



DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-2-111-139  
 УДК 624.072.2.014

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

## Оптимизация швеллерных и двутавровых гнутозамкнутых профилей с перфорированными стенками

А.С. Марутян 

Пятигорский институт (филиал) Северо-Кавказского федерального университета, Пятигорск, Российская Федерация  
 ✉ al\_marut@mail.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 20 октября 2021 г.  
 Доработана: 20 февраля 2022 г.  
 Принята к публикации: 28 февраля 2022 г.

### Для цитирования

Марутян А.С. Оптимизация швеллерных и двутавровых гнутозамкнутых профилей с перфорированными стенками // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 2. С. 111–139. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-2-111-139>

**Аннотация.** В представленном исследовании продолжается оптимизация швеллерных и двутавровых гнутозамкнутых профилей (ГЗП) с трубчатými полками и перфорированными стенками из листового проката как равных, так и разных толщин. Такие профили предназначены для легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК), отличающихся улучшенными технико-экономическими показателями и массовым спросом в промышленно-гражданском строительстве, что подтверждает актуальность их дальнейшей проработки. 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, включая их перфорирование. Посредством опытно-конструкторских проработок, решения оптимизационных задач и вариантного проектирования ГЗП уточнены их расчетные сечения с максимальным запасом прочности на изгиб при минимальной массе. Оригинальность технических решений подтверждена патентной экспертизой. Швеллерный ГЗП обладает экстремальными массой и прочностью при относительной высоте вырезов в стенке  $1/1,87$  и отношении размеров ширины и высоты  $1/4,32$ . Когда толщина полок в 2 раза больше толщины стенки, прочность и масса двутаврового ГЗП экстремальны при относительной высоте вырезов  $1/1,23$  и отношении размеров  $1/4,17$ , а когда толщина полок составляет 0,6 толщины стенки, прочность и масса ГЗП экстремальны при высоте вырезов  $1/1,73$  и отношении размеров  $1/5,22$ . Если толщины полок и стенки равны, то прочность и масса ГЗП экстремальна при высоте вырезов  $1/1,46$  и отношении размеров  $1/3,17$ .

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

Марутян Александр Суменович, кандидат технических наук, доцент, преподаватель, ведущий научный сотрудник, Пятигорский институт (филиал) Северо-Кавказского федерального университета, Российская Федерация, 357500, Пятигорск, пр-кт 40 лет Октября, д. 56; ORCID: 0000-0001-5464-5929, Scopus Author ID: 57194604628, eLIBRARY SPIN-код: 8528-9956; al\_marut@mail.ru

© Марутян А.С., 2022



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

# Optimization of channels and I-shaped bended closed profiles with perforated walls

Alexander S. Marutyan 

Pyatigorsk Institute (branch) of the North Caucasus Federal University, Pyatigorsk, Russian Federation

✉ al\_marut@mail.ru

## Article history

Received: October 20, 2021

Revised: February 20, 2022

Accepted: February 28, 2022

**Abstract.** The article presents a continuation of the optimization of channel and I-shaped bended closed profiles (BCP) with tubular flanges and perforated walls made of rolled sheet products of both equal and different thicknesses. Such profiles are designed for light steel thin-walled structures (LSWS), which are distinguished by improved technical and economic indicators and mass demand in industrial and civil construction, which confirms the relevance of their further development. The purpose of the study is to show that the characteristics of LSWS can be further improved by shaping profiles, combining straight and round outlines of closed and open contours in a composite section, including their perforation. Through experimental design studies, solving optimization problems and variant design of the BCP, their design sections with a maximum margin of bending strength with a minimum mass have been refined. The originality of technical solutions is confirmed by patent examination. The channel BCP has extreme weight and strength with a relative height of cutouts in the wall of 1/1.87 and a ratio of width and height dimensions of 1/4.32. When the thickness of the shelves is 2 times the wall thickness, the strength and mass of the I-shaped BCP are extreme at a relative height of cutouts of 1/1.23 and a ratio of dimensions of 1/4.17, and when the thickness of the shelves is 0.6 of the wall thickness, the strength and mass of the BCP are extreme with a cutout height of 1/1.73 and a size ratio of 1/5.22. If the thicknesses of the shelves and the wall are equal, then the strength and mass of the BCP is extreme at a cutout height of 1/1.46 and a size ratio of 1/3.17.

**Keywords:** rod structures, thin-walled structures, bent-closed profiles, perforated walls, toothed fasteners, optimization of cross sections, calculation of optimal parameters

## For citation

Marutyan A.S. Optimization of channels and I-shaped bended closed profiles with perforated walls. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(2):111–139. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-2-111-139>

## Введение

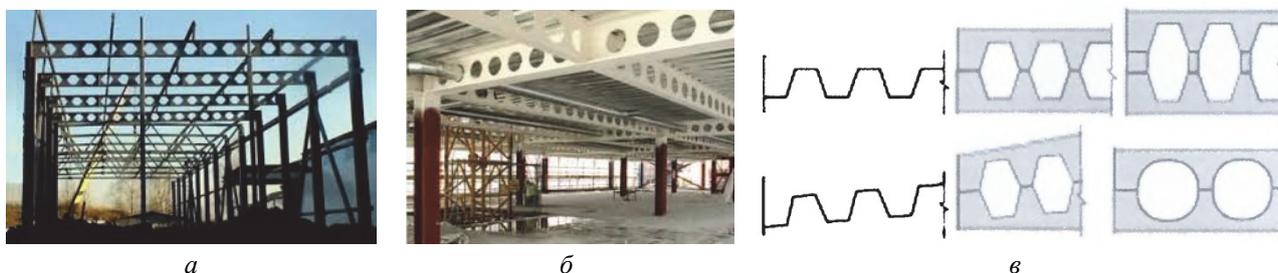
Двутавровые профили и их различные модификации весьма обоснованно считают конструктивной формой номер один, которую продолжают непрерывно совершенствовать в режиме реального времени [1; 2. С. 28–39; 3–8]. Так, совсем недавно в практике отечественного строительства впервые принят стандартизированный сортамент стальных двутавровых сварных балок (введен 1 января 2021 г.)<sup>1</sup>, что вполне может послужить примером и образцом в случае разработки такого же сортамента для перфорированных балок (перфобалкам). Их конструктивно-компоновочное оформление отличается значительным разнообразием, определяемым способом разрезки стенки (рис. 1).

К одному из первых применений перфорированных конструкций относится мост в Чикаго (США), построенный в 1910 г. В СССР в конце 1930-х и начале 1940-х гг. идея использования перфобалок в строительных конструкциях была предложена и разрабатывалась Ленинградским бюро «Проектстальконструкция» [2. С. 40–41]. Позднее весьма широкое распространение получили перфобалки с шестиугольными вырезами, так как технология разрезки по зигзагообразной линии была и по сей день остается самой простой и, как следствие, безотходной [9]. За рубежом они получили название *castellated beams* по

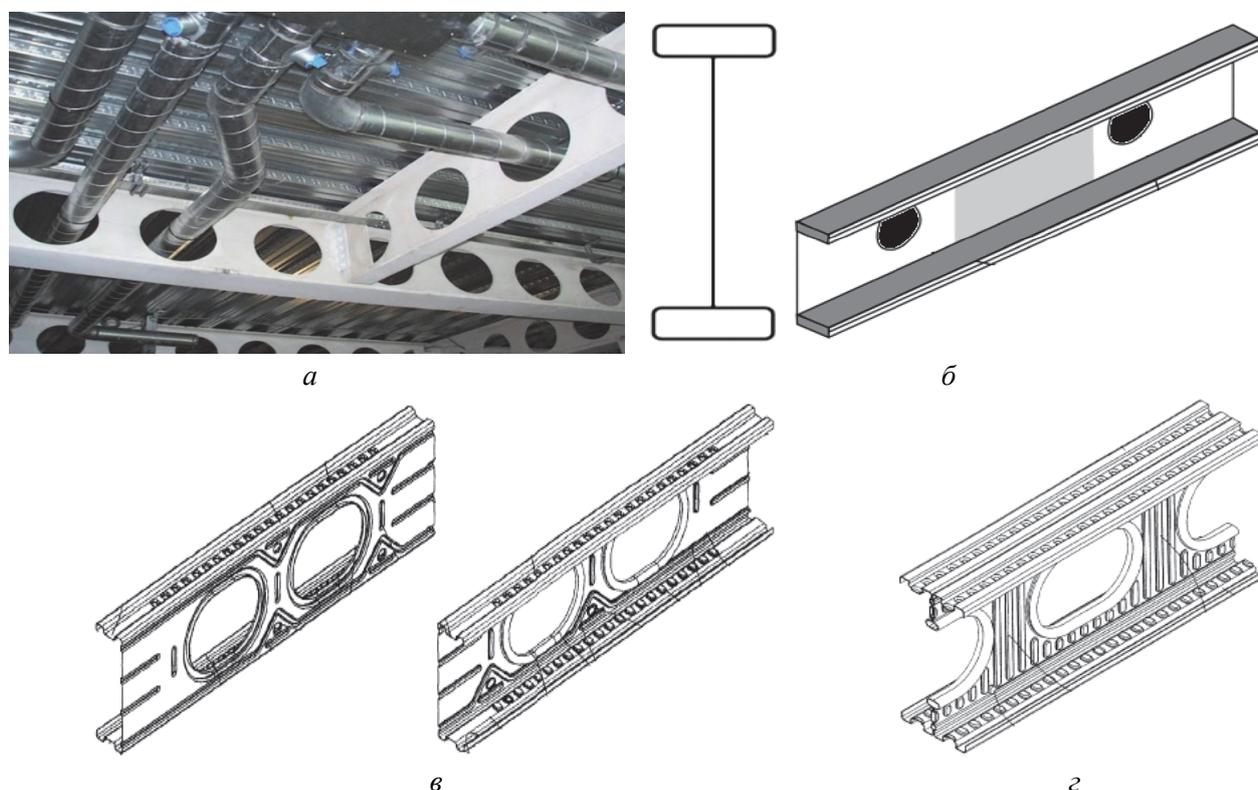
*Alexander S. Marutyan*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, teacher, leading researcher, Pyatigorsk Institute (branch) of the North Caucasus Federal University, 56 Prospekt 40 let Oktyabrya, Pyatigorsk, 357500, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5464-5929, Scopus Author ID: 57194604628, eLIBRARY SPIN-code: 8528-9956; al\_marut@mail.ru

<sup>1</sup> ГОСТ Р 58966–2020. Балки стальные двутавровые сварные. Технические условия. Сортамент. М.: Стандартинформ, 2020. 32 с.

зубчатому очертанию реза, напоминающему стену средневекового замка. Дальнейшее совершенствование технологии обеспечило изготовление перфобалок с круглыми вырезами, она перестала быть безотходной, но осталась весьма близкой к этому. За рубежом их стали называть cellular beams (ячеистые балки) [10]. Более значительные отходы неизбежны при изготовлении перфобалок из гнутых швеллеров с одинарной симметрией сечения (monosymmetric) и таких же двутавров с двойной симметрией сечения (doubly symmetric) (рис. 2)<sup>2</sup> [11] для легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК), где основным конструкционным материалом служат гнутые профили и профилированные листы из оцинкованного листового проката разных толщин не более 4 мм [12].



**Рис. 1.** Снимки перфобалок с шестиугольными (а), круглыми (б) вырезами и схемы их компоновки (в)  
**Figure 1.** Pictures of perforated beams with hexagonal (a), round (b) cutouts and their layout (c)

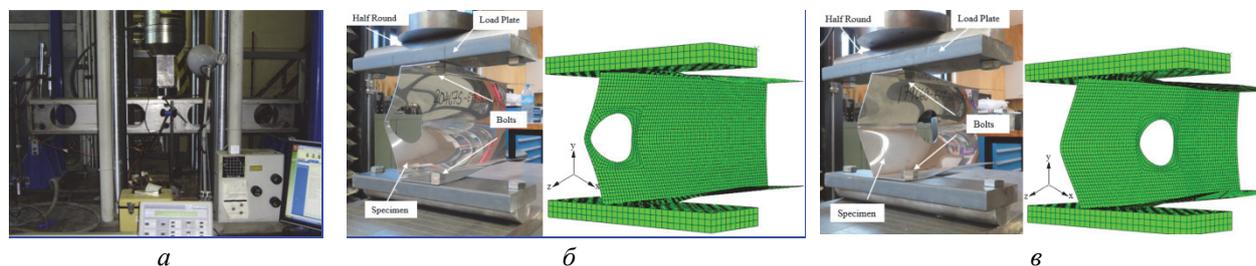


**Рис. 2.** Снимок перфобалок из гнутых профилей (а) и схемы их формообразования (б, в, г)  
**Figure 2.** Pictures of perforated beams from bent profiles (a) and a diagram of their shaping (b, c, d)

Экспериментальные исследования опытных образцов гнутых профилей с одинарной симметрией сечения (monosymmetric), включая швеллерных и С-образных термопрофилей, а также их сравнение с конечно-элементным (цифровым) моделированием (рис. 3) показали, что перфорирование стенок или полок сопровождается соразмерным ростом редуцирования расчетных сечений ЛСТК [13–15]. Поэтому сдержать такой рост, а заодно и минимизировать отходы можно, если технологические операции по вырезанию отверстий всевозможных очертаний дополнить соответствующими операциями по формообра-

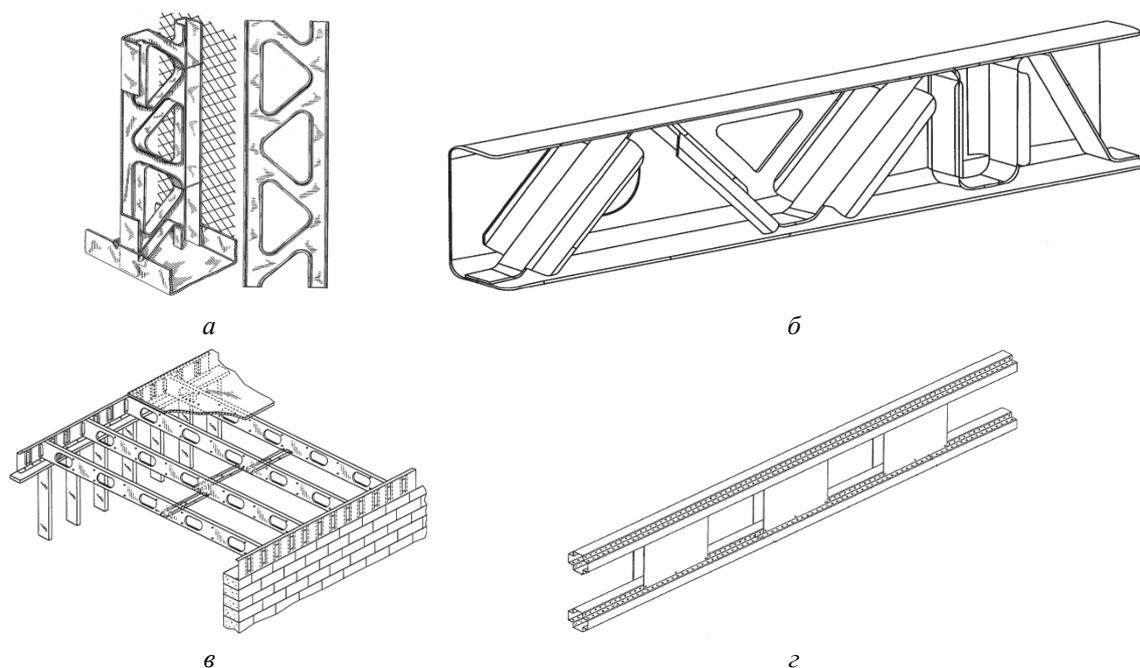
<sup>2</sup> European Patent Specification No EP2609259B1. Cold formed stud / Irving S. 18.03.2020. Bulletin 2020/12.

зованию различных элементов жесткости, например фрагментами продольного и/или поперечного гофрирования (рис. 2, в, з). Для достижения этих целей вполне применимы ферменные (решетчатые), безраскосные, трубчатые, замкнутые и другие конструктивно-компоновочные решения (рис. 4)<sup>3</sup>. Из целого ряда аналогичных решений практический интерес представляет модифицированный профиль марки «Атлант», детальная проработка которого допускает его использование в качестве основы для каркасно-монолитной конструкции (рис. 5)<sup>4</sup> [16].



**Рис. 3.** Снимки и мозаики цифровых моделей опытных образцов профилей с перфорированными стенками: а – общий вид; б – вид образца с крайним вырезом; в – вид образца с промежуточным вырезом

**Figure 3.** Pictures and mosaics of digital models of prototypes of profiles with perforated walls: а – general view; б – view of the sample with an extreme cut; в – view of the sample with an intermediate cut



**Рис. 4.** Схемы гнутых профилей с перфорированными стенками (полками) и элементами жесткости

**Figure 4.** Schemes of bent profiles with perforated walls (shelves) and stiffeners

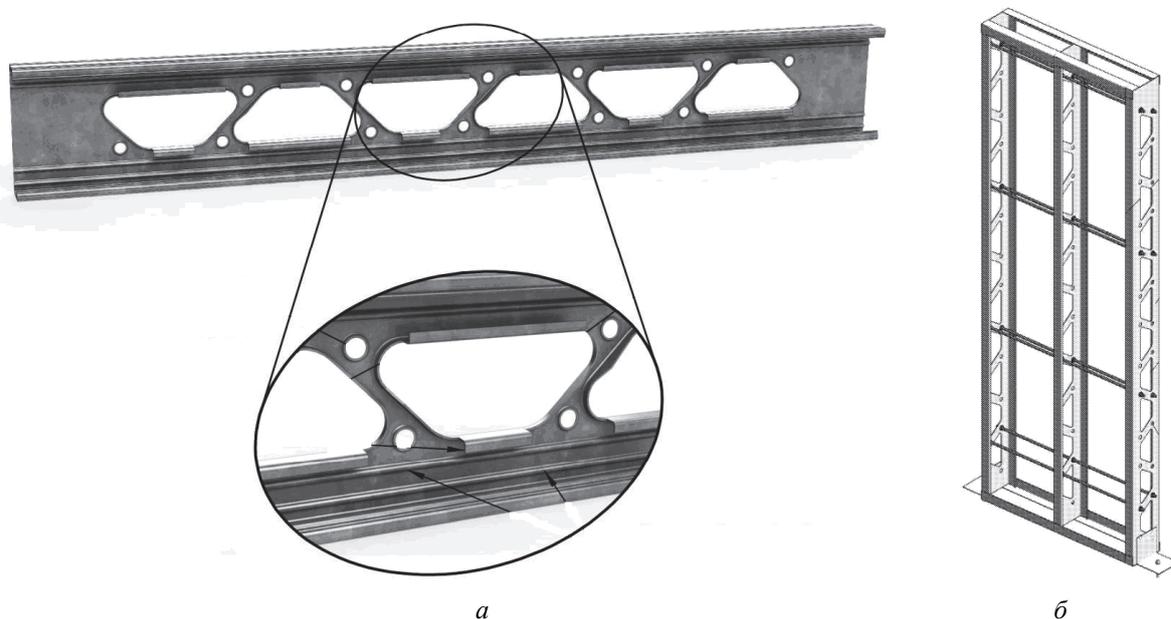
Обобщая вышесказанное, необходимо учесть, что в настоящее время и в обозримой перспективе разработка и исследование, проектирование и внедрение ЛСТК актуальны, востребованы и продолжают постоянно обновляться в режиме реального времени для использования в массовом промышленном и гражданском строительстве, включая жилые объекты разной этажности [17–22]. Этим можно объяснить тот факт, что по заказу Ассоциации развития стального строительства разработан новый учебник по металлическим конструкциям для вузов, в первой части которого отражены ЛСТК и основные положения

<sup>3</sup> United States Patent No 2088781. Studding structure / Folsom R.A. 1937, Aug. 3; Патент РФ № 2742128. Конструктивный балочный узел (варианты), способ сборки упрочненной конструктивной балки, аэродинамическая поверхность и летательный аппарат / Салливан К.Л. 2021. Бюл. № 4; United States Patent No 6691478. Joist support apparatus / Daudet L.R., Ralph G.S., Ponko E.L. 2004, Feb. 17; European Patent Specification No EP2861807B1. Structural members in framework structures / Swenters I. 20.03.2019. Bulletin 2019/12.

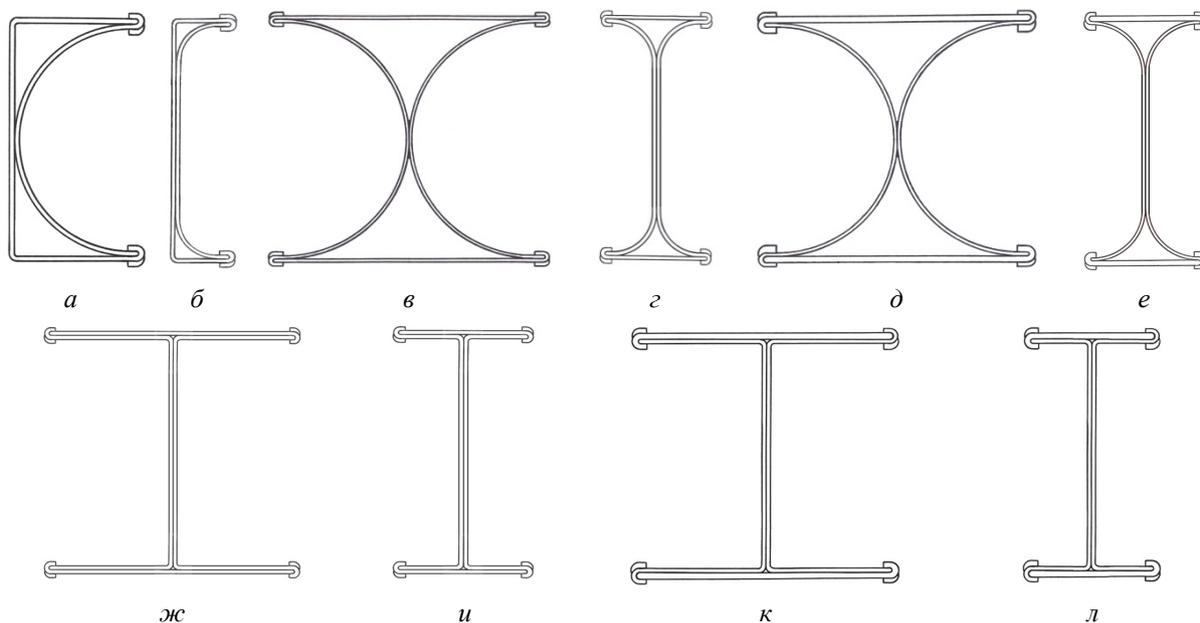
<sup>4</sup> Патент РФ № 188669. Каркасно-монолитная конструкция «Атлант» / Торохова Я.Б. 2019. Бюл. № 11.

их строительной механики<sup>5</sup>, а Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ издано пособие по проектированию таких конструкций<sup>6</sup>.

Практический интерес может вызвать продолжение представленного ряда профилей ЛСТК, если добавить к нему гнутозамкнутые профили (ГЗП) с замыканиями зубчатых креплений из оцинкованного листопроката одинаковых и разных толщин до 4 мм (рис. 6), основная специфика которых достаточно подробно раскрыта в предыдущих публикациях [23–26].



**Рис. 5.** Схемы профиля «Атлант» (а) и каркаса с его применением (б)  
**Figure 5.** Schemes of the “Atlant” profile (a) and the frame with its application (b)



**Рис. 6.** Схемы швеллерных (а, б), а также двутавровых ГЗП с трубчатыми (в, г, д, е) и плоскопараллельными (ж, и, к, л) полками  
**Figure 6.** Schemes of channel (a, b), as well as I-beams with tubular (в, г, д, е) and plane-parallel (ж, и, к, л) shelves

<sup>5</sup> Проектирование металлических конструкций. Часть 1. Металлические конструкции. Материалы и основы проектирования. учебник для вузов / под общ. ред. А.Р. Туснина. М.: Перо, 2020. С. 336–380.

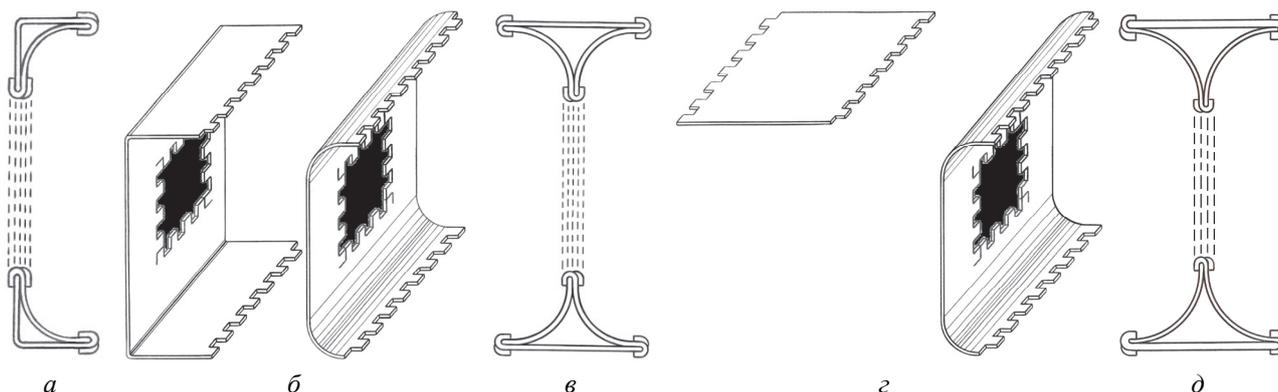
<sup>6</sup> Пособие по проектированию конструкций из стальных тонкостенных холодногнутых профилей. М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ, 2019. 208 с.

Обратим также внимание на потенциал и перспективность использования в рассматриваемых профилях перфорированных стенок, оптимизация и унификация которых вполне может стать источником заметного улучшения их тепло-физико-механических и технико-экономических показателей. При этом очевидно, что по конструктивным соображениям перфорированию подлежат те ГЗП с трубчатыми полками, стенки которых имеют плоские грани. Такой подход подытоживает небольшую серию публикаций об этих профилях и позволяет со временем перейти к их системному сравнению с двутавровыми ГЗП, которые, имея плоскопараллельные полки, по своим очертаниям совпадают с прокатными и сварными двутаврами.

## Материалы и методы

### *Компоновка составных сечений с перфорированными стенками*

Переход от гнутых профилей сплошного сечения к таким же профилям с перфорированными стенками (полками) сопровождается их облегчением с уменьшением массы (веса), улучшением теплофизических свойств и сцепления в сталежелезобетонных конструкциях. Однако негативная сторона такого перехода заключается в дополнительном снижении несущей способности из-за местной (локальной) потери устойчивости, а также увеличении отходов, трудоемкости и себестоимости изготовления. Очевидно, что аналогичный переход от ГЗП сплошного сечения (рис. 6) к таким же профилям с перфорированными стенками (рис. 7)<sup>7</sup> тоже сопровождается их облегчением с уменьшением массы (веса), улучшением теплофизических свойств и сцепления в сталежелезобетонных конструкциях, но снижает несущую способность соразмерно высоте вырезов, увеличивая отходы, трудоемкость и себестоимость изготовления. При этом замыкания зубчатых креплений по всему периметру каждого из вырезов перфорированных стенок увеличивают их местную (локальную) и общую устойчивость, повышая одновременно степень цельности (монолитности) составного сечения.



**Рис. 7.** Сечение швеллерного ГЗП (а) и аксонометрия его листовых заготовок в разъемном виде (б), сечение двутаврового ГЗП (в) и аксонометрия его листовых заготовок в разъемном виде (г), сечение двутаврового ГЗП из листовых заготовок разных толщин (д)  
**Figure 7.** Section of a channel-type BCP<sup>8</sup> (a) and a perspective view of its sheet blanks in a split form (б), a section of an I-shaped BCP (в) and a perspective view of its sheet blanks in a split form (г), section of an I-shaped BCP made of sheet blanks of different thicknesses (д)

Еще одна отличительная особенность ГЗП от гнутых профилей заключается в том, что компоновка первых позволяет определять расчетное сечение нетто, а расчетное (эффективное) сечение вторых необходимо редуцировать [27–35]. Поэтому практическое значение имеет уточнение расчетных параметров швеллерных и двутавровых ГЗП от зубчатой окантовки каждого из вырезов их перфорированных стенок. Для этого в перфорированных профилях по аналогии с такими же профилями сплошных сечений необходимо подобрать размеры элементов зубчатого крепления (зубцов), которые должны быть не меньше  $1/10$  габаритного размера сечения<sup>9</sup>. В данном случае этот размер составляет  $0,1U$ , где  $U$  – габарит ГЗП по ширине. В расчетных выкладках параметр зубчатых креплений (размер зубцов) отразится применительно к сплошным сечениям четырехкратным образом у швеллерных ГЗП [24] и восьмикратным образом

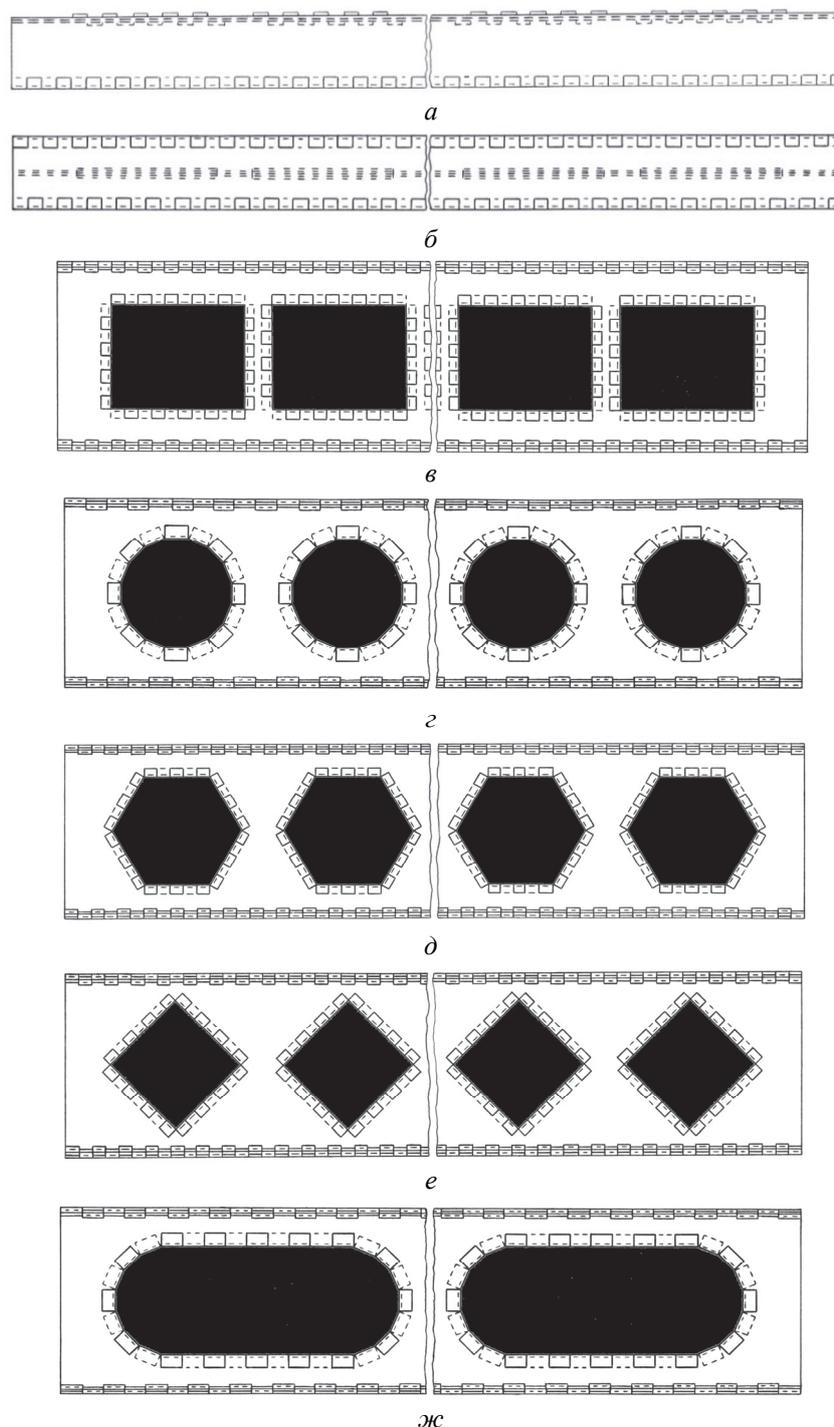
<sup>7</sup> Патент РФ № 197291. Швеллерный гнutoзамкнутый профиль с перфорированной стенкой / Марутян А.С. 2020. Бюл. № 11; Патент РФ № 199895. Двутавровый гнutoзамкнутый профиль с трубчатыми полками и перфорированной стенкой / Марутян А.С. 2020. Бюл. № 27.

<sup>8</sup> BCP – bended closed profiles.

<sup>9</sup> СП 260.132555800.2016. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования. М., 2016. С. 16.

у двутавровых ГЗП [25], а в расчетах перфорированных профилей с прибавлением зубчатых креплений вырезов обозначенная кратность увеличится до 8 и 12 соответственно.

Общая компоновка составных сечений с перфорированными стенками применительно к швеллерным и двутавровым ГЗП, как и перфобалки из прокатных или сварных профилей, может иметь вырезы прямоугольных, круглых, шестиугольных, ромбических, овальных и других очертаний (рис. 8). Из них при прочих равных условиях более предпочтительны вырезы плавных и обтекаемых форм, снижающих концентрацию напряжений при силовом сопротивлении несущих конструкций нагрузкам и воздействиям.



**Рис. 8.** Виды сверху швеллерного (а) и двутаврового (б) ГЗП, а также их боковые виды с прямоугольными (в), круглыми (г), шестиугольными (д), ромбическими (е) и овальными (ж) вырезами в стенках  
**Figure 8.** Top views of the channel (a) and I-beam (б) BCP, as well as their side views with rectangular (в), round (г), hexagonal (д), rhombic (е) and oval (ж) cuts in the walls

### Определение максимальной высоты вырезов в перфорированных стенках

В современной практике промышленно-гражданского строительства перфобалки из прокатных профилей проектируют с учетом ограничений размеров по высоте вырезов в перфорированной стенке (рис. 9, а):

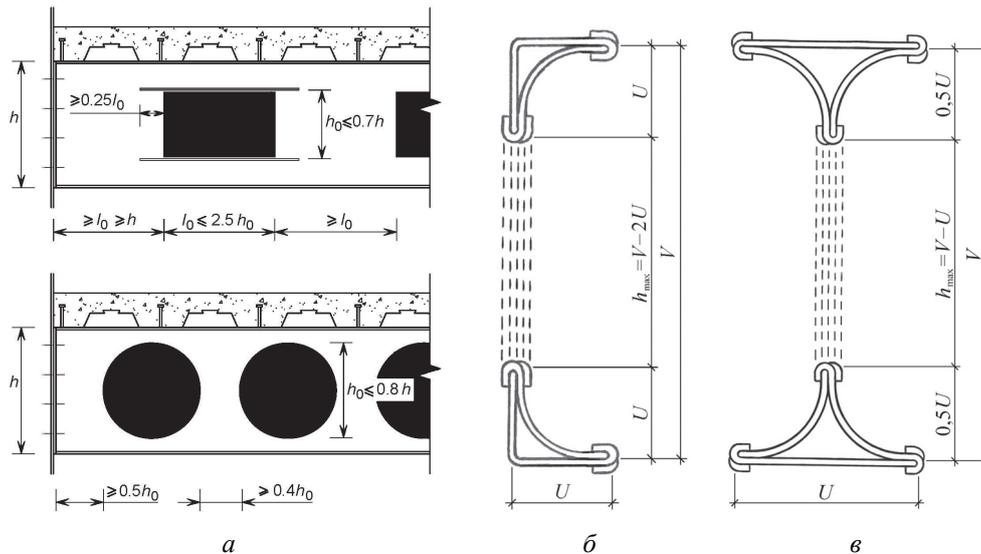
– для прямоугольных вырезов

$$h_0 \leq 0,7h;$$

– для круглых вырезов

$$h_0 \leq 0,8h,$$

где  $h_0$  – высота вырезов;  $h$  – высота профиля [36].



**Рис. 9.** Схемы для определения максимальной высоты вырезов в перфорированных стенках прокатных (а) и гнутозамкнутых (б, в) профилей

**Figure 9.** Schemes for determining the maximum height of the cutouts in the perforated walls of rolling (a) and bent closed (б, в) profiles

Подобные ограничения для швеллерного и двутаврового ГЗП с перфорированными стенками заключаются в их конструктивно-компоновочном оформлении и определяются размерами плоских участков стенок между выкружками полок:

– для швеллерных профилей (рис. 9, б)

$$h \leq h_{\max} = V - 2U;$$

– для двутавровых профилей (рис. 9, в)

$$h \leq h_{\max} = V - U,$$

где  $h(h_{\max})$  – высота (максимальная высота) вырезов;  $V(U)$  – высота (ширина) профиля по средней (срединной) линии его расчетного сечения.

Однозначное определение наибольшей высоты вырезов позволяет использовать ее параметр в качестве еще одного критерия при решении оптимизационной задачи, когда предельно облегченный профиль обладает максимальным запасом несущей способности для силового сопротивления изгибу:

$$W_x \rightarrow W_{x,\max} \text{ при } h \rightarrow h_{\max},$$

где  $W_x$  – момент сопротивления расчетного сечения нетто в плоскости наибольшей жесткости.

Для перехода к продолжению решения оптимизационной задачи с учетом дополнительного критерия остается добавить, что расчетные выкладки при этом допустимо выполнять по средней линии тонкостенного сечения без учета его угловых закруглений и без учета численных величин, содержащих значения толщины, возведенных во вторую и третью степень ( $t^2$  и  $t^3$ ) [37].

**Оптимизация швеллерных ГЗП с перфорированными стенками на изгиб**

Расчетные параметры швеллерного ГЗП без вырезов в его стенке ( $h = 0$ ;  $h/V = 0$ ) составляют (рис. 10, а) [24]:

– площадь сечения нетто:

$$A = tU(2/n + 3,14);$$

– площадь сечения брутто:

$$A_g = A + \Delta A = A + 0,4tU;$$

– абсцисса центра тяжести сечения:

$$x = 2,13982U/(2/n + 3,14);$$

– моменты инерции относительно центральных осей:

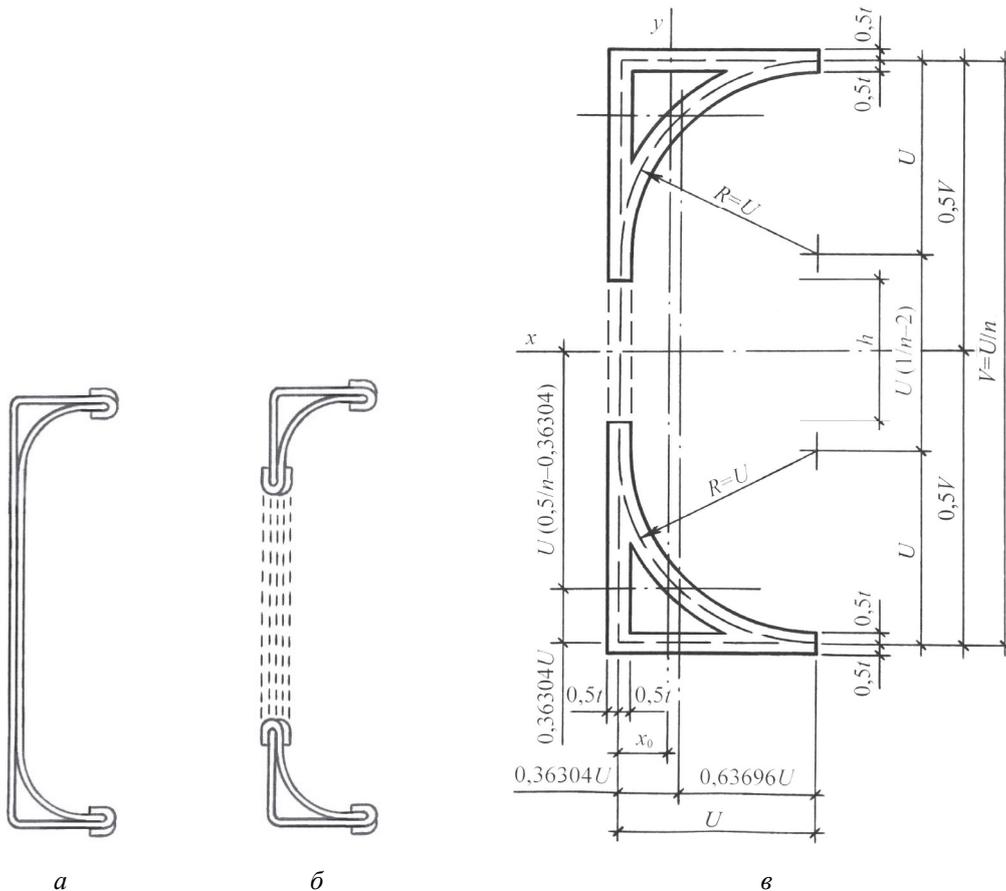
$$I_x = tU^3(0,1666666/n^3 + 0,785/n^2 - 0,13982/n + 0,043203);$$

$$I_y = tU^3(5,506145/n^2 + 8,131636/n - 0,8054282)/(2/n + 3,14)^2;$$

– момент сопротивления в плоскости наибольшей жесткости:

$$W_x = tU^2(0,3333332/n^2 + 1,57/n - 0,27964 + 0,086406n),$$

где  $t$  – толщина листовой заготовки профиля;  $h/V$  – относительная высота вырезов в перфорированной стенке;  $n$  – отношение ширины и высоты профиля по средней линии его сечения;  $n = U/V$  (рис. 10, в).



**Рис. 10.** Поперечное сечение швеллерных ГЗП без выреза (а) и с вырезом (б), а также его расчетная схема нетто (в)  
**Figure 10.** Cross section of channel BCP without cutout (a) and with cutout (b), as well as its net design scheme (v)

Стартом может послужить нулевой шаг расчета швеллерного ГЗП без перфорации его стенки при  $h/V = 0$ . Он практически ничем не отличается от сравнительного расчета оптимальных параметров швеллерных гнутых и гнутозамкнутых профилей [24], основные результаты которого развернуты во втором столбце табл. 1.

Таблица 1

Расчетные параметры швеллерных ГЗП с учетом перфорирования их стенок  
Table 1. Design parameters of channel BCP taking into account the perforation of their walls

$h/V$	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,5359375
$n = U/V$	0,1759477	0,1761811	0,1786906	0,1854985	0,1989458	0,2209820	0,2540763	0,2314570
$1/n = V/U$	5,6835070	5,6759777	5,5962652	5,3908791	5,0264946	4,5252554	3,0358255	4,3204569
$U, A/t$	0,0689321	0,0690038	0,0697713	0,0718300	0,0757978	0,0820310	0,0908129	0,0848830
$V, A/t$	0,3917760	0,3916640	0,3904587	0,3872268	0,3809972	0,3712112	0,3574237	0,3667333
$x, A/t$	0,0101676	0,0101888	0,0104167	0,0110405	0,0122939	0,0143990	0,0176470	0,0154176
$h, A/t$	0,00	0,0391664	0,0780917	0,1161800	0,1523988	0,1856056	0,2144542	0,1965461
$h_{\max}, A/t$	0,2539118	0,2536564	0,2509160	0,2435668	0,2294016	0,2071492	0,1757979	0,1969673
$h/h_{\max}$	0,00	0,1544073	0,3112264	0,4769451	0,6643318	0,8959995	1,2198905	0,9978616
$A/A_g$	0,9731669	0,9476849	0,9471337	0,9456586	0,9428285	0,9384165	0,9244437	0,9364116
$A_p/A$	1,00	0,9216672	0,8438164	0,7676638	0,6952021	0,6287887	0,5710915	0,6069074
$I_x, A^3/t^2$	0,0180818	0,0180664	0,0179410	0,0176073	0,0169774	0,0160076	0,0146938	0,0155737
$I_y = I_{y,0}, A^3/t^2$	0,0003474	0,0003484	0,0003590	0,0003889	0,0004483	0,0005525	0,0007195	0,0006041
$W_{x,\max}, A^2/t$	0,0924480	0,0922545	0,0918970	0,0909405	0,0891208	0,0862452	0,0822206	0,0849320
$I_{x,0}, A^3/t^2$	0,0180818	0,0180764	0,0180205	0,0178686	0,0175674	0,0170723	0,0163376	0,0168392
$W_{x,0}, A^2/t$	0,0924480	0,0923056	0,0923042	0,0922900	0,0922180	0,0919869	0,0914186	0,0918334
$I_x/I_{x,0}$	1,00	0,9994467	0,9955883	0,9853765	0,9664150	0,9376358	0,8993854	0,9248479
$W_{x,\max}/W_{x,0}$	1,00	0,9994464	0,9955884	0,9853776	0,9664143	0,9375813	0,8993859	0,9248486

Примечание / Note:  $A = \text{const}$ ;  $t = \text{const}$ .

Первый шаг расчета швеллерного ГЗП с перфорированной стенкой можно представить следующим образом:

$$h/V = 0,1;$$

$$h = 0,1V = 0,1U/n;$$

$$I_x = I_{x,0} - 2th^3/12 = I_{x,0} - t(0,1U/n)^3/6 = tU^3(0,16650/n^3 + 0,785/n^2 - 0,13982/n + 0,043203);$$

$$W_x = (A^2/t)(0,3330/n^2 + 1,57/n - 0,27964 + 0,086406n)/(4/n^2 + 12,56/n + 9,8596);$$

$$0,8519285n^4 + 2,1705186n^3 - 18,014978n^2 - 8,803613n + 2,09752 = 0;$$

$$n_1 = -5,8488304; n_2 = -0,6354094; n_3 = 0,1761811; n_4 = 3,7602879;$$

$$n = 0,1761811 = 1/5,6759777;$$

$$A = tU(2/0,1761811 + 3,14) = 14,491955tU; A_g = 15,291955tU; A/A_g = 0,9476849;$$

$$U = 0,0690038A/t; \quad V = 0,391664A/t;$$

$$h = 0,1V = 0,5675978U = 0,0391664A/t; \quad h_{\max} = 3,6759777U = 0,2536564A/t;$$

$$h/h_{\max} = 0,1544073 < 1;$$

$$A_p = A - 2th = tU(14,491955 - 2 \times 0,5675978) = 13,356760tU;$$

$$A_p/A = 0,9216672;$$

$$x = 0,1476557U = 0,0101888A/t;$$

$$I_x = tU^3(0,16650/0,1761811^3 + 0,785/0,1761811^2 - 0,13982/0,1761811 + 0,043203) = \\ = 54,986135tU^3 = 54,986135t(0,0690038A/t)^3 = 0,0180664A^3/t^2;$$

$$I_y = tU^3(5,506145/0,1761811^2 + 8,131636/0,1761811 - 0,8054282)/14,491955^2 = \\ = 1,0605795tU^3 = 1,0605795t(0,0690038A/t)^3 = 0,0003484A^3/t^2;$$

$$W_x = W_{x,\max} = 2(0,0180664A^3/t^2)/(0,391664A/t) = 0,0922545A^2/t,$$

где  $A_p(A)$  – расчетная площадь сечения нетто с вырезами (без вырезов), а расчетная площадь сечения брутто определена с учетом замыканий зубчатых креплений не только по кромкам обеих листовых заготовок, но и по периметрам вырезов в перфорированной стенке:

$$A_g = A + \Delta A = 14,491955tU + 4 \times 2 \times 0,1tU = 15,291955tU.$$

Для продолжения первого шага расчета швеллерного ГЗП расчетные параметры сечения с вырезом в перфорированной стенке необходимо дополнить такими же параметрами сечения без выреза:

$$I_{x,0} = tU^3(0,1666666/0,1761811^3 + 0,785/0,1761811^2 - 0,13982/0,1761811 + \\ + 0,043203) = 55,016602tU^3 = 55,016602t(0,0690038A/t)^3 = 0,0180764A^3/t^2;$$

$$W_{x,0} = 2(0,0180764A^3/t^2)/(0,391664A/t) = 0,0923042A^2/t,$$

где нулевыми индексами отмечены расчетные параметры сечения глухих простенков между вырезами в перфорированной стенке, что соответствует  $h = 0$  и  $h/V = 0$ .

