

DOI 10.22363/1815-5235-2020-16-5-334-350  
УДК 624.072.2.014

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

## Двухтавровые гнутозамкнутые профили с трубчатыми полками и расчет оптимальной компоновки их составных сечений

**А.С. Марутян**

Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал Северо-Кавказского федерального университета) в г. Пятигорске, Российская Федерация, 357500, Пятигорск, пр-кт 40 лет Октября, 56  
al\_marut@mail.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 24 апреля 2020 г.  
Доработана: 10 августа 2020 г.  
Принята к публикации: 15 сентября 2020 г.

### Аннотация

Двухтавровые гнутозамкнутые профили с трубчатыми полками выделяются составным сечением и относятся к легким стальным тонкостенным конструкциям, отличающимся высокими технико-экономическими показателями и массовым спросом в промышленно-гражданском строительстве, что обуславливает актуальность разработки их нового технического решения. Цель исследования – показать, что характеристики стальных тонкостенных конструкций можно дополнительно улучшить при помощи формообразования профилей, сочетающего в составном сечении прямые и круглые очертания замкнутых и открытых контуров. Методы. Новое техническое решение, оригинальность которого подтверждена патентной экспертизой, разрабатывалось посредством опытно-конструкторских проработок и оптимизационно-проектных расчетов двухтавровых профилей. Произведен расчет оптимальной на изгиб компоновки составных сечений двухтавровых гнутозамкнутых профилей из листовых заготовок, одинаковых и неодинаковых по толщине, включая бистальные модификации. Результаты. Двухтавровый гнутозамкнутый профиль состоит из двух трубчатых полок и одной стенки двойной толщины. Для его изготовления без сварных, болтовых или заклепочных соединений наружные парные и внутренние парные заготовки выполняются по всей длине с зубчатыми продольными кромками, зубцы которых расположены относительно друг друга в шахматном порядке и взаимно загнуты в пазах между собой после замыкания гнутого профиля по его полкам. Загибы зубчатых креплений увеличивают толщину смятия, обеспечивают рост местной устойчивости и прочности соединений тонкостенных элементов на сдвиг, а также позволяют не редуцировать расчетные сечения. Расчет оптимальной компоновки двухтаврового гнутозамкнутого профиля на изгиб показал, что его прочность максимальна при отношении размеров ширины и высоты 1/5,2 и равных толщинах полок и стенки.

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

### Для цитирования

Марутян А.С. Двухтавровые 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://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-5-334-350>

Марутян Александр Суренович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела организации проектно-грантовой деятельности; Scopus Author ID: 57194604628, eLIBRARY SPIN-код: 8528-9956.

© Марутян А.С., 2020



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

# I-shaped bent closed profiles with tubular shelves and calculation of the optimal layout of their composite sections

Alexander S. Marutyan

*Institute of Service, Tourism and Design (branch of North-Caucasian Federal University) in Pyatigorsk, 56 40 let Oktyabrya Ave, Pyatigorsk, 357500, Russian Federation*  
al\_marut@mail.ru

## Article history

Received: April 4, 2020

Revised: August 10, 2020

Accepted: September 15, 2020

## Abstract

I-shaped bent closed profiles with tubular shelves are distinguished by a composite section and related to light steel thin-walled structures (LSTWS), which are characterized by high technical and economic indicators and mass demand in industrial and civil construction, which determines the *relevance* of the development of their new technical solutions. *The aim of the work* – to show that the characteristics of LSTWS can be further improved by forming profiles, combining straight and round outlines of closed and open circuits in a composite section. *Methods.* New technical solution, the originality of which is confirmed by patent examination, has been developed through experimental design and optimization and design calculations of I-shaped profiles. The calculation of the optimal bending layout of the composite sections of I-shaped profiles of horizontal billets from sheet blanks, identical and unequal in thickness, including bisteel modifications, is made. *Results.* The I-shaped bent closed profiles consists of two tubular shelves and one wall of double thickness. For its manufacture without welded, bolted or riveted joints, the outer pair and inner pair blanks are made along the entire length with serrated longitudinal edges, the teeth of which are staggered relative to each other and mutually bent in grooves after closing a bent profile along its shelves. The bends of the gear mounts increase the collapse thickness, provide an increase in the local stability and shear strength of the thin-walled elements, and also allow not to reduce the design sections. The calculation of the optimal layout of I-shaped profiles horizontal bend for bending showed that its strength is maximum when the ratio of the width and height of 1/5.2 and equal thicknesses of shelves and walls.

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

## For citation

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 Constructions and Buildings*. 2020;16(5):334–350. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-5-334-350>

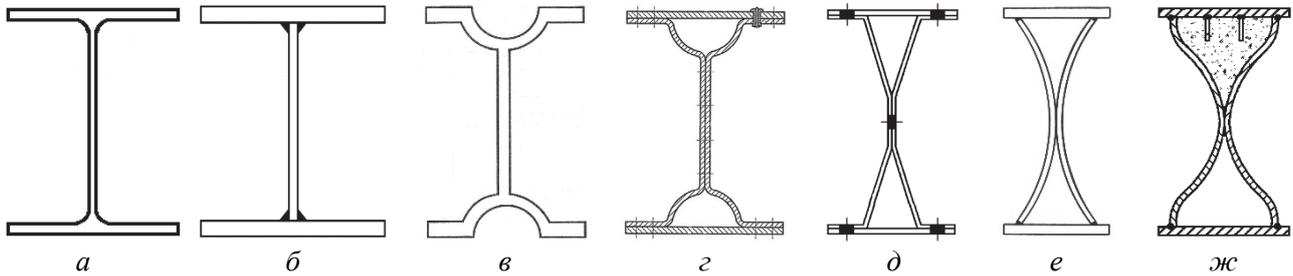
## 1. Введение

Двутавр представляет собой один из профилей, наиболее востребованных в практике строительства и проектирования для металлических, железобетонных, сталежелезобетонных, деревянных и других несущих конструкций. Из теории сортамента и оптимального проектирования известно до десятка критериев эффективности двутавровых профилей, работающих на изгиб [1. С. 77; 2; 3]. Поэтому в стальном строительстве его принято считать конструктивной формой номер один и непрерывно совершенствовать в режиме реального времени [4]. Конструктивно-компоновочная форма двутавра распространяется как на стандартные (рис. 1, а) [5; 6] и сварные (рис. 1, б) [7] профили, так и на более специфические, например, прокатный с лотками (рис. 1, в) [8] и прокатно-клепанный (рис. 1, г) [9] или гнутосварные составного сечения на точках (рис. 1, д) [10] и швах (рис. 1, е, ж) [11].

К числу первых двутавровых профилей с трубчатыми частями составных сечений из листовых заготовок можно отнести клепаную трубчато-двутавровую балку, использованную для ремонта Зимнего дворца в Санкт-Петербурге (рис. 2, а) [4; 12. С. 23]. Однако эта новация оказалась не самой успешной и не имела повторного применения, поскольку более рационально компоновать двутавровые профили не с трубчатыми стенками, а с трубчатыми полками (рис. 2, б–е) [13–17].

*Alexander S. Marutyan*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, senior researcher of the Department of Organization of Project and Grant Activities; Scopus Author ID: 57194604628, eLIBRARY SPIN-code: 8528-9956.

К двутавровым профилям с трубчатыми полками можно отнести и предлагаемое (новое) техническое решение гнutoзамкнутых профилей (ГЗП) составного сечения двутавровой формы, которому предшествовала проработка таких же ГЗП швеллерного очертания (рис. 3) [18–20].

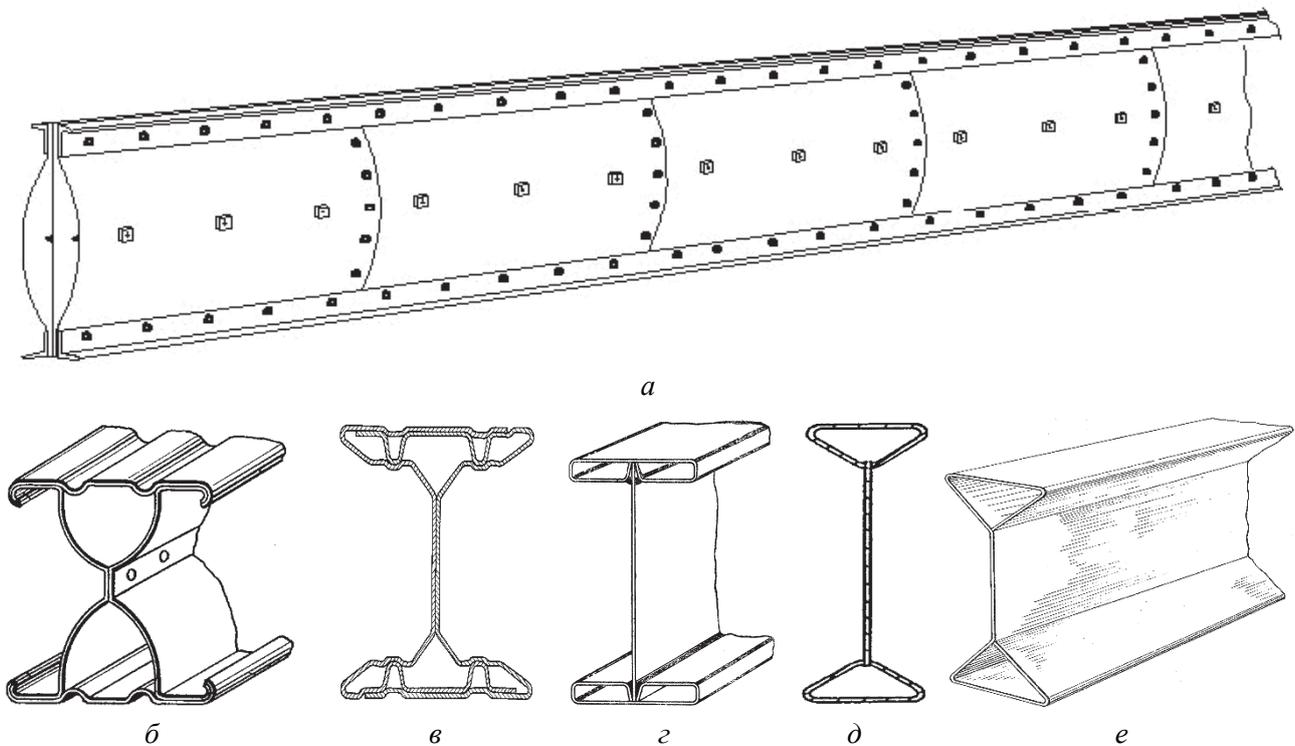


**Рис. 1.** Схемы двутавровых профилей:

*a* – прокатного; *б* – сварного; *в* – прокатного с лотками; *z* – прокатно-клепаного; *д* – гнutoсварного на точках; *e* – гнutoсварного на швах; *ж* – гнutoсварного в сталежелезобетонной балке

**[Figure 1.** Schemes of I-shaped profiles:

*a* – rolling; *б* – welded; *в* – rolling with trays; *z* – rolling riveted; *д* – bent welded at points; *e* – bent welded at the seams; *ж* – bent in steel-reinforced concrete beam]



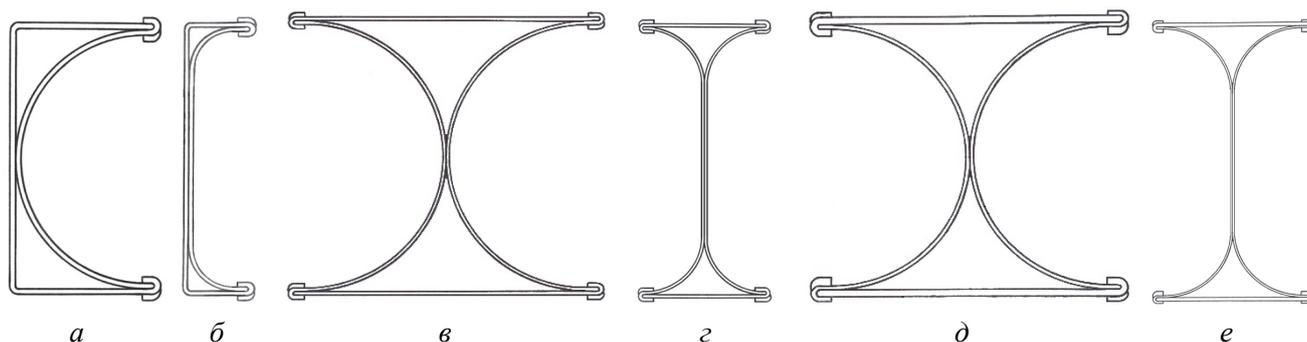
**Рис. 2.** Схемы двутавровых профилей с трубчатыми частями составных сечений из листовых заготовок:

*a* – трубчато-двутавровой балки; *б* – с продольным гофрированием полки; *в* – сборно-разборной балки; *z* – с полками прямоугольного очертания; *д* – с полками треугольного очертания; *e* – из единой развертки

**[Figure 2.** Schemes of I-shaped profiles with tubular parts composite sections from sheet blanks:

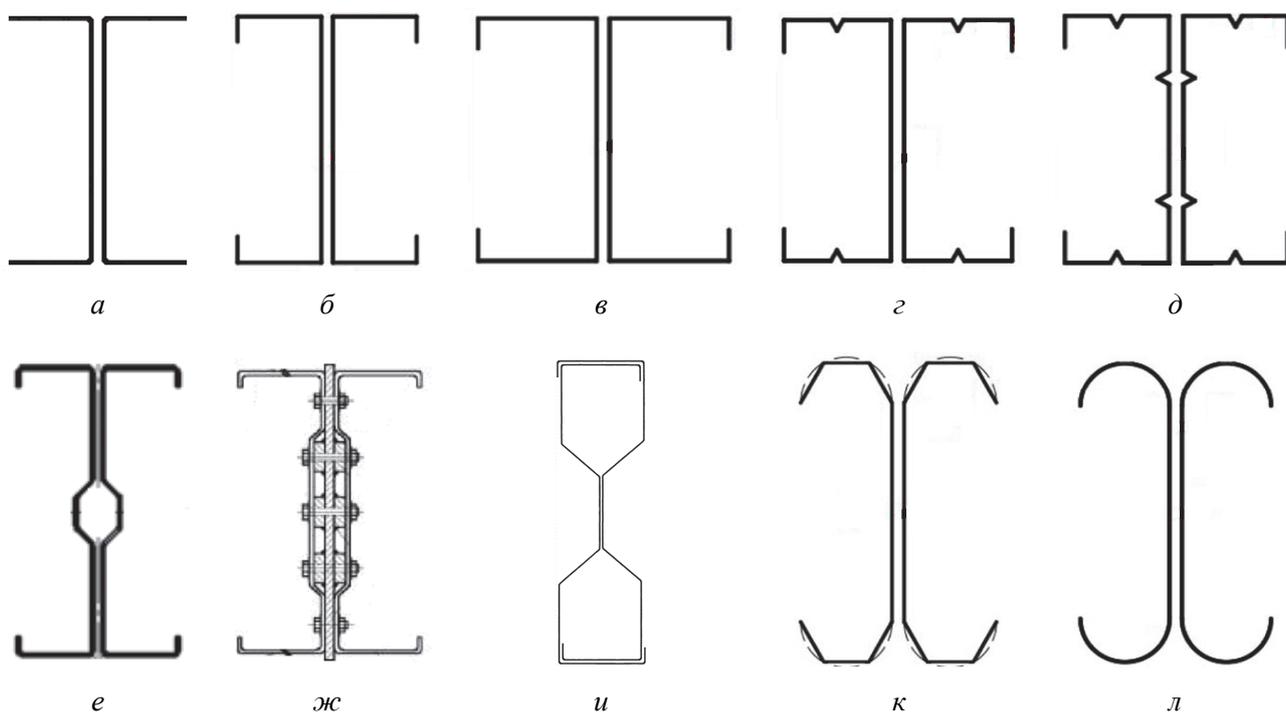
*a* – tubular I-beam; *б* – with longitudinal corrugation of shelves; *в* – collapsible beams; *z* – with shelves of rectangular shape; *д* – with shelves of triangular shape; *e* – from a single sweep]

Если для составных сечений гнutoзамкнутых швеллеров вполне рациональны листовые заготовки одинаковых толщин, то эффективность гнutoзамкнутых двутавров можно увеличить, дополнив листовые заготовки одинаковых толщин такими же заготовками разных толщин. Поэтому на две основные модификации швеллерных ГЗП (рис. 3, *a*, *б*) в случае двутавровых ГЗП приходится две основные модификации из листовых заготовок одинаковых толщин (рис. 3, *в*, *z*) и еще две основные модификации из листовых заготовок разных толщин (рис. 3, *д*, *e*).



**Рис. 3.** Схемы швеллерных (*a, б*) и двутавровых (*в, з, д, е*) ГЗП с трубчатыми полками  
**[Figure 3.** Schemes of channel (*a, б*) and I-shaped (*в, з, д, е*) bent closed profiles with tubular shelves

Такая универсальность нового технического решения может обеспечить дальнейшее расширение области перспективного использования ГЗП с зубчатыми креплениями без сварки, включая легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК), для которых основным конструкционным материалом служит тонколистовая оцинкованная сталь [21–23]. Специфика ГЗП и их применения в ЛСТК в прошлых публикациях [19; 24] раскрыта достаточно подробно. Поэтому в качестве продолжения здесь можно представить ряд наиболее употребительных, характерных решений двутавровых профилей, принятых для ЛСТК (рис. 4) [25–31], а также рассмотреть некоторые предпосылки к расчету оптимальной компоновки применительно к составным сечениям двутавровых ГЗП с трубчатыми полками.



**Рис. 4.** Схемы наиболее характерных решений двутавровых профилей для ЛСТК  
**[Figure 4.** Schemes of the most characteristic solutions of I-shaped profiles for LSTWS]

Таким образом, завершая и обобщая вышесказанное, можно сделать основной вывод о перспективности гнутозамкнутых швеллерных и двутавровых профилей с трубчатыми полками, опытно-конструкторская проработка и вариантное проектирование которых позитивно отражается на эффективности их модификаций, а расчет оптимальной компоновки составных сечений делает такой эффект более ощутимым.

## 2. Методы

В терминах теории оптимального проектирования целевая функция (минимум площади расчетного сечения) для сварных двутавров имеет вид

$$A_{\Sigma} = A_{f1} + A_{f2} + A_w \rightarrow \min,$$

где  $A_{\Sigma}$  – суммарная площадь сечения;  $A_{f1}$  – площадь сжатой полки;  $A_{f2}$  – площадь растянутой полки;  $A_w$  – площадь стенки [12. С. 104].

При расчете тонкостенных сечений балок решена оптимизационная задача изготовить (согнуть) швеллер, имеющий максимальный момент сопротивления  $W_{\max}$ , из полосы шириной  $S$ , толщиной  $t$  и площадью поперечного сечения  $A$  (рис. 5):

$$h = 3S/4 \text{ и } b = h/6,$$

где  $h$  – высота расчетного сечения, а  $b$  – ширина его полок [32. С. 60–61].

К такому же итогу привел сравнительный расчет оптимальных параметров гнутых и гнутозамкнутых швеллеров, где для вывода целевой функции и решения уравнения после определения ее производной учтены две постоянные величины:  $A = \text{const}$  и  $t = \text{const}$  (площадь сечения и толщина листовой заготовки) [19].

Оперирование этими константами позволяет оптимизировать расчетные сечения разных конфигураций, а их отношение обеспечивает контроль над протяженностями средних (срединных) линий оптимизируемых сечений, ограничивая предельно допустимое развитие остаточных (неупругих) деформаций при перепрофилировании [33]. Последнее обстоятельство особенно значимо для ЛСТК, так как их толщины, как правило, ограничены четырехмиллиметровым размером [34–36. С. 5].

Специфика оптимизации двутавровых ГЗП заключается в необходимости учитывать возможность компоновки в одном и том же составном сечении листовых заготовок разных толщин, включая их унификацию с точно такими же заготовками для швеллерных ГЗП. Кроме того, плоские периферийные грани у трубчатых полок гнутозамкнутых двутавров могут быть изготовлены из более прочного материала, а это открывает определенные перспективы для бистальных балок и 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 [1. С. 82].

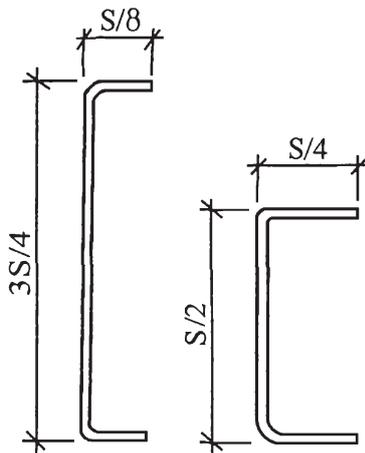


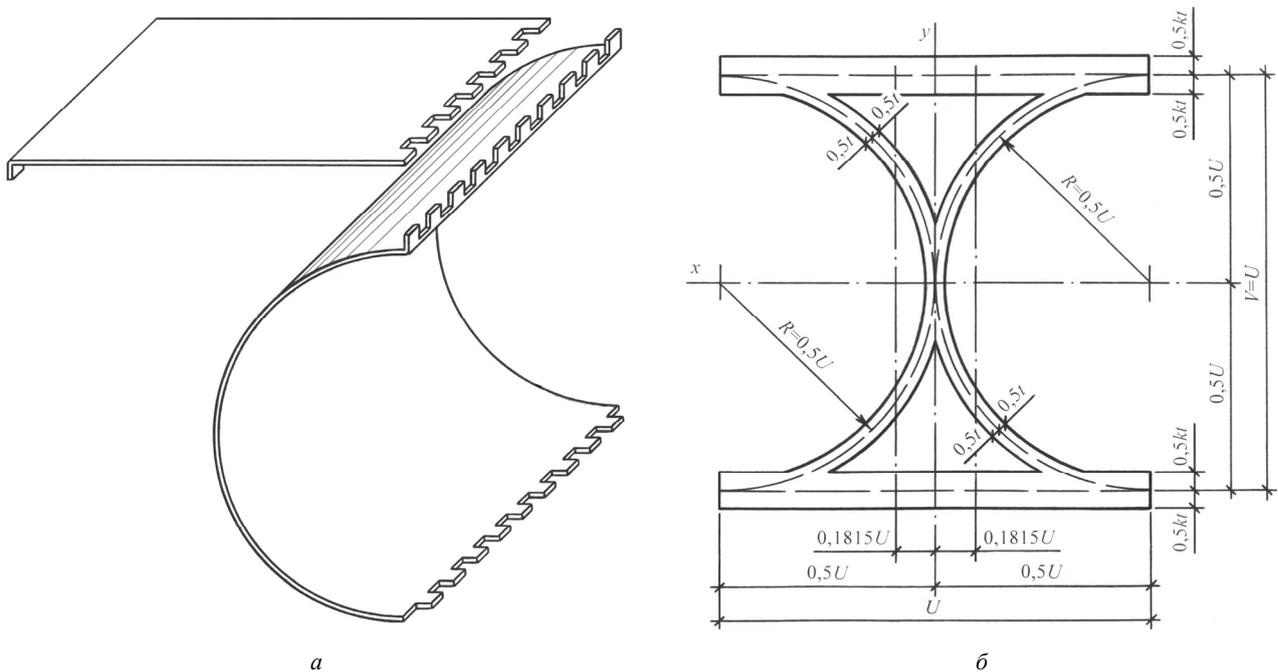
Рис. 5. Расчетные схемы гнутых швеллеров  
[Figure 5. Design schemes of bent channels]

### 2.1. Расчет двутавровых ГЗП с одинаковыми параметрами по ширине и высоте

Двутавровые ГЗП с трубчатыми полками имеют довольно универсальное техническое решение, применение которого в деле обеспечивает их производство как с зубчатыми замыканиями, так и со сварными, болтовыми или заклепочными соединениями. Если использовать в качестве конструкционного материала тонколистовую оцинкованную сталь, то параметры зубцов продольных кромок их листовых заготовок необходимо подобрать таким образом, чтобы одним зигзагообразным резом формировать кромки сразу двух заготовок (рис. 6, а). Тогда издержки производства из дорогостоящего материала и дополнительные затраты будут минимальными.

Для количественной оценки ресурсов несущей способности двутаврового ГЗП необходимо рассчитать площадь  $A$ , а также моменты инерции его сечения  $I_x$  и  $I_y$  относительно главных центральных осей. Сечение такого профиля можно считать составной фигурой, включающей пару круглых полуколец тол-

щиной  $t$  и радиусом  $0,5U$  с парой прямоугольников размерами  $t \times U$ , где  $U$  – размер ГЗП по ширине;  $V$  – размер того же профиля по высоте,  $V = U$  (рис. 6, б). Расчетные выкладки при этом допустимо выполнять по средней (срединной) линии тонкостенного сечения без учета его угловых закруглений и численных величин, содержащих значения толщины, возведенной во вторую и третью степень ( $t^2$ ,  $t^3$ ) [37].



**Рис. 6.** Аксонометрия листовых заготовок двутаврового ГЗП (а) и расчетная схема его поперечного сечения нетто (б)  
**[Figure 6.** Axonometry of the sheet billets of I-shaped BCP (a) and design diagram of its net cross section (b)]

Поперечное сечение внутренней грани двутаврового ГЗП представляет собой круглое полукольцо, к которому вполне применимы расчетные формулы, протестированные при оптимизации параметров полуплоскоовальных труб для ферменных и балочных конструкций [38]:

$$x_{0,пк} = 0,36304R = 0,1815U; \quad I_{x,пк} = 1,57tR^3 = 0,196250tU^3;$$

$$I_{y,пк} = 0,2961146tR^3 = 0,0370143tU^3; \quad A_{пк} = 3,14tR = 1,57tU,$$

где  $x_{0,пк}$ ,  $I_{x,пк}$ ,  $I_{y,пк}$ ,  $A_{пк}$  – абсцисса центра тяжести, моменты инерции относительно осей  $x-x$  и  $y-y$ , площадь сечения полукольца соответственно;  $R$  – радиус полукольца по средней линии его сечения,  $R = 0,5U$ ;  $t$  – толщина полукольца, равная толщине грани.

Расчетная площадь сечения нетто двутаврового ГЗП складывается из расчетных площадей сечений нетто двух полуколец и двух прямоугольных участков полок:

$$A = tU(2 \times 1,57 + 2 \times 1) = 5,14tU.$$

Моменты инерции расчетного сечения нетто двутаврового ГЗП относительно центральных осей:

$$I_x = tU^3(2 \times 0,196250 + 2 \times 1,0 \times 0,5^2) = 0,89250tU^3;$$

$$I_y = tU^3(2(0,0370143 + 1,57 \times 0,1815^2) + 2 \times 1^3 / 12) = 0,344134tU^3.$$

Момент сопротивления расчетного сечения нетто двутаврового ГЗП в плоскости конструкции:

$$W_x = 2I_x / V = 2 \times 0,89250tU^3 / U = 1,7850tU^2.$$

Возможна контрольная проверка полученных значений, если условно принять, что гнутозамкнутый двутавр с отношением размеров по ширине и высоте  $n = U / V = 1 / 1$  скомпонован из двух таких же швеллеров с отношением размеров по ширине и высоте  $n = U / V = 1 / 2$ , из которых изъяты вертикальные грани (стенки):

$$A = 2A_1 = 2 \times 7,14tU_1 - 2 \times 2tU_1 = 10,28tU_1 = 10,28t \times 0,5U = 5,14tU;$$

$$I_x = 2I_{x1} - 2tV_1^3 / 12 = 2 \times 4,2366666tU_1^3 - 2t(2U_1)^3 / 12 = 7,1399999tU_1^3 = \\ = 7,1399999t(0,5U)^3 = 0,8924999tU^3 \approx 0,89250tU^3;$$

$$I_y = 2(I_{y1} + A_1x_{01}^2) = 2(0,7352826tU_1^3 + 7,14tU_1(0,29974U_1)^2) = 2,7535374tU_1^3 = \\ = 2,7535374t(0,5U)^3 = 0,344192tU^3,$$

где  $A_1$ ,  $U_1$ ,  $V_1$ ,  $I_{x1}$ ,  $I_{y1}$ ,  $x_{01}$  – площадь сечения, ширина ( $U_1 = 0,5U$ ), высота, момент инерции сечения относительно оси  $x-x$ , момент инерции сечения относительно оси  $y-y$ , абсцисса центра тяжести сечения швеллерного ГЗП соответственно.

Как видно, вычисленные величины практически не разнятся между собой и их можно использовать в дальнейших расчетах.

Если принять, что площадь сечения и толщина исходной заготовки являются постоянными величинами ( $A = \text{const}$ ,  $t = \text{const}$ ), а отношение размеров по ширине и высоте в общем случае не является постоянным ( $n = U / V \neq \text{const}$ ), то расчетные параметры двутаврового ГЗП при  $n = U / V = 1 = 1 / 1$  можно переписать следующим образом:

$$A = 5,14tU; \quad U = V = A / (5,14t) = 0,1945525A / t;$$

$$I_x = 0,89250t(0,1945525A / t)^3 = 0,0065722A^3 / t^2;$$

$$I_y = 0,344134t(0,1945525A / t)^3 = 0,0025341A^3 / t^2;$$

$$W_x = 2(0,0065722A^3 / t^2) / (0,1945525A / t) = 0,0675622A^2 / t,$$

где исходная заготовка подлежит зигзагообразному резу на четыре части (две полукольцевые и две плоские).

Практическое значение имеет дальнейшее 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 холодногнутох оцинкованных профилей и гофрированных листов [36. С. 16]. В данном случае этот размер составляет  $0,1U$ , где  $U$  – размер гнутозамкнутого профиля по ширине.

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

$$A_{gr} = A + \Delta A = 5,14tU + 4 \times 2 \times 0,1tU = 5,94tU;$$

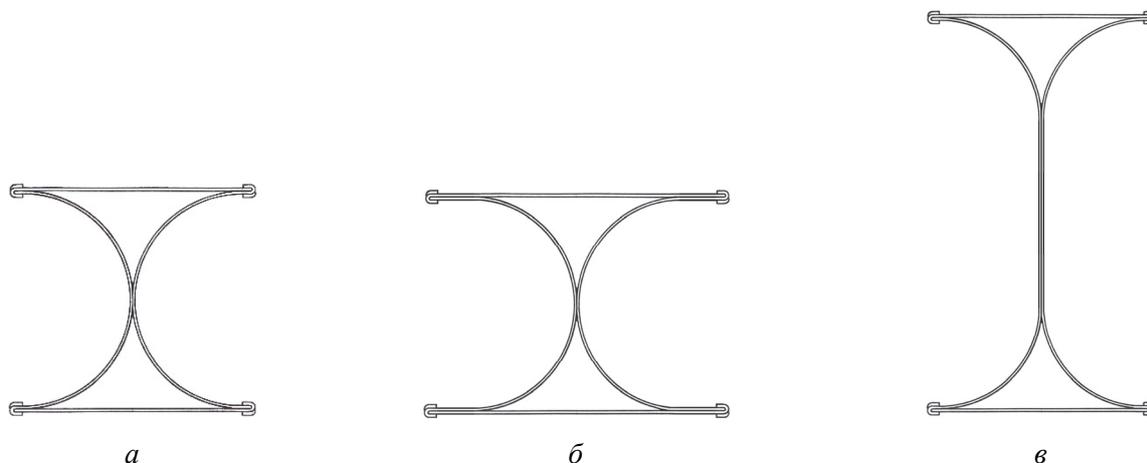
$$A / A_{gr} = 5,14 / 5,94 = 0,8653198 \approx 0,87,$$

что меньше ослаблений редуцированных сечений стержневых и балочных элементов ЛСТК, но больше, чем у гнутозамкнутого швеллера, поскольку количество этих креплений в таком же двутавре удвоилось.

В завершение расчета гнутозамкнутых двутавров из листовых заготовок одинаковых толщин остается добавить, что компоновка их составных сечений вполне допускает изготовление наиболее напряженных элементов, коими при изгибе чаще являются одна или обе плоские грани трубчатых полок, из высокопрочных материалов. Причем росту эффективности такой компоновки способствует ограниченность протяженности элементов из высокопрочных, но дорогостоящих материалов, не превышающей  $1 / 5,14 \dots 2 / 5,14$  периметра поперечного сечения.

## 2.2. Расчет двутавровых ГЗП с разными параметрами по ширине и высоте

Все приведенные выше расчетные выкладки относятся к двутавровым ГЗП со строго фиксированными параметрами, начиная с отношения размеров ширины и высоты, равного 1/1 (рис. 7, а).



**Рис. 7.** Схемы двутавровых ГЗП:  
 а – при  $n = U/V = 1/1$ ; б – при  $n = U/V > 1/1$ ; в – при  $n = U/V < 1/1$   
**[Figure 7.** Schemes of I-shaped BCP:  
 а – with  $n = U/V = 1/1$ ; б – with  $n = U/V > 1/1$ ; в – with  $n = U/V < 1/1$ **]**

При увеличении значений этого отношения можно заметить определенные изменения в контуре профилей, которые последовательно трансформируют их двутавровое очертание в Н-образное (рис. 7, б). Поэтому для продолжения оптимизационного расчета двутавровых ГЗП более предпочтительны те из них, у которых отношения габаритных размеров по ширине и высоте не превышают 1/1 (рис. 7, в). Тогда внешнее сходство двутавровых ГЗП со сварными и прокатными двутаврами более заметно, особенно с прокатной подкрановой балкой, имеющей повышенный технический ресурс за счет увеличения в 3,5 раза радиуса каждой из четырех выкружек (рис. 8, а) [39]. По определению, приведенному в Справочнике-словаре архитектурно-строительной энциклопедии, выкружка – это вогнутый профиль декора, а по очертанию и протяженности – это четверть окружности (рис. 8, б, в) [40]. Такое же сходство с гнутыми и прокатными швеллерами характерно для швеллерных ГЗП. Поэтому для оптимизации гнutoзамкнутых двутавров допустимо использовать уже апробированную методику приближенного расчета тонкостенного сечения по его средней линии без корректировки.

Сечение двутаврового ГЗП при  $n = U/V < 1/1$  можно считать составной фигурой (рис. 8, з) из пары трубчатых (замкнутых или полых) полок треугольного очертания, расположенных симметрично относительно вертикали (оси  $y - y$ ) и пары вертикальных прямоугольников стенки между ними. В свою очередь каждая из трубчатых полок в отдельности также представима составной фигурой из пары выкружек ( $R = 0,5U$ ) и горизонтального прямоугольника ( $t \times U$ ). Трубчатые полки соединены по вертикали парой равновысоких прямоугольников стенки (рис. 8, д):

$$2t \times (V - U) = 2tU((1/n) - 1).$$

За составную часть в виде половины полукольца (выкружки) можно принять фрагмент тонкостенного кольца с угловым параметром  $\alpha = 45^\circ = \pi/4 = 0,785$  из Справочника по сопротивлению материалов (рис. 8, б, в) [41]:

$$A_{\text{инк}} = 2\alpha tR = 2 \times 0,785tR = 1,57tR; \quad y_{0,\text{инк}} = R \sin \alpha / \alpha = R \times 0,7071 / 0,785 = 0,9008R;$$

$$I_{x,\text{инк}} = (2\alpha + \sin \alpha - 4 \sin^2 2\alpha / \alpha)tR^3 / 2 = (2 \times 0,785 + 1 - 4 \times 0,7071^2 / 0,785)tR^3 / 2 = 0,011115tR^3;$$

$$I_{y,\text{инк}} = (2\alpha - \sin 2\alpha)tR^3 / 2 = (2 \times 0,785 - 1)tR^3 / 2 = 0,2850tR^3,$$

где  $y_{0, \text{ПНК}}$ ,  $I_{x, \text{ПНК}}$ ,  $I_{y, \text{ПНК}}$ ,  $A_{\text{ПНК}}$ ,  $R$  – ордината центра тяжести сечения, момент инерции сечения относительно оси  $x-x$ , момент инерции сечения относительно оси  $y-y$ , площадь сечения половины полукольца и радиус половины полукольца по ее средней линии,  $R = 0,5U$ , соответственно.

Тогда расчетное сечение нетто двутаврового ГЗП будет иметь следующие характеристики:

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

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

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

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

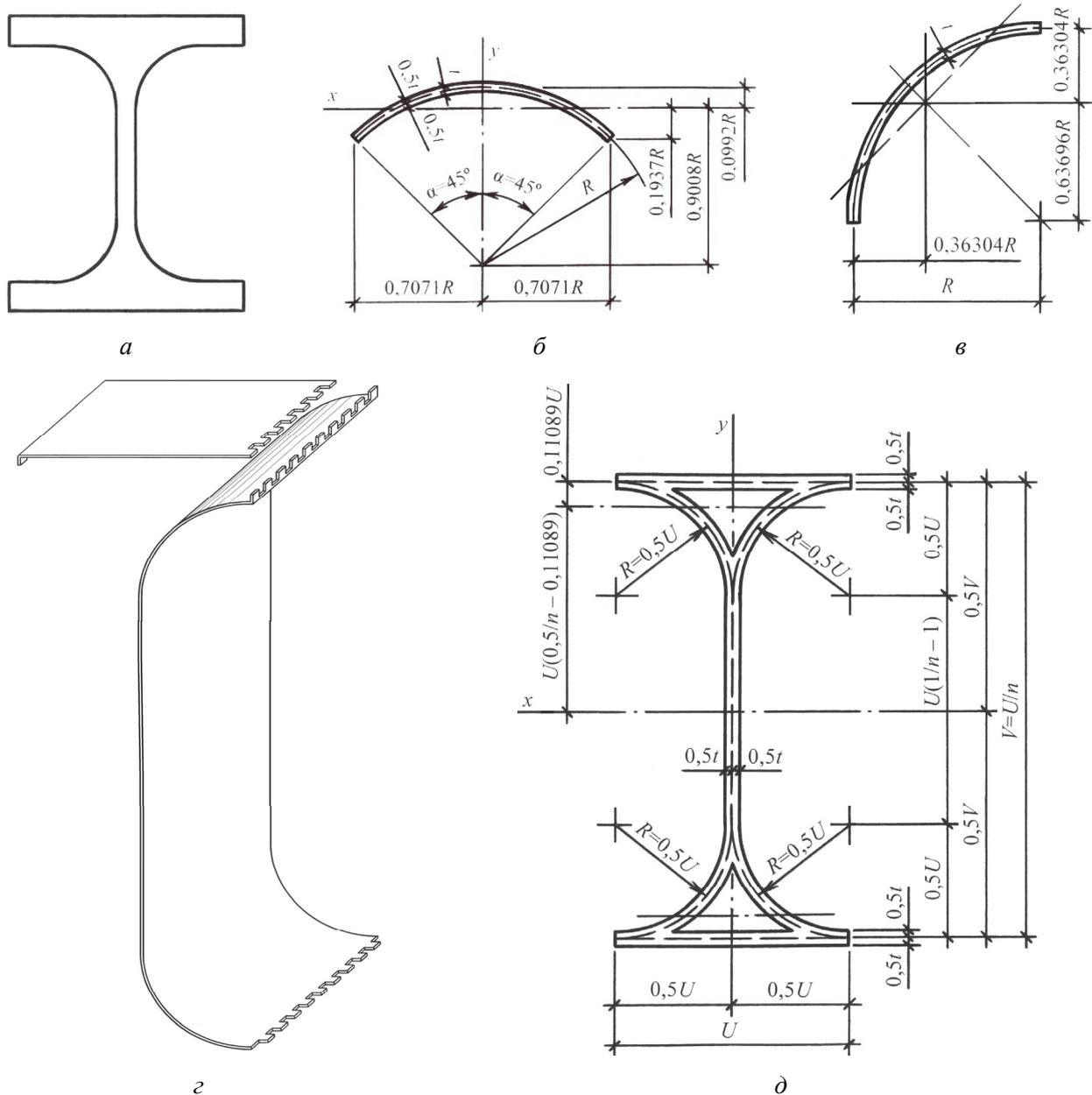


Рис. 8. Схемы для расчета двутаврового ГЗП:

$a$  – сечение прокатного двутавра;  $b, в$  – элементы составного сечения;  $г$  – аксонометрия листовых заготовок;  $д$  – расчетная схема сечения нетто

[Figure 8. Schemes for calculating the I-shaped BCP:

$a$  – section of a rolling I-shaped profile;  $b, в$  – elements of a composite section;  $г$  – axonometry of sheet blanks;  $д$  – design net cross section]

Если в полученные формулы подставить  $n = U / V = 1 / 1 = 1$ , то итоги численных выкладок практически совпадают с уже найденными значениями, что можно считать контрольной проверкой.

### 2.3. Оптимизационный расчет двутавровых ГЗП

В качестве критерия оптимизации для продолжения расчета двутаврового ГЗП целесообразно использовать максимум момента сопротивления его сечения в силовой плоскости несущей конструкции, который обеспечивает наибольший запас прочности при изгибе:

$$W_x = (A^2 / t)(0,3333332 / n^2 + 1,57 / n - 0,1399456 + 0,0216468n) / (2 / n + 3,14)^2,$$

где  $U^2 = (A^2 / t^2) / (2 / n + 3,14)^2$ ;  $A = \text{const}$ ,  $t = \text{const}$ .

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 четвертой степени

$$0,2134287n^4 + 0,5437676n^3 - 16,977527n^2 - 7,692628n + 2,093335 = 0$$

с корнями

$$n_1 = -10,077070; \quad n_2 = -0,6369426; \quad n_3 = 0,1916202; \quad n_4 = 7,9746209.$$

Из найденных корней практический интерес представляет третий, значение которого можно округлить до

$$n = 0,1916202 = 1 / 5,2186564 \approx 1 / 5,2.$$

Тогда расчетные параметры оптимизированного профиля составят:

$$A = tU(2 / n + 3,14) = tU(2 / 0,1916202 + 3,14) = 13,577312tU;$$

$$U = 0,0736522A / t; \quad V = 0,3843655A / t;$$

$$\begin{aligned} I_x &= tU^3(0,1666666 / n^3 + 0,785 / n^2 - 0,0699728 / n + 0,0108234) = \\ &= tU^3(0,1666666 / 0,1916202^3 + 0,758 / 0,1916202^2 - 0,0699728 / 0,1916202 + 0,0108234) = \\ &= 44,712624tU^3 = 44,712624t(0,0736522A / t)^3 = 0,0178643A^3 / t^2; \end{aligned}$$

$$I_y = 0,344134tU^3 = 0,344134t(0,0736522A / t)^3 = 0,0001372A^3 / t^2;$$

$$W_x = W_{x,\text{max}} = 2I_x / V = 2 \times 44,712624tU^3 / (5,2186564U) =$$

$$= 17,135684tU^2 = 17,197163t(0,0736522A / t)^2 = 0,092955A^2 / t.$$

Сравнивая расчетные параметры двутаврового ГЗП, полученные до и после оптимизации, можно убедиться в ее эффективности, поскольку с увеличением габарита по высоте в  $0,3843655 / 0,1945525 = 2$  раза момент инерции сечения в плоскости конструкции возрос в  $0,0178643 / 0,0065722 = 2,7$  раза, а момент сопротивления – в  $0,0932885 / 0,0675622 = 1,4$  раза.

К выявленной эффективности оптимизации двутаврового ГЗП на изгиб следует добавить уменьшение ослабления расчетного сечения нетто, что является следствием сужения оптимизированного профиля по ширине:

$$A_{gr} = A + \Delta A = 13,577312tU + 4 \times 2 \times 0,1tU = 14,377312tU;$$

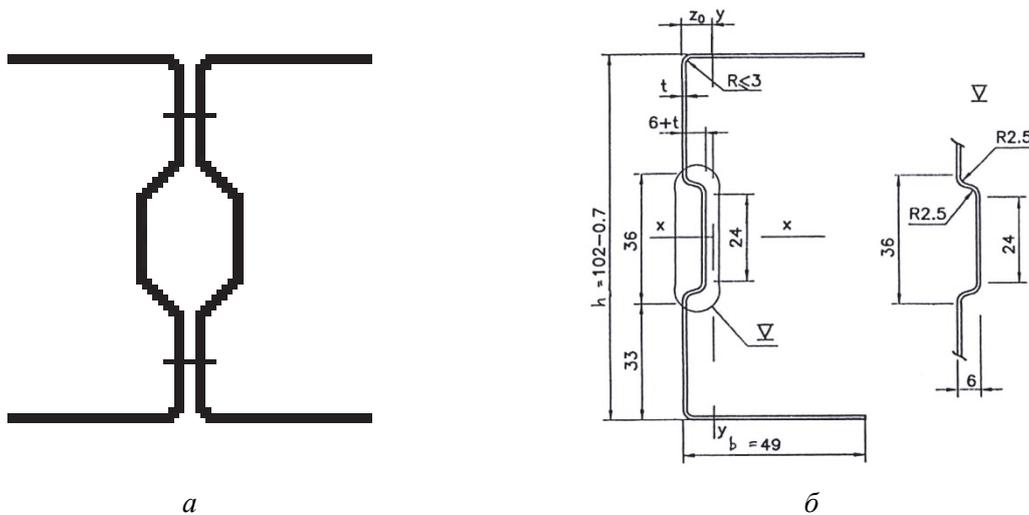
$$A / A_{gr} = 13,577312 / 14,377312 = 0,9443567 \approx 0,94.$$

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Реализация двутаврового ГЗП с одинаковыми параметрами по ширине и высоте

Пример реализации предлагаемого технического решения можно привести, если представить его гнуто-замкнутым двутавром с одинаковыми параметрами по ширине и высоте, а в качестве базового объекта для сравнения принять профиль составного сечения двутавровой формы, скомпонованный из парных элементов швеллерного очертания (рис. 9, а). Парