ.; 1981. p. 10–12. (In Russ.)
37. Melnikov N.P. *Metal constructions. Current state and development prospects*. Moscow: Strojizdat Publ.; 1983. p. 82.
38. *Recommendations for the design, manufacture of installation of enclosing and supporting structures from steel bent profiles of increased rigidity*. Moscow: CNIIPSK imeni N.P. Melnikova Publ.; 1999. p. 8–11. (In Russ.)
39. Korsun N.D., Prostakishina D.A. Analysis of the stress-strain state of a composite section made of thin-walled profiles taking into account the initial geometric imperfections. *Akademicheskij vestnik UralNIIProekt RAASN*. 2018;(4):83–88. (In Russ.)