Завершая первый шаг расчета швеллерного ГЗП, следует заметить, что перфорирование его стенки сопровождается уменьшением расчетных параметров в плоскости наибольшей жесткости соразмерно относительной высоте вырезов  $h/V = 0,1$ . В плоскости наименьшей жесткости расчетные параметры уменьшаются малозаметно и практически не влияют на несущую способность.

Если в интервале от  $h/V = 0,1$  до  $h/V = 0,6$  повторить все выкладки следующих шагов расчета швеллерного ГЗП, то основные их итоги более наглядно можно систематизировать в табличном виде (табл. 1), очевидно, что  $h < h_{\max}$  при  $h/V = 0,5$  и  $h > h_{\max}$  при  $h/V = 0,6$ . Тогда остается, используя метод последовательных приближений, уточнить в обозначенном интервале расчетный случай, когда  $h = h_{\max}$ . Результаты уточнения приведены в крайнем столбце табл. 1, где  $h/h_{\max} = 0,9978615 \approx 1$  с погрешностью, не превышающей 0,214 %. Судя по основным результатам, облегченный в наибольшей степени швеллерный ГЗП с перфорированной стенкой стал компактнее, поскольку отношение ширины и высоты по средней линии его расчетного сечения увеличилось с 1/5,68 до 1/4,32. Обратной стороной такого облегчения стало уменьшение ресурсов несущей способности, соразмерное максимальному размеру по высоте вырезов в перфорированной стенке ( $h_{\max}/V = 0,536 = 1/1,866$ ).

### **Оптимизация двутавровых ГЗП с перфорированными стенками на изгиб**

Расчетные параметры двутаврового ГЗП без вырезов в его стенке ( $h = 0$ ;  $h/V = 0$ ) по аналогии со швеллерным профилем составляют (рис. 11, а) [25]:

– площадь сечения нетто:

$$A = tU(2/n + 3,14);$$

– площадь сечения брутто:

$$A_g = A + \Delta A = A + 0,8tU;$$

– моменты инерции относительно центральных осей:

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

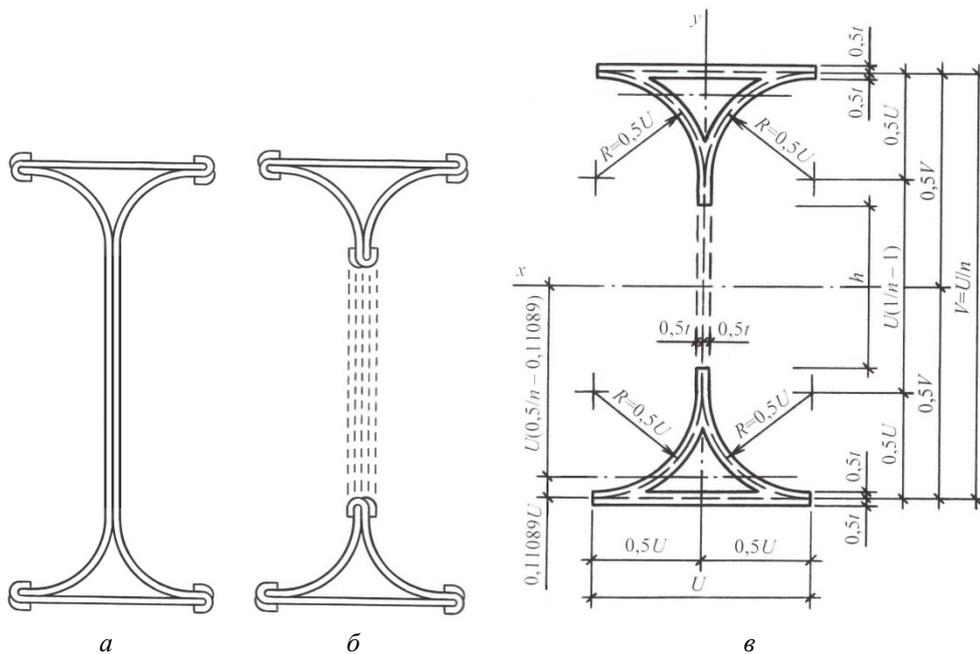
$$I_y = 0,344134tU^3;$$

– момент сопротивления в плоскости наибольшей жесткости:

$$W_x = tU^2(0,3333332/n^2 + 1,57/n - 0,1399456 + 0,0216468n),$$

где  $t$  – толщина листовой заготовки профиля;  $h/v$  – относительная высота вырезов в перфорированной стенке;  $n$  – отношение ширины и высоты профиля по средней линии его сечения;  $n = U/V$  (рис. 11, в).

За старт можно принять нулевой шаг расчета двутаврового ГЗП без перфорации его стенки при  $h/V = 0$ . Он практически совпадает с расчетом оптимальной компоновки его составного сечения [25], основные итоги которого представлены во втором столбце табл. 2.



**Рис. 11.** Поперечное сечение двутавровых ГЗП без выреза (а) и с вырезом (б), а также его расчетная схема нетто (в)  
**Figure 11.** Cross section of I-shaped BCP without a cutout (a) and with a cutout (b), as well as its net design scheme (v)

Первый шаг расчета двутаврового ГЗП с перфорированной стенкой можно развернуть в следующем виде:

$$h/V = 0,1;$$

$$h = 0,1V = 0,1U/n;$$

$$I_x = I_{x_0} - 2th^3/12 = I_{x_0} - t(0,1U/n)^3/6 = tU^3(0,16650/n^3 + 0,785/n^2 - 0,0699746/n + 0,0108234);$$

$$W_x = (A^2/t)(0,333/n^2 + 1,57/n - 0,1399492 + 0,0216468n)/(4/n^2 + 12,56/n + 9,8596);$$

$$0,2134287n^4 + 0,5437676n^3 - 16,977572n^2 - 7,686086n + 2,09752 = 0;$$

$$n_1 = -10,0772471; n_2 = -0,6369426; n_3 = 0,1920049; n_4 = 7,9744138;$$

$$n = 0,1920049 = 1/5,2082004;$$

$$A = tU(2/0,1920049 + 3,14) = 13,55640tU; A_g = 14,75640tU; A/A_g = 0,9186793;$$

$$U = 0,0737658A/t; V = 0,3841870A/t;$$

$$h = 0,1V = 0,520820U = 0,0384187A/t; h_{\max} = 4,2082004U = 0,3104212A/t;$$

$$h/h_{\max} = 0,1237631 < 1;$$

$$A_p = A - 2th = tU(13,55640 - 2 \times 0,520820) = 12,514760tU;$$

$$A_p/A = 0,9231624;$$

$$I_x = tU^3(0,16650/0,1920049^3 + 0,785/0,1920049^2 - 0,0699746/0,1920049 + 0,0108234) = 44,461945tU^3 = 44,461945t(0,0737658A/t)^3 = 0,0178465A^3/t^2;$$

$$I_y = 0,344134tU^3 = 0,344134t(0,0737658A/t)^3 = 0,0001381A^3/t^2;$$

$$W_x = W_{x,\max} = 2(0,0178465A^3/t^2)/(0,3841870A/t) = 0,0929052A^2/t,$$

где  $A_p(A)$  – расчетная площадь сечения нетто с вырезами (без вырезов), а расчетная площадь сечения брутто определена с учетом замыканий зубчатых креплений не только по кромкам обеих пар листовых заготовок, но и по периметрам вырезов в перфорированной стенке:

$$A_g = A + \Delta A = 13,55640tU + 6 \times 2 \times 0,1tU = 14,75640tU.$$

Таблица 2

Расчетные параметры двутавровых ГЗП с учетом перфорирования их стенок  
Table 2. Design parameters of I-shaped BCP taking into account the perforation of their walls

$h/V$	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,6843750
$n = U/V$	0,1916192	0,1920049	0,1947027	0,2007622	0,2163009	0,2398617	0,2750785	0,3243709	0,3156402
$1/n = V/U$	5,2186837	5,2082004	5,1360356	4,9810173	4,6231892	4,1690690	3,6353259	3,0828906	3,1681642
$U, A/t$	0,0736519	0,0737658	0,0745597	0,0763240	0,0807338	0,0871221	0,0960554	0,1074600	0,1055261
$V, A/t$	0,3843659	0,3841870	0,3829412	0,3801711	0,3732476	0,3632180	0,33491926	0,3312874	0,3343240
$h, A/t$	0,0000000	0,0384187	0,0765882	0,1140513	0,1492990	0,1816090	0,2095156	0,2319011	0,2288029
$h_{\max}, A/t$	0,3107140	0,3104212	0,3083815	0,3038471	0,2925138	0,2760959	0,2531371	0,2238274	0,2287979
$h/h_{\max}$	0,00	0,1237631	0,2483553	0,3753575	0,5103998	0,6578112	0,8276763	1,0360710	1,0000218
$A/A_g$	0,9443569	0,9186793	0,9178761	0,9160958	0,9116762	0,9053488	0,8966466	0,8857771	0,8876018
$A_p/A$	1,00	0,9231624	0,8468235	0,7718972	0,7014017	0,6367817	0,5809684	0,5361972	0,5423940
$I_x, A^3/t^2$	0,0178642	0,0178465	0,0177229	0,0174197	0,0167763	0,0158332	0,0145421	0,0129852	0,0132429
$I_y = I_{y,0}, A^3/t^2$	0,0001374	0,0001381	0,0001426	0,0001530	0,0001810	0,0002275	0,0003484	0,0004270	0,0004044
$W_{x,\max}, A^2/t$	0,0929541	0,0929052	0,0925619	0,0916413	0,0898936	0,0871829	0,0832898	0,0783923	0,0792219
$I_{x,0}, A^3/t^2$	0,0178641	0,0178559	0,0177978	0,0176669	0,0173310	0,0168232	0,0160750	0,0150638	0,0152392
$W_{x,0}, A^2/t$	0,0929541	0,0929542	0,0929531	0,0929418	0,0928659	0,0926341	0,0920695	0,0909409	0,0911642
$I_x/I_{x,0}$	1,00	0,9994735	0,9957916	0,9860077	0,9679937	0,9411526	0,9046407	0,8620135	0,08690023
$W_{x,\max}/W_{x,0}$	1,00	0,9994728	0,9957914	0,9860073	0,9679936	0,9411534	0,9046405	0,8620136	0,8690023

Примечание / Note:  $A = \text{const}; t = \text{const}$ .

Для продолжения первого шага расчета двутаврового ГЗП расчетные параметры сечения с вырезом в перфорированной стенке необходимо дополнить такими же параметрами сечения без выреза:

$$I_{x,0} = tU^3(0,1666666 / 0,1920049^3 + 0,785 / 0,1920049^2 - 0,0699728 / 0,192049 + 0,0108234) = 44,485492tU^3 = 44,485492t(0,0737658A/t)^3 = 0,0178559A^3 / t^2;$$

$$W_{x,0} = 2(0,0178559A^3 / t^2) / (0,3841870A / t) = 0,0929542A^2 / t,$$

где нулевыми индексами отмечены расчетные параметры сечения глухих простенков между вырезами в перфорированной стенке, что соответствует  $h = 0$  и  $h/V = 0$ .

Завершая первый шаг расчета двутаврового ГЗП, следует заметить, что перфорирование его стенки сопровождается уменьшением расчетных параметров в плоскости наибольшей жесткости соразмерно относительной высоте вырезов  $h/V = 0,1$ . В плоскости наименьшей жесткости расчетные параметры уменьшаются малозаметно и практически не влияют на несущую способность.

Если в интервале от  $h/V = 0,1$  до  $h/V = 0,7$  повторить все выкладки следующих шагов расчета двутаврового ГЗП, то основные их итоги более наглядно можно систематизировать в табличном виде (табл. 2), из которого очевидно, что  $h < h_{\max}$  при  $h/V = 0,6$  и  $h > h_{\max}$  при  $h/V = 0,7$ . Тогда остается, используя метод последовательных приближений, уточнить в обозначенном интервале расчетный случай, когда  $h = h_{\max}$ . Результаты уточнения приведены в крайнем столбце табл. 2, где  $h/h_{\max} = 1,0000218 \approx 1$  с погрешностью, не превышающей 0,0022 %. Судя по основным результатам, облегченный в наибольшей степени двутавровый ГЗП с перфорированной стенкой стал компактнее, поскольку отношение ширины и высоты по средней линии его расчетного сечения увеличилось с 1/5,219 до 1/3,168. Обратной стороной такого облегчения стало уменьшение ресурсов несущей способности, соразмерное максимальному размеру по высоте вырезов в перфорированной стенке ( $h_{\max}/V = 0,6844 = 1/1,461$ ).

#### **Оптимизация двутавровых ГЗП с перфорированными стенками из листового проката разных толщин на изгиб**

Введение поправочного коэффициента позволяет учесть разницу толщин полок и стенок, а также переписать расчетные формулы для общего случая двутавровых профилей из листового проката разных толщин без вырезов в их стенках (рис. 12, а) в следующем виде [26]:

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

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

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

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

где  $t_f$  – условная толщина полок,  $t_f = t + kt = t(1 + k)$ ;  $t_w$  – условная толщина стенки,  $t_w = 2t$ ;  $t$  – толщина полуплоскоовальных заготовок;  $kt$  – толщина плоских заготовок (рис. 12, в).

Дальнейший пошаговый расчет качественно подобен предыдущим и отличается от них численными значениями соответствующих параметров. Поэтому основные итоги такого расчета целесообразно систематизировать в табличном виде (табл. 3) применительно к сечениям, оптимизированным по максимальной прочности на изгиб при наибольшей облегченности ( $W_x \rightarrow W_{x,\max}$  при  $h \rightarrow h_{\max}$ ).

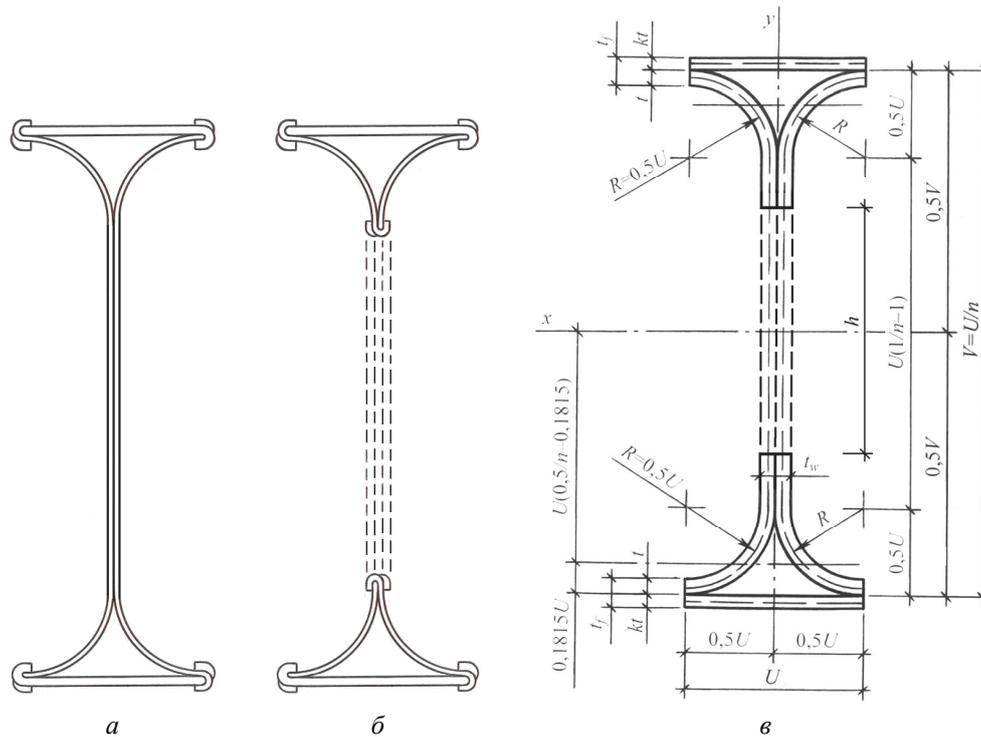
Судя по основным результатам и в этом расчетном случае облегченные в наибольшей степени двутавровые ГЗП с перфорированными стенками стали компактнее. Однако обратной стороной такого облегчения стало уменьшение ресурсов несущей способности, соразмерное максимальному размеру по высоте вырезов в перфорированной стенке. Остается отметить, что при прочих равных условиях по запасу прочности предпочтительнее те из оптимизированных профилей, у которых отношения условных толщин полок и стенок больше.

Таблица 3

Расчетные параметры двуглавых ГЗП с перфорированными стенками из листового проката разных толщин  
Table 3. Design parameters of I-shaped BCP with perforated walls from sheet metal of different thicknesses

$t_f/t_w$	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10	1,20	1,30
$k = 2t_f/t_w - 1$	0,20	0,40	0,60	0,80	1,20	1,40	1,60
$n = U/V$	0,4221524	0,3925894	0,3640917	0,3383734	0,2957406	0,2782024	0,2622816
$1/n = V/U$	2,3688127	2,5471905	2,7465608	2,9553150	3,3813416	3,5945052	3,8126959
$U, A/t$	0,1592958	0,1421589	0,1276630	0,1155985	0,0970620	0,0898552	0,0835743
$V, A/t$	0,3773419	0,3621058	0,3506341	0,3416299	0,3281997	0,3229849	0,3186433
$h = h_{\max}, A/t$	0,2180461	0,2199468	0,2229711	0,2260314	0,2311377	0,2331297	0,2350690
$h_{\max} / V$	0,5776828	0,6070431	0,6357414	0,6616462	0,7045192	0,7223091	0,7372952
$A/A_g$	0,8395212	0,8542695	0,8671555	0,8781803	0,8956765	0,9026685	0,9088519
$A_p/A$	0,5640318	0,5603722	0,5441745	0,5479235	0,5375534	0,5334098	0,5301311
$I_x, A^3/t^2$	0,0151426	0,0147025	0,0141431	0,0136591	0,0127633	0,0125577	0,0122884
$I_y = I_{y,0}, A^3/t^2$	0,0008521	0,0004352	0,0005773	0,0004801	0,0003451	0,0002980	0,0002592
$W_{x,\max}, A^2/t$	0,0802593	0,0812055	0,0806715	0,0799643	0,0777776	0,0777602	0,0771295
$I_{x,0}, A^3/t^2$	0,0170609	0,0164726	0,0159779	0,0155676	0,0149382	0,0146739	0,0144496
$W_{x,0}, A^2/t$	0,0904267	0,0909822	0,0911371	0,0911372	0,0910311	0,0908643	0,0906945
$I_x/I_{x,0}$	0,8875616	0,8925427	0,8851663	0,8774056	0,8544068	0,8557847	0,8585704
$W_{x,\max}/W_{x,0}$	0,8875619	0,8925427	0,8851664	0,8774057	0,8544069	0,8557838	0,8585702
$t_f/t_w$	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,0
$k = 2t_f/t_w - 1$	1,80	2,0	2,20	2,40	2,60	2,80	3,0
$n = U/V$	0,2509165	0,2349606	0,2247201	0,2140378	0,2051035	0,1968998	0,1890064
$1/n = V/U$	3,9853895	4,2560327	4,4499802	4,6720719	4,8755872	5,0787253	5/2908261
$U, A/t$	0,0786733	0,0732489	0,0692522	0,0654272	0,0621458	0,0591181	0,0564281
$V, A/t$	0,3135437	0,3117497	0,3081709	0,3056805	0,3029972	0,3005615	0,2985512
$h = h_{\max}, A/t$	0,2348704	0,2385008	0,2389187	0,2402533	0,2408514	0,2413810	0,2421231
$h_{\max} / V$	0,7485422	0,7653629	0,7750794	0,7855302	0,7945839	0,8033659	0,8108738
$A/A_g$	0,8876018	0,9443569	0,9186793	0,9178761	0,9160958	0,9116762	0,9053488
$A_p/A$	0,5305980	0,5227960	0,5222857	0,5197567	0,5184859	0,5170780	0,5158248
$I_x, A^3/t^2$	0,0120173	0,0118207	0,0116156	0,0114399	0,0112740	0,0111159	0,0109837
$I_y = I_{y,0}, A^3/t^2$	0,0002325	0,0002007	0,0001807	0,0001617	0,0001466	0,0001335	0,0001217
$W_{x,\max}, A^2/t$	0,0766547	0,0758345	0,0753841	0,0748487	0,0744171	0,0739675	0,0735800
$I_{x,0}, A^3/t^2$	0,0141667	0,0140847	0,0138868	0,0137505	0,0136000	0,0134622	0,0133474
$W_{x,0}, A^2/t$	0,0903650	0,0903590	0,0901240	0,0899664	0,0897698	0,0895803	0,0894144
$I_x/I_{x,0}$	0,848278	0,8392582	0,8364490	0,8319624	0,8289779	0,8257119	0,8229039
$W_{x,\max}/W_{x,0}$	0,8482786	0,8392578	0,8364486	0,8319628	0,8289770	0,8257116	0,8229099

Примечание / Note:  $A = \text{const}$ ;  $t = \text{const}$ .



**Рис. 12.** Поперечное сечение двутавровых ГЗП из листового проката разных толщин без выреза (а) и с вырезом (б), а также его расчетная схема нетто (в)

**Figure 12.** Cross section of I-shaped BCP made of sheet metal of different thicknesses without a cutout (a) and with a cutout (б), as well as its net design scheme (в)

## Результаты и обсуждение

### Реализация швеллерных ГЗП с перфорированными стенками

Пример реализации швеллерных ГЗП с перфорированными стенками по предлагаемому техническому решению можно привести, если в качестве базового объекта для сравнения принять модифицированные гнутые профили марки «Атлант» (рис. 5, а) [16], а также воспользоваться эквивалентными значениями геометрических характеристик самых крупнокалиберных сечений ([<sub>atl</sub>203×50,8 мм при  $t_{atl} = 1,0; 1,5; 2,0$  мм) из их сортамента [38]. Причем необходимо иметь в виду, что из-за своей сложной геометрии профили марки «Атлант» имеют непостоянную по длине форму поперечного сечения, а его характеристики – эквивалентные значения. Поэтому для сравнительного анализа удобно использовать удельные характеристики, коими являются расчетные параметры профиля с единичной площадью ( $I_x; I_y$ ) [39].

Профиль базового объекта ([<sub>atl</sub>203×50,8×1,0 мм) имеет следующие параметры:

– расчетное сечение без выреза (рис. 13, а):

$$A = A_g = 352 \text{ мм}^2; \quad I_{x,0} = 2\,104\,783 \text{ мм}^4; \quad I_{y,0} = 112\,353 \text{ мм}^4;$$

$$I_{x,0} = I_{x,0} / A = 2\,104\,783 / 352 = 5979,4971 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

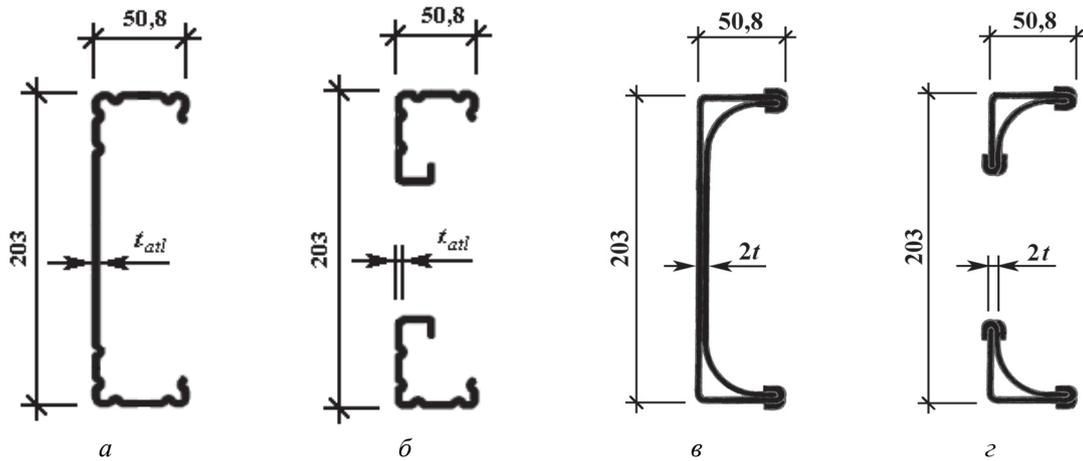
$$I_{y,0} = I_{y,0} / A = 112\,353 / 352 = 319,18465 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

– расчетное сечение с вырезом (рис. 13, б):

$$A_p = 255 \text{ мм}^2; \quad I_x = 1\,621\,760 \text{ мм}^4; \quad I_y = 94\,067 \text{ мм}^4;$$

$$I_x = I_x / A_p = 1\,621\,760 / 255 = 6359,8431 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

$$I_y = I_y / A_p = 94\,067 / 255 = 368,89019 \text{ мм}^4/\text{мм}^2.$$



**Рис. 13.** Схемы сечений швеллерных гнутых (а, б) и гнутозамкнутых (в, г) профилей с перфорированными стенками  
**Figure 13.** Schemes of sections of channel bent (a, б) and bent closed (в, г) profiles with perforated walls

Швеллерный ГЗП с перфорированной стенкой представлен профилем [ВСП203×50,8 мм с  $n = U/V = 50,8/203 = 0,2502463 = 1/3,9960629$ :

– расчетное сечение [ВСП203×50,8 мм при  $t_{atl} = 1,0$  мм без выреза (рис. 13, в):

$$A = tU(2/n + 3,14) = tU(2/0,2502463 + 3,14) = 11,132126tU;$$

$$A_g = A + \Delta A = A + 4 \times 2 \times 0,1tU = 11,132126tU + 0,8tU = 11,932126tU;$$

$$t = A_g / (11,932126U) = 352 / (11,932126 \times 50,8) = 0,5807124 \approx 0,58 \text{ мм};$$

$$A_g = 11,932126tU = 11,932126 \times 0,58 \times 50,8 = 351,56816 \approx 351,6 \text{ мм}^2;$$

$$A = 11,132126tU = 11,132126 \times 0,58 \times 50,8 = 327,73178 \approx 327,7 \text{ мм}^2;$$

$$x = 2,13982U / (2/n + 3,14) = 2,13982 \times 50,8 / (2/0,2502463 + 3,14) = 9,765 \text{ мм};$$

$$h_{\max} = V - 2U = 203 - 2 \times 50,8 = 101,4 \text{ мм};$$

$$I_{x,0} = tU^3(0,1666666 / 0,2502463^3 + 0,785 / 0,2502463^2 - 0,13982 / 0,2502463 + 0,043203) = 22,654959tU^3 = 22,654959 \times 0,58 \times 50,8^3 = 1\,722\,592 \text{ мм}^4;$$

$$I_{y,0} = tU^3(5,506145 / 0,2502463^2 + 8,131636 / 0,2502463 - 0,8054282) / (2/0,2502463 + 3,14)^2 = 0,9652194tU^3 = 0,9652194 \times 0,58 \times 50,8^3 = 73391,4 \text{ мм}^4;$$

$$I_{x,0} = I_{x,0} / A = 1722591,8 / 327,7 = 5256,6121 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

$$I_{y,0} = I_{y,0} / A = 73391,398 / 327,7 = 223,9591 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

– расчетное сечение [ВСП203×50,8 мм при  $t_{atl} = 1,0$  мм с вырезом (рис. 13, г):

$$A_p = A - 2th_{\max} = 327,7 - 2 \times 0,58 \times 101,4 = 210,076 \approx 210,1 \text{ мм}^2;$$

$$I_x = I_{x,0} - (2t)h_{\max}^3 / 12 = 1722591,8 - (2 \times 0,58)101,4^3 / 12 = 1\,621\,808 \text{ мм}^4;$$

$$I_{y,0} = I_{y,0} - (2t)^3 h_{\max}^3 / 12 = 73391,398 - (2 \times 0,58)^3 101,4 / 12 = 73384,8 \text{ мм}^4;$$

$$I_x = I_x / A_p = 1621808,1 / 210,1 = 7719,2198 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

$$I_y = I_y / A_p = 73384,804 / 210,1 = 349,28512 \text{ мм}^4/\text{мм}^2,$$

где в качестве эталонных (стоцентных) значений приняты расчетные параметры профиля базового объекта.

Из полученных результатов и их сравнения, развернутых в табличной форме (табл. 4), можно заключить, что швеллерный ГЗП с перфорированной стенкой обладает достаточной эффективностью для перспективного применения в несущих конструкциях.

Таблица 4

Расчетные параметры швеллерных гнутых и гнутозамкнутых профилей с перфорированными стенками

Профили, мм	Характеристики поперечного сечения									
	<i>A</i>	<i>I<sub>x,0</sub></i>	<i>I<sub>y,0</sub></i>	<i>I<sub>x,0</sub></i>	<i>I<sub>y,0</sub></i>	<i>A<sub>p</sub></i>	<i>I<sub>x</sub></i>	<i>I<sub>y</sub></i>	<i>I<sub>x</sub></i>	<i>I<sub>y,0</sub></i>
	мм <sup>2</sup>	мм <sup>4</sup>		мм <sup>4</sup> /мм <sup>2</sup>		мм <sup>2</sup>	мм <sup>4</sup>		мм <sup>4</sup> /мм <sup>2</sup>	
[atl203×50,8×1,0]	352 100 %	2 104 783 100 %	112 353 100 %	5979,4971 100 %	319,18465 100 %	255 100 %	1 621 760 100 %	94 067 100 %	6359,8431 100 %	368,89019 100 %
[всп203×50,8×0,58]	327,7 93,10 %	1 722 592 81,84 %	73391,4 65,32 %	5256,6121 87,91 %	223,9591 70,17 %	210,1 82,39 %	1 621 808 100,0 %	73384,8 78,01 %	7719,2198 121,4 %	349,28512 94,69 %
[atl203×50,8×1,5]	519 100 %	3 066 565 100 %	157 270 100 %	5908,603 100 %	303,03604 100 %	377 100 %	2 417 300 100 %	134 941 100 %	6411,9363 100 %	357,93368 100 %
[всп203×50,8×0,85]	480,7 92,62 %	2 524 488 82,32 %	107556,4 68,39 %	5251,6914 88,88 %	223,74942 73,84 %	295,4 56,92 %	2 341 026 96,84 %	107511,7 79,76 %	7924,9346 123,6 %	363,95304 101,7 %
[atl203×50,8×2,0]	688 100 %	4 037 609 100 %	206 221 100 %	5868,6177 100 %	299,73982 100 %	496 100 %	3 179 255 100 %	171 972 100 %	6409,7883 100 %	346,71774 100 %
[всп203×50,8×1,13]	639,0 92,88 %	3 356 084 83,12 %	142986,7 83,14 %	5251,8532 89,49 %	223,75632 74,65 %	392,7 57,08 %	3 112 187 97,89 %	142881,8 83,08 %	7925,3318 123,6 %	363,85535 104,9 %

Table 4

Design parameters of channels bent and bent closed profiles with perforated walls

Profiles, mm	Cross section characteristics									
	<i>A</i>	<i>I<sub>x,0</sub></i>	<i>I<sub>y,0</sub></i>	<i>I<sub>x,0</sub></i>	<i>I<sub>y,0</sub></i>	<i>A<sub>p</sub></i>	<i>I<sub>x</sub></i>	<i>I<sub>y</sub></i>	<i>I<sub>x</sub></i>	<i>I<sub>y,0</sub></i>
	mm <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup>		mm <sup>4</sup> /mm <sup>2</sup>		mm <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup>		mm <sup>4</sup> /mm <sup>2</sup>	
[atl203×50,8×1,0]	352 100%	2 104 783 100%	112 353 100%	5979,4971 100%	319,18465 100%	255 100%	1 621 760 100%	94 067 100%	6359,8431 100%	368,89019 100%
[всп203×50,8×0,58]	327.7 93.10%	1 722 592 81.84%	73391.4 65.32%	5256.6121 87.91%	223.9591 70.17%	210.1 82.39%	1 621 808 100.0%	73384.8 78.01%	7719.2198 121.4%	349.28512 94.69%
[atl203×50,8×1,5]	519 100%	3 066 565 100%	157 270 100%	5908.603 100%	303.03604 100%	377 100%	2 417 300 100%	134 941 100%	6411.9363 100%	357.93368 100%
[всп203×50,8×0,85]	480.7 92.62%	2 524 488 82.32%	107556.4 68.39%	5251.6914 88.88%	223.74942 73.84%	295.4 56.92%	2 341 026 96.84%	107511.7 79.76%	7924.9346 123.6%	363.95304 101.7%
[atl203×50,8×2,0]	688 100%	4 037 609 100%	206 221 100%	5868.6177 100%	299.73982 100%	496 100%	3 179 255 100%	171 972 100%	6409.7883 100%	346.71774 100%
[всп203×50,8×1,13]	639.0 92.88%	3 356 084 83.12%	142986.7 83.14%	5251.8532 89.49%	223.75632 74.65%	392.7 57.08%	3 112 187 97.89%	142881.8 83.08%	7925.3318 123.6%	363.85535 104.9%

### Реализация двутавровых ГЗП с перфорированными стенками

Пример реализации двутавровых ГЗП с перфорированными стенками можно привести, если в качестве базового объекта для сравнения принять составные двутавры в виде парных гнутых профилей марки «Атлант», состыкованных стенками аналогично техническому решению из введения (рис. 2, в, з)<sup>10</sup>.

<sup>10</sup> European Patent Specification No EP2609259B1. Cold formed stud / Irving S. 18.03.2020. Bulletin 2020/12.

Профиль базового объекта ( $[[_{atl}203 \times 101,6 \times 1,0 \text{ мм}]$ ) имеет следующие параметры:  
– расчетное сечение без выреза (рис. 14, а):

$$A = A_g = 2 \times 352 = 704 \text{ мм}^2; \quad I_{x,0} = 2 \times 2 \, 104 \, 783 = 4 \, 209 \, 566 \text{ мм}^4;$$

$$I_{y,0} = 2(112 \, 353 + 352 \times 8,5^2) = 275 \, 570 \text{ мм}^4;$$

где абсцисса центра тяжести сечения одного из парных швеллерных гнутых профилей составляет  $x = U / (1/n + 2) = 50,8 / (1/0,2502463 + 2) = 8,4722258 \approx 8,5 \text{ мм}$  [24],

$$I_{x,0} = I_{x,0} / A = 4 \, 209 \, 566 / 704 = 5979,4971 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

$$I_{y,0} = I_{y,0} / A = 275 \, 570 / 704 = 391,43465 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

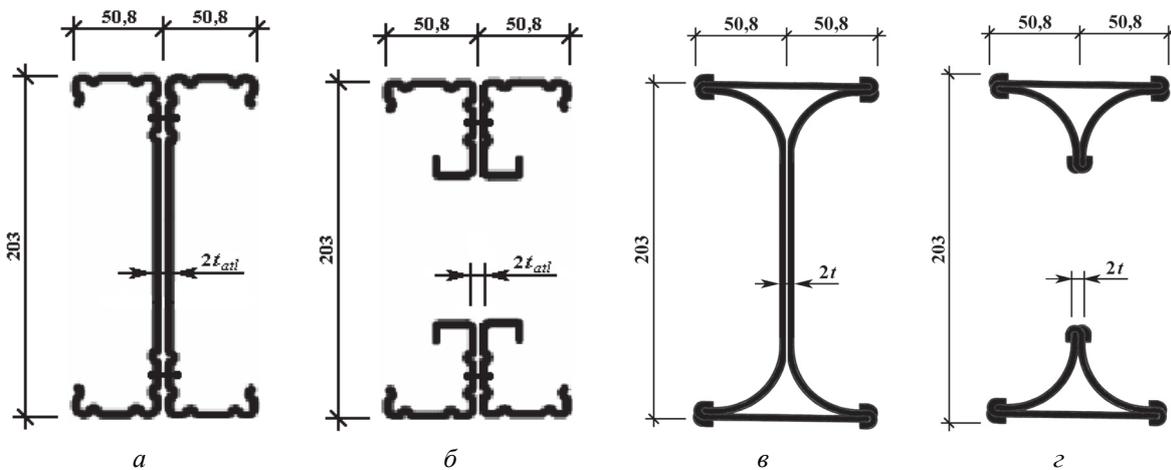
– расчетное сечение с вырезом (рис. 14, б):

$$A_p = 2 \times 255 = 510 \text{ мм}^2; \quad I_x = 2 \times 1 \, 621 \, 760 = 3 \, 243 \, 520 \text{ мм}^4;$$

$$I_y = 2(94 \, 067 + 255 \times 8,5^2) = 224981,5 \text{ мм}^4;$$

$$I_x = I_x / A_p = 3 \, 243 \, 520 / 510 = 6359,8431 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

$$I_y = I_y / A_p = 224981,5 / 510 = 441,14019 \text{ мм}^4/\text{мм}^2.$$



**Рис. 14.** Схемы сечений двутавровых гнутых (а, б) и гнутозамкнутых (в, г) профилей с перфорированными стенками  
**Figure 14.** Schemes of sections of I-shaped bent (a, б) and bent closed (в, г) profiles with perforated walls

Двутавровый ГЗП с перфорированной стенкой представлен профилем  $[[_{BCP}203 \times 101,6 \text{ мм}]$  с  $n = U/V = 101,6/203 = 0,5004926 = 1/1,9980314$ :

– расчетное сечение  $[[_{BCP}203 \times 101,6 \text{ мм}]$  при  $t_{atl} = 1,0 \text{ мм}$  без выреза (рис. 14, в):

$$A = tU(2/n + 3,14) = tU(2/0,5004926 + 3,14) = 7,136063tU;$$

$$A_g = A + \Delta A = A + 6 \times 2 \times 0,1tU = 7,136063tU + 1,2tU = 8,336063tU;$$

$$t = A_g / (8,336063U) = 704 / (8,336063 \times 101,6) = 0,8312237 \approx 0,83 \text{ мм};$$

$$A_g = 8,336063tU = 8,336063 \times 0,83 \times 101,6 = 702,96351 \approx 703,0 \text{ мм}^2;$$

$$A = 7,136063tU = 7,136063 \times 0,83 \times 101,6 = 601,76991 \approx 601,8 \text{ мм}^2;$$

$$h_{\max} = V - U = 203 - 101,6 = 101,4 \text{ мм};$$

$$I_{x,0} = tU^3(0,1666666 / 0,5004926^3 + 0,785 / 0,5004926^2 - 0,13982 / 0,5004926 + 0,0108234) = 4,3342333tU^3 = 4,3342333 \times 0,83 \times 101,6^3 = 3\,772\,867 \text{ мм}^4;$$

$$I_{y,0} = 0,3441566tU^3 = 0,3441566 \times 0,83 \times 101,6^3 = 299581,7 \text{ мм}^4;$$

$$I_{x,0} = I_{x,0} / A = 3\,772\,867 / 601,8 = 6269,3037 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

$$I_{y,0} = I_{y,0} / A = 299581,7 / 601,8 = 497,8094 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

– расчетное сечение ][Вср203×101,6 мм при  $t_{\text{atl}} = 1,0$  мм с вырезом (рис. 14, з):

$$A_p = A - 2th_{\max} = 601,8 - 2 \times 0,83 \times 101,4 = 433,476 \approx 433,5 \text{ мм}^2;$$

$$I_x = I_{x,0} - (2t)h_{\max}^3 / 12 = 3\,772\,867 - (2 \times 0,83)101,4^3 / 12 = 3\,628\,642 \text{ мм}^4;$$

$$I_y = I_{y,0} - (2t)^3 h_{\max}^3 / 12 = 299581,7 - (2 \times 0,83)^3 101,4^3 / 12 = 299\,543 \text{ мм}^4;$$

$$I_x = I_x / A_p = 3\,628\,642 / 433,5 = 8370,5697 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

$$I_y = I_y / A_p = 299\,543 / 433,5 = 690,98731 \text{ мм}^4/\text{мм}^2,$$

где в качестве эталонных (стопроцентных) значений приняты расчетные параметры профиля базового объекта.

Из полученных результатов и их сравнения, развернутых в табличной форме (табл. 5), можно заключить, что двутавровый ГЗП с перфорированной стенкой обладает достаточной эффективностью для перспективного применения в несущих конструкциях.

Таблица 5

Расчетные параметры двутавровых гнутых и гнутозамкнутых профилей с перфорированными стенками

Профили, мм	Характеристики поперечного сечения									
	$A$	$I_{x,0}$	$I_{y,0}$	$I_{x,0}$	$I_{y,0}$	$A_p$	$I_x$	$I_y$	$I_x$	$I_{y,0}$
	мм <sup>2</sup>	мм <sup>4</sup>		мм <sup>4</sup> /мм <sup>2</sup>		мм <sup>2</sup>	мм <sup>4</sup>		мм <sup>4</sup> /мм <sup>2</sup>	
][atl203×101,6×1,0	704 100 %	4 209 566 100 %	275 570 100 %	5979,4971 100 %	391,43465 100 %	510 100 %	3 243 520 100 %	224981,5 100 %	6359,8431 100 %	441,14019 100 %
][Вср203×101,6×0,83	601,8 85,48 %	3 772 867 89,63 %	299581,7 108,7 %	6269,3037 104,8 %	497,8094 127,2 %	433,5 85,0 %	3 628 642 111,9 %	299 543 133,1 %	8370,5697 131,6 %	690,98731 156,6 %
][atl203×101,6×1,5	1038 100 %	6 133 130 100 %	389535,5 100 %	5908,603 100 %	375,27504 100 %	754 100 %	4 834 600 100 %	324358,5 100 %	6411,9363 100 %	430,18368 100 %
][Вср203×101,6×1,22	884,5 90,42 %	5 545 659 82,32 %	440 349 113,04 %	6269,8236 106,1 %	497,85076 132,7 %	637,1 84,50 %	5 333 666 110,3 %	440226,2 135,7 %	8371,7877 130,6 %	690,98446 160,6 %
][atl203×101,6×2,0	1376 100 %	8 075 218 100 %	511 858 100 %	5868,6177 100 %	371,98982 100 %	992 100 %	6 358 510 100 %	415 616 100 %	6409,7883 100 %	418,96774 100 %
][Вср203×101,6×1,62	1174,5 92,88 %	7 363 908 91,19 %	584725,7 114,2 %	6269,8237 106,8 %	497,85074 133,8 %	846,0 85,28 %	7 082 409 111,4 %	584438,3 140,6 %	8371,6418 130,6 %	690,82541 164,9 %

Table 5

Design parameters of I-shaped bent and bent closed profiles with perforated walls

Profiles. mm	Cross section characteristics									
	<i>A</i>	<i>I<sub>x,0</sub></i>	<i>I<sub>y,0</sub></i>	<i>I<sub>x,0</sub></i>	<i>I<sub>y,0</sub></i>	<i>A<sub>p</sub></i>	<i>I<sub>x</sub></i>	<i>I<sub>y</sub></i>	<i>I<sub>x</sub></i>	<i>I<sub>y,0</sub></i>
	mm <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup>		mm <sup>4</sup> /mm <sup>2</sup>		mm <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup>		mm <sup>4</sup> /mm <sup>2</sup>	
][ <sub>ан</sub> 203×101.6×1.0	704 100%	4 209 566 100%	275 570 100%	5979.4971 100%	391.43465 100%	510 100%	3 243 520 100%	224981.5 100%	6359.8431 100%	441.14019 100%
][ <sub>вср</sub> 203×101.6×0.83	601.8 85.48%	3 772 867 89.63%	299581.7 108.7%	6269.3037 104.8%	497.8094 127.2%	433.5 85.0%	3 628 642 111.9%	299 543 133.1%	8370.5697 131.6%	690.98731 156.6%
][ <sub>ан</sub> 203×101.6×1.5	1038 100%	6 133 130 100%	389535.5 100%	5908.603 100%	375.27504 100%	754 100%	4 834 600 100%	324358.5 100%	6411.9363 100%	430.18368 100%
][ <sub>вср</sub> 203×101.6×1.22	884.5 90.42%	5 545 659 82.32%	440 349 113.04%	6269.8236 106.1%	497.85076 132.7%	637.1 84.50%	5 333 666 110.3%	440226.2 135.7%	8371.7877 130.6%	690.98446 160.6%
][ <sub>ан</sub> 203×101.6×2.0	1376 100%	8 075 218 100%	511 858 100%	5868.6177 100%	371.98982 100%	992 100%	6 358 510 100%	415 616 100%	6409.7883 100%	418.96774 100%
][ <sub>вср</sub> 203×101.6×1.62	1174.5 92.88%	7 363 908 91.19%	584725.7 114.2%	6269.8237 106.8%	497.85074 133.8%	846.0 85.28%	7 082 409 111.4%	584438.3 140.6%	8371.6418 130.6%	690.82541 164.9%

**Реализация двутавровых ГЗП с перфорированными стенками из листового проката разных толщин**

Пример реализации двутавровых ГЗП с перфорированными стенками из листового проката разных толщин можно привести, если в качестве базового объекта для сравнения использовать полученный сортамент трех таких же профилей из листового проката равных толщин с  $t_f/t_w = 1$ ,  $k = 1$  и  $n = 0,5004926$  (][<sub>вср</sub>203×101,6×0,83 мм; ][<sub>вср</sub>203×50,8×1,22 мм; ][<sub>вср</sub>203×101,6×1,62 мм) и уточнить расчетные формулы с учетом граничных значений поправочного коэффициента:

– при  $t_f/t_w = 0,6$  ( $k = 0,2$ )

$$A = tU(2 / 0,5004926 + 2 \times 0,2 + 1,14) = 5,536063tU;$$

$$A_g = tU(5,536063 + 1,2) = 6,736063tU;$$

$$I_x = tU^3(0,1666666 / 0,5004926^3 + 0,285 / 0,5004926^2 + 0,5 \times 0,2 / 0,5004926^2 - 0,0699728 / 0,5004926 + 0,0108234) = 2,7373849tU^3;$$

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

– при  $t_f/t_w = 2$  ( $k = 3$ )

$$A = tU(2 / 0,5004926 + 2 \times 3 + 1,14) = 11,136063tU;$$

$$A_g = tU(11,136063 + 1,2) = 12,336063tU;$$

$$I_x = tU^3(0,1666666 / 0,5004926^3 + 0,285 / 0,5004926^2 + 0,5 \times 3 / 0,5004926^2 - 0,0699728 / 0,5004926 + 0,0108234) = 8,3263669tU^3;$$

$$I_y = tU^3(0,1666666 \times 3 + 0,1774902) = 0,6774902tU^3.$$

Двутавровый ГЗП с перфорированной стенкой из листового проката разных толщин с  $t_f/t_w = 0,6$  ( $k = 0,2$ ), альтернативный профилю ][<sub>вср</sub>203×101,6×0,83 мм (рис. 15, а, б):

– расчетное сечение без выреза (рис. 15, в):

$$t = A_g / (6,736063U) = 703,0 / (6,736063 \times 101,6) = 1,027201 \approx 1,0 \text{ мм};$$

$$kt = 0,2 \times 1,0 = 0,2 \text{ мм};$$

$$A_g = 6,736063tU = 6,736063 \times 1,0 \times 101,6 = 684,384 \approx 684,4 \text{ мм}^2;$$

$$A = 5,536063tU = 5,536063 \times 1,0 \times 101,6 = 562,464 \approx 562,5 \text{ мм}^2;$$

$$h_{\max} = V - U = 203 - 101,6 = 101,4 \text{ мм};$$

$$I_{x,0} = 2,7373849tU^3 = 2,7373849 \times 1,0 \times 101,6^3 = 2\,870\,893 \text{ мм}^4;$$

$$I_{y,0} = 0,2108235tU^3 = 0,2108235 \times 1,0 \times 101,6^3 = 221\,105,8 \text{ мм}^4;$$

$$I_{x,0} = I_{x,0} / A = 2\,870\,893 / 562,5 = 5103,8097 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

$$I_{y,0} = I_{y,0} / A = 221\,105,8 / 562,5 = 393,07697 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

– расчетное сечение с вырезом (рис. 15, з):

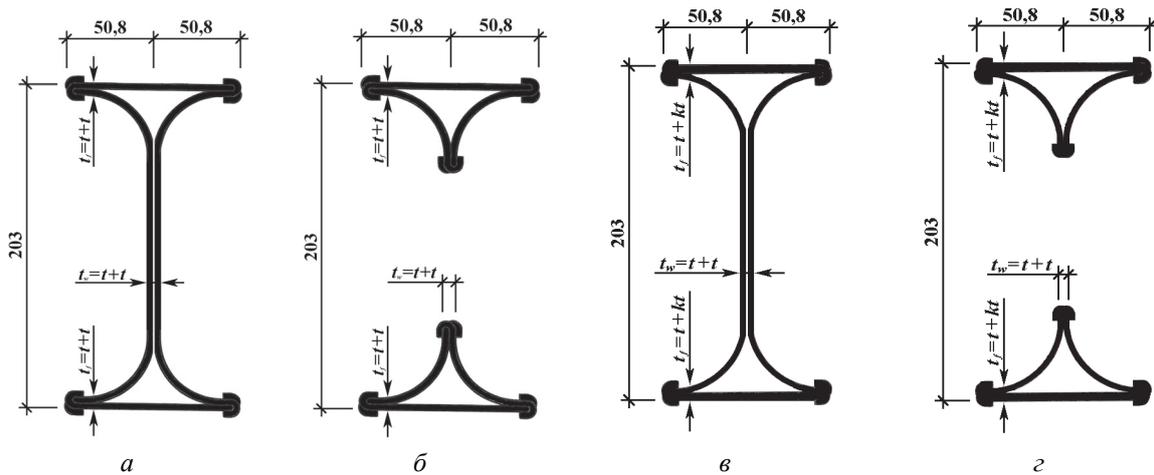
$$A_p = A - 2th_{\max} = 562,5 - 2 \times 1,0 \times 101,4 = 359,7 \text{ мм}^2;$$

$$I_x = I_{x,0} - (2t)h_{\max}^3 / 12 = 2\,870\,893 - (2 \times 1,0)101,4^3 / 12 = 2\,697\,128 \text{ мм}^4;$$

$$I_y = I_{y,0} - (2t)^3 h_{\max}^3 / 12 = 221\,105,8 - (2 \times 1,0)^3 101,4^3 / 12 = 221\,038,2 \text{ мм}^4;$$

$$I_x = I_x / A_p = 2\,697\,128 / 359,7 = 7498,2707 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

$$I_y = I_y / A_p = 221\,038,2 / 359,7 = 614,50708 \text{ мм}^4/\text{мм}^2.$$



**Рис. 15.** Схемы сечений двутавровых ГЗП с перфорированными стенками из заготовок равных (а, б) и разных (в, з) толщин  
**Figure 15.** Schemes of sections of I-shaped BCP with perforated walls from blanks of equal (a, б) and different (в, з) thicknesses

Двутавровый ГЗП с перфорированной стенкой из листового проката разных толщин с  $t_f/t_w = 2$  ( $k = 3$ ), альтернативный профилю  $\text{II}_{\text{ВСП}}203 \times 101,6 \times 0,83$  мм (рис. 15, а, б):

– расчетное сечение без выреза (рис. 15, в):

$$t = A_g / (12,336063U) = 703,0 / (12,336063 \times 101,6) = 0,5608994 \approx 0,560 \text{ мм};$$

$$kt = 3 \times 0,560 = 1,68 \text{ мм};$$

$$A_g = 12,336063tU = 12,336063 \times 0,560 \times 101,6 = 701,87264 \approx 701,9 \text{ мм}^2;$$

$$A = 11,136063tU = 11,136063 \times 0,560 \times 101,6 = 633,59743 \approx 633,6 \text{ мм}^2;$$

$$h_{\max} = V - U = 203 - 101,6 = 101,4 \text{ мм};$$

$$I_{x,0} = 8,3263669tU^3 = 8,3263669 \times 0,560 \times 101,6^3 = 4\,890\,178 \text{ мм}^4;$$

$$I_{y,0} = 0,6774902tU^3 = 0,6774902 \times 0,560 \times 101,6^3 = 397898,3 \text{ мм}^4;$$

$$I_{x,0} = I_{x,0} / A = 4\,890\,178 / 633,6 = 7718,0839 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

$$I_{y,0} = I_{y,0} / A = 397898,3 / 633,6 = 629,99605 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

– расчетное сечение с вырезом (рис. 15, з):

$$A_p = A - 2th_{\max} = 633,6 - 2 \times 0,560 \times 101,4 = 520,03 \text{ мм}^2;$$

$$I_x = I_{x,0} - (2t)h_{\max}^3 / 12 = 4\,890\,178 - (2 \times 0,560)101,4^3 / 12 = 4\,792\,870 \text{ мм}^4;$$

$$I_y = I_{y,0} - (2t)^3 h_{\max}^3 / 12 = 397898,3 - (2 \times 0,560)^3 101,4 / 12 = 397886,4 \text{ мм}^4;$$

$$I_x = I_x / A_p = 4\,792\,870 / 520,03 = 9216,5259 \text{ мм}^4/\text{мм}^2;$$

$$I_y = I_y / A_p = 397886,4 / 520,03 = 765,12201 \text{ мм}^4/\text{мм}^2.$$

Основные итоги, развернутые в табличной форме (табл. 6), показывают, что расчетный переход от двутавровых ГЗП с перфорированными стенками из листопроката равных толщин к таким же профилям из листопроката разных толщин сопровождается уменьшением расхода конструкционного материала, увеличением геометрических (статических) характеристик и, как следствие, ростом несущей способности. Снижением несущей способности в плоскости конструкции отличаются только двутавровые ГЗП с условной толщиной полка, меньшей условной толщины перфорированной стенки ( $t/t_w = 0,6$ ). 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.

Таблица 6

Расчетные параметры двутавровых гнутозамкнутых профилей с перфорированными стенками

Профили, мм	Характеристики поперечного сечения									
	<i>A</i>	<i>I<sub>x,0</sub></i>	<i>I<sub>y,0</sub></i>	<i>I<sub>x,0</sub></i>	<i>I<sub>y,0</sub></i>	<i>A<sub>p</sub></i>	<i>I<sub>x</sub></i>	<i>I<sub>y</sub></i>	<i>I<sub>x</sub></i>	<i>I<sub>y,0</sub></i>
	мм <sup>2</sup>	мм <sup>4</sup>		мм <sup>4</sup> /мм <sup>2</sup>		мм <sup>2</sup>	мм <sup>4</sup>		мм <sup>4</sup> /мм <sup>2</sup>	
][203×101,6 <i>t</i> = 0,83; <i>kt</i> = 0,83	601,8 100 %	3772867 100 %	299581,7 100 %	6269,3037 100 %	497,8094 100 %	433,5 100 %	3 628 642 100 %	299 543 100 %	8370,5697 100 %	690,98731 100 %
][203×101,6 <i>t</i> = 1,0; <i>kt</i> = 0,20	562,5 93,47 %	2870893 76,09 %	221105,8 73,81 %	5103,8097 81,41 %	393,07697 78,96 %	359,7 82,98 %	2 697 128 74,33 %	221038,2 73,79 %	7498,2707 89,58 %	614,0708 88,87 %
][203×101,6 <i>t</i> = 0,56; <i>kt</i> = 1,68	633,6 105,3 %	4 890 178 129,6 %	397898,3 132,8 %	7718,0839 123,1 %	629,99605 126,6 %	520,03 120,0 %	4 792 870 132,1 %	397886,4 132,8 %	9216,5259 110,1 %	765,12201 110,7 %
][203×101,6 <i>t</i> = 1,22; <i>kt</i> = 1,22	884,5 100 %	5 545 659 100 %	440 349 100 %	6269,8236 100 %	497,85076 100 %	637,1 100 %	5 333 666 100 %	440226,2 100 %	8371,7877 100 %	690,98446 100 %
][203×101,6 <i>t</i> = 1,50; <i>kt</i> = 0,30	843,7 95,39 %	4 306 339 77,65 %	331658,6 75,32 %	5104,1116 81,41 %	393,10015 78,96 %	539,5 84,68 %	4 045 692 75,85 %	331430,5 75,29 %	7498,9657 89,57 %	614,3290 88,91 %
][203×101,6 <i>t</i> = 0,82; <i>kt</i> = 2,46	927,8 104,9 %	7 160 618 129,1 %	582636,9 132,3 %	7717,8465 123,1 %	627,97682 126,1 %	761,5 119,5 %	7 018 131 131,6 %	582599,6 133,6 %	9216,1930 110,1 %	765,06841 110,7 %
][203×101,6 <i>t</i> = 1,62; <i>kt</i> = 1,62	1174,5 100 %	7 363 908 100 %	584725,7 100 %	6269,8237 100 %	497,85074 100 %	846,0 100 %	7 082 409 100 %	584438,3 100 %	8371,6418 100 %	690,82541 100 %
][203×101,6 <i>t</i> = 2,0; <i>kt</i> = 0,40	1124,9 95,78 %	5 741 785 77,97 %	442211,6 75,63 %	5104,2626 81,41 %	393,11192 78,96 %	719,3 85,02 %	5 394 255 76,16 %	441670,8 75,57 %	7499,3118 86,0 %	614,02863 88,88 %
][203×101,6 <i>t</i> = 1,09; <i>kt</i> = 3,27	1233,3 105,0 %	9 518 381 129,3 %	774480,6 132,5 %	7717,8148 123,1 %	614,02863 123,3 %	1012,2 119,6 %	9 328 977 131,7 %	774393,1 132,5 %	9216,5352 110,1 %	765,05937 110,7 %

Design parameters of I-shaped bent closed profiles with perforated walls

Profiles, mm	Cross section characteristics									
	$A$	$I_{x,0}$	$I_{y,0}$	$I_{x,0}$	$I_{y,0}$	$A_p$	$I_x$	$I_y$	$I_x$	$I_{y,0}$
	mm <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup>		mm <sup>4</sup> /mm <sup>2</sup>		mm <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup>		mm <sup>4</sup> /mm <sup>2</sup>	
] [203×101.6 $t = 0.83; kt = 0.83$	601.8 100%	3772867 100%	299581.7 100%	6269.3037 100%	497.8094 100%	433.5 100%	3 628 642 100%	299 543 100%	8370.5697 100%	690.98731 100%
] [203×101.6 $t = 1.0; kt = 0.20$	562.5 93.47%	2870893 76.09%	221105.8 73.81%	5103.8097 81.41%	393.07697 78.96%	359.7 82.98%	2 697 128 74.33%	221038.2 73.79%	7498.2707 89.58%	614.0708 88.87%
] [203×101.6 $t = 0.56; kt = 1.68$	633.6 105.3%	4 890 178 129.6%	397898.3 132.8%	7718.0839 123.1%	629.99605 126.6%	520.03 120.0%	4 792 870 132.1%	397886.4 132.8%	9216.5259 110.1%	765.12201 110.7%
] [203×101.6 $t = 1.22; kt = 1.22$	884.5 100%	5 545 659 100%	440 349 100%	6269.8236 100%	497.85076 100%	637.1 100%	5 333 666 100%	440226.2 100%	8371.7877 100%	690.98446 100%
] [203×101.6 $t = 1.50; kt = 0.30$	843.7 95.39%	4 306 339 77.65%	331658.6 75.32%	5104.1116 81.41%	393.10015 78.96%	539.5 84.68%	4 045 692 75.85%	331430.5 75.29%	7498.9657 89.57%	614.3290 88.91%
] [203×101.6 $t = 0.82; kt = 2.46$	927.8 104.9%	7 160 618 129.1%	582636.9 132.3%	7717.8465 123.1%	627.97682 126.1%	761.5 119.5%	7 018 131 131.6%	582599.6 133.6%	9216.1930 110.1%	765.06841 110.7%
] [203×101.6 $t = 1.62; kt = 1.62$	1174.5 100%	7 363 908 100%	584725.7 100%	6269.8237 100%	497.85074 100%	846.0 100%	7 082 409 100%	584438.3 100%	8371.6418 100%	690.82541 100%
] [203×101.6 $t = 2.0; kt = 0.40$	1124.9 95.78%	5 741 785 77.97%	442211.6 75.63%	5104.2626 81.41%	393.11192 78.96%	719.3 85.02%	5 394 255 76.16%	441670.8 75.57%	7499.3118 86.0%	614.02863 88.88%
] [203×101.6 $t = 1.09; kt = 3.27$	1233.3 105.0%	9 518 381 129.3%	774480.6 132.5%	7717.8148 123.1%	614.02863 123.3%	1012.2 119.6%	9 328 977 131.7%	774393.1 132.5%	9216.5352 110.1%	765.05937 110.7%

### Заключение

Основные результаты оптимизации швеллерных и двутавровых ГЗП с трубчатými полками и перфорированными стенками, в том числе из листового проката разных толщин, более наглядны на графиках в зависимости от относительной высоты вырезов в стенке и отношения условных толщин полок и стенки (рис. 16). По осям ординат этих графиков для единиц измерений использованы обозначения площади сечения и толщины листовой полосы ( $A = \text{const}$ ,  $t = \text{const}$ ), которая подлежит зигзагообразному резу на две заготовки для швеллерных ГЗП и четыре заготовки для двутавровых ГЗП, включая условный учет поправочного коэффициента  $k$  при разных толщинах полок и стенки.

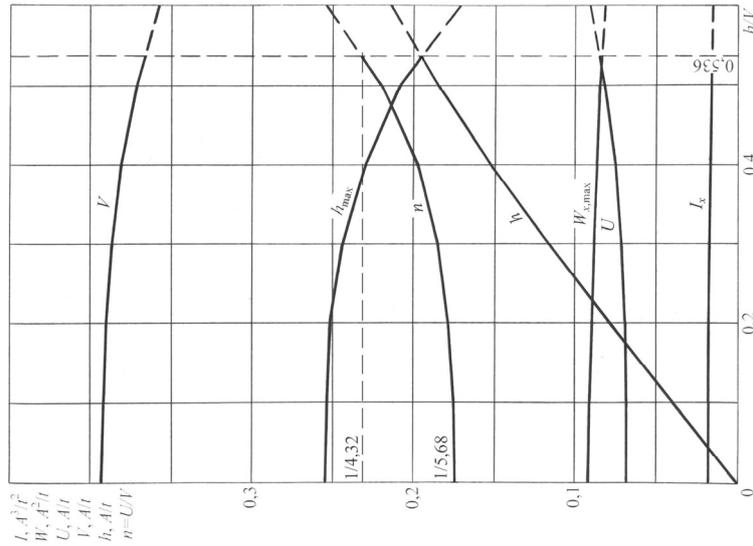
Итоговые графики позволяют сделать ряд обобщений и выводов.

1. Швеллерный ГЗП с перфорированной стенкой и двумя трубчатými полками имеет составное сечение из двух листовых заготовок, облегченность и момент сопротивления которого максимальны при относительной высоте вырезов  $1/1,87$  и отношении размеров ширины и высоты  $1/4,32$  по средней линии расчетного сечения нетто.

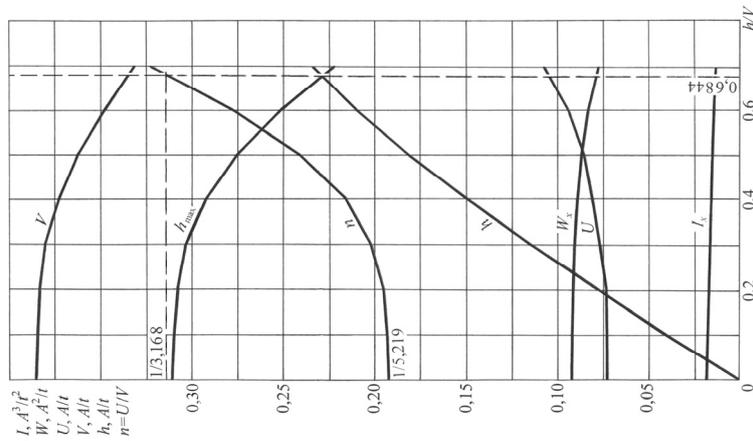
2. Двутавровый ГЗП с перфорированной стенкой и двумя трубчатými полками имеет составное сечение из четырех листовых заготовок равных толщин, облегченность и момент сопротивления которого максимальны при относительной высоте вырезов  $1/1,46$  и отношении размеров ширины и высоты  $1/3,17$  по средней линии расчетного сечения нетто.

3. Двутавровый ГЗП с перфорированной стенкой и двумя трубчатými полками имеет составное сечение из четырех листовых заготовок разных толщин, облегченность и момент сопротивления которого максимальны при относительной высоте вырезов и отношении размеров ширины и высоты, изменяемых соразмерно отношению условных толщин его полок и стенки. В частности, когда толщина полок в 2 раза больше толщины стенки, прочность и облегченность максимальны при относительной высоте вырезов  $1/1,23$  и отношении размеров ширины и высоты  $1/4,17$ , а когда толщина полок составляет 0,6 толщины стенки, прочность и облегченность максимальны при относительной высоте вырезов  $1/1,73$  и отношении размеров  $1/5,22$ .

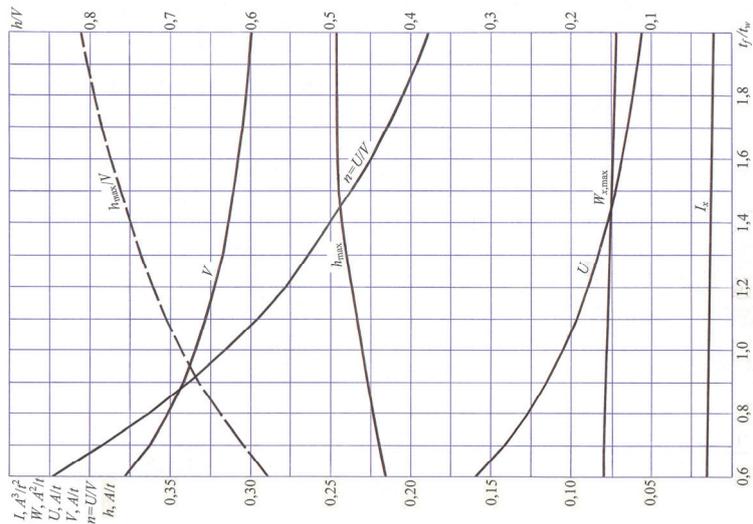
4. Швеллерные и двутавровые ГЗП с перфорированными стенками и трубчатými полками из листового проката равной и разных толщин по новому техническому решению достаточно рациональны и эффективны. Их можно считать вполне пригодными для использования в легких тонкостенных конструкциях зданий и сооружений.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



a



б



в

**Рис. 16.** Итоговые графики оптимизации швеллерных и двутавровых ГЗП с перфорированными стенками:

a, б – графики расчетных параметров швеллерных и двутавровых ГЗП соответственно в зависимости от роста относительной высоты вырезов;  
в – графики расчетных параметров двутавровых ГЗП из заготовок разных толщин в зависимости от роста отношения условных толщин их полок и стенки

**Figure 16.** Final graphs of the optimization of channel and I-shaped BCP with perforated walls:

a, б – graphs of the calculated parameters of the channel and I-beams BCP respectively depending on the growth of the relative height of the notches;  
в – graphs of the calculated parameters of I-beams from work pieces different thicknesses depending on the growth of the ratio of the conditional thicknesses of their shelves and walls

## Список литературы

1. *Перельмутер А.В.* Конструктивная форма номер один // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2012. № 1. С. 27–39.
2. *Перельмутер А.В.* Очерки по истории металлических конструкций. М.: СКАД Софт; Издательство АСВ, 2015. 256 с.
3. *Ведяков И.И., Конин Д.В.* О совершенствовании отечественных сортов двутавровых профилей с параллельными гранями полков и развитии норм проектирования современных металлических конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. № 3. С. 50–56.
4. *Ведяков И.И., Конин Д.В., Еремеев П.Г.* Разработка нового сортамента (ГОСТ Р) для выпуска двутавров с широкими полками // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2017. № 3–4. С. 40–43.
5. *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.
6. *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.
7. *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.
8. *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 national 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>
9. *Трофимов В.И., Каминский А.М.* Легкие металлические конструкции зданий и сооружений. М.: Издательство АСВ, 2002. С. 174–186.
10. *Притыкин А.И., Лаврова А.С.* Распределение напряжений в перфорированных балках с круглыми вырезами при поперечном изгибе // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 2. С. 81–85.
11. *Chandramohana D.L., Kanthasamy E., Gatheeshgar P., Poologanathan K., Fareedh M., Ishqyc M., Suntharalingamb T., Kajaharand T.* Shear behaviour and design of doubly symmetric hollow flange beam with web openings // Journal of Constructional Steel Research. 2021. No 185. 106836.
12. *Оносов Г.В., Силина Н.Г.* Коррозионная стойкость стального тонколистового оцинкованного проката // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 10. С. 4–8. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.10.04-08>
13. *Lawson R.M., Basta A.* Deflection of C-section beams with circular web openings // Thin-Walled Structures. 2019. No 134. Pp. 277–290.
14. *Yousefi A.M., Lim J.B.P., Charles G., 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.
15. *Degtyareva N.* Parametric study and proposed design equation for cold-formed steel channels with slotted webs subjected to web crippling under interior two flange load case // Construction of Unique Buildings and Structures. 2021. No 97. Article No 9701.
16. *Кашеварова Г.Г., Косых П.А.* Сравнительный анализ результатов натурального и численного экспериментов по определению предельной несущей способности тонкостенных профилей «Атлант» // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Vol. 14. No 3. Pp. 50–58. <http://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-3-50-58>
17. *Корсун Н.Д., Простакишина Д.А.* Применение легких тонкостенных конструкций как способ энергосбережения в стальном строительстве // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 5. С. 83–89. <http://doi.org/10.23968/1999-5571-2019-16-5-83-89>
18. *Советников Д.О., Виденков Н.В., Трубина Д.А.* Легкие стальные тонкостенные конструкции в многоэтажном строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 3 (30). С. 152–165. <http://doi.org/10.18720/CUBS.30.11>
19. *Решетников А.А., Корнет В.Ю., Леонова Д.А.* Анализ экономического преимущества перекрытия из ЛСТК перед деревянным // Инженерный вестник Дона. 2018. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n31y2018/5125](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n31y2018/5125) (дата обращения: 15.07.2021).
20. *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 (63). С. 20–48.
21. *Нефедов Г.В.* Строительство домов средней этажности на каркасах из легких стальных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 7. С. 10–15. <http://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.07.10-15>
22. *Gravit M.V., Dmitriev I.I.* Thin-walled compressed steel constructions under fire load // Magazine of Civil Engineering. 2021. No 5 (105). Article No 10514. <http://doi.org/10.34910/MCE.105.14>

23. Марутян А.С. Гнутозамкнутые профили и расчет их оптимальных параметров // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 1. С. 33–43. <http://doi.org/10.22363-1815-5235-2019-15-1-33-43>
24. 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. <http://doi.org/10.22363-1815-5235-2019-15-6-415-432>
25. 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. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-5-334-350>
26. 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://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-2-140-164>
27. Белов Г.И. Развитие методов расчета стержневых элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 3. С. 43–54. <http://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-3-43-54>
28. Белов Г.И. Аналитически-численный метод расчета на устойчивость стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4. С. 39–46. <http://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-4-39-46>
29. Белый Г.И., Смирнов М.О. Обратный численно-аналитический метод расчета легких стальных тонкостенных стержневых элементов // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 3. С. 57–68. <http://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.03.57-68>
30. Косенков В.В., Шуринов А.В. Уточнение методов расчета конструкций из стальных тонкостенных холодногнутох профилей // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 10. С. 65–76. <http://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.10.65-76>
31. 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.
32. 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. <http://doi.org/10.1016/j.tws.2015.12.021>
33. Lawsons R.M., Bastab A. Deflection of C section beams with circular web openings // Thin-Walled Structures. 2019. No 134. Pp. 277–290.
34. 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. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105809>
35. 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.
36. Стальные здания в Европе. Многоэтажные стальные здания: в 2 ч. Ч. 2. Основные проектные решения / подгот.: В.В. Галишникова, С.А. Печорская, В.В. Карневич; Ассоциация развития стального строительства. М.: Аксиом Графика Юнион, 2017. С. 56.
37. Марутян А.С. Оптимизация конструкций из трубчатых (гнутоварных) профилей квадратных (прямоугольных) и ромбических сечений // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. № 1. С. 30–38.
38. Кашеварова Г.Г., Косых П.А. Определение эквивалентных геометрических характеристик профилей «Атлант» // Вестник Волжского регионального отделения РААСН. 2016. № 19. С. 207–214.
39. Каплун Я.А. Стальные конструкции из широкополочных двутавров и тавров / под ред. Н.П. Мельникова. М.: Стройиздат, 1981. С. 10–12.

## References

1. Perelmuter A.V. Constructive form number one. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2012;(1):27–39. (In Russ.)
2. Perelmuter A.V. *Essays on the history of metal structures*. Moscow: SKAD Soft Publ., ASV Publ.; 2015. (In Russ.)
3. Vedyakov I.I., Konin D.V. On the improvement of domestic grades of I-beam profiles with parallel shelf faces and the development of design standards for modern metal structures. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2014;(3):50–56. (In Russ.)
4. Vedyakov I.I., Konin D.V., Eremeev P.G. Development of a new assortment (GOST R) for the production of I-beams with wide shelves. *Construction Materials, Equipment, Technologies of the XXI Century*. 2017;(3–4):40–43. (In Russ.)
5. Kuznetsov D.N., Sazykin V.G. Stress-strain state of a steel I-beam in a combined beam. Part 1. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2019;(11):5–16. (In Russ.) <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2019-731-11-5-16>
6. Kuznetsov D.N., Sazykin V.G. Stress-strain state of a steel I-beam in a combined beam. Part 2. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2019;(12):13–23. (In Russ.) <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2019-732-12-13-23>

7. Kuznetsov D.N., Sazykin V.G. Stress-strain state of a steel I-beam in a combined beam. Part 3. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020;(1):18–33. (In Russ.) <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2020-733-1-18-33>
8. 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 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>
9. Trofimov V.I., Kaminskij A.M. *Light metal structures of buildings and structures*. Moscow: ASV Publ.; 2002. p. 174–186. (In Russ.)
10. Pritykin A.I., Lavrova A.S. Stress distribution in perforated beams with round cutouts during transverse bending. *Industrial and Civil Construction*. 2017;(2):81–85. (In Russ.)
11. Chandramohana D.L., Kanthasamy E., Gatheeshgarb P., Poologanathanb K., Fareedh M., Ishqyc M., Suntharalingamb T., Kajaharand T. Shear behaviour and design of doubly symmetric hollow flange beam with web openings. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021;185:106836.
12. Onosov G.V., Silina N.G. Corrosion resistance of steel thin-sheet galvanized rolled products. *Industrial and Civil Construction*. 2020;(10):4–8. (In Russ.) <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.10.04-08>
13. Lawson R.M., Basta A. Deflection of C-section beams with circular web openings. *Thin-Walled Structures*. 2019;134:277–290.
14. Yousefi A.M., Lim J.B.P., Charles G., Clifton G.C. 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*. 2019;152:12–28.
15. Degtyareva N. Parametric study and proposed design equation for cold-formed steel channels with slotted webs subjected to web crippling under interior two flange load case. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2021;97:9701.
16. Kashevarova G.G., Kosyh P.A. The comparative analysis of the results of real and numerical experiments for defining the ultimate bearing capacity of light gauge steel studs “Atlant.” *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018;14(3):50–58. (In Russ.) <http://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-3-50-58>
17. Korsun N.D., Prostackishina D.A. Application of thin-walled structures for energy-savings in steel structure construction. *Magazine of Civile Engineering*. 2019;(5):83–89. (In Russ.) <http://doi.org/10.23968/1999-5571-2019-16-5-83-89>
18. Sovetnikov D.O., Videnkov N.V., Trubina D.A. Light gauge steel framing in construction of multi-storey buildings. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015;(3(30)):152–165. (In Russ.) <http://doi.org/10.18720/CUBS.30.11>
19. Reshetnikov A.A., Kornet V.Yu., Leonova D.A. Analysis of the economic advantage of overlapping from LSTK before wooden. *Engineering Messenger of the Don*. 2018;(3). (In Russ.) Available from: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n31y2018/5125](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n31y2018/5125) (accessed: 15.07.2021).
20. Rybakov V.A., Maslak T.V., Fedotova K.A., Smirnov A.V., Ananeva I.A. Reconstruction of pitched roofs using steel thin-walled structures. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2017;12(63):20–48. (In Russ.)
21. Nefedov G.V. Construction of medium-storey residential buildings on frames of light steel thin-walled structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2020;(7):10–15. (In Russ.) <http://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.07.10-15>
22. Gravit M.V., Dmitriev I.I. Thin-walled compressed steel constructions under fire load. *Magazine of Civil Engineering*. 2021;(105(5)):10514. <http://doi.org/10.34910/MCE.105.14>
23. Marutyan A.S. Curved closed profiles and calculation of their optimal parameters. *Structural Mechanics of Engineering Construction and Buildings*. 2019;15(1):33–43. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363-1815-5235-2019-15-1-33-43>
24. Marutyan A.S. Comparative calculation of optimal parameters of channel bent and bent closed profiles. *Structural Mechanics of Engineering Construction and Buildings*. 2019;15(6):415–432. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363-1815-5235-2019-15-6-415-432>
25. Marutyan A.S. I-shaped bent closed profiles with tubular shelves and calculation of the optimal layout of their composite sections. *Structural Mechanics of Engineering Construction and Buildings*. 2020;16(5):334–350. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-5-334-350>
26. Marutyan A.S. Optimization of channels and I-shaped bended closed profiles with tubular shelves from sheets of different thicknesses. *Structural Mechanics of Engineering Construction and Buildings*. 2021;17(2):140–164. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-2-140-164>
27. Belyj 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>
28. Belyj G.I. Analytical-numerical method for calculating the stability of rod elements of lightweight steel structures. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020;(4):39–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-4-39-46>
29. Belyj G.I., Smirnov M.O. Inverse numerical-analytical method for calculation of light steel thin-walled rod elements. *Industrial and Civil Engineering*. 2021;(3):57–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.03.57-68>
30. Kosenkov V.V., Shurinov A.V. Refinement of methods for calculating structures from steel thin-walled cold-formed sections. *Industrial and Civil Construction*. 2020;(10):65–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.10.65-76>

31. 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.
32. 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. <http://doi.org/10.1016/J.TWS.2015.12.021>
33. Lawson R.M., Bastab A. Deflection of C section beams with circular web openings. *Thin-Walled Structures*. 2019;(134):277–290.
34. 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. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105809>
35. 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.
36. Galishnikova V.V., Pechorskaya S.A., Karnevich V.V. (prep.) *Steel buildings in Europe. Multi-storey steel buildings. Part 2. Main design decisions*. Moscow: Aksiom Grafiks Yunion Publ.; 2017. (In Russ.)
37. Marutyan A.S. Optimization of tubular (bent-welded) structures square (rectangular) profiles and rhombic sections. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2016;(1(264)):30–38. (In Russ.)
38. Kashevarova G.G., Kosyh P.A. Determination of equivalent geometric characteristics of Atlant profiles. *Vestnik Volzhskogo Regional'nogo Otdeleniya RAASN*. 2016;(19):207–214. (In Russ.)
39. Kaplun Ya.A. Steel structures made of wide-brimmed I-beams and brands (N.P. Melnikov, Transl.). Moscow: Strojizdat Publ.; 1981. p. 10–12. (In Russ.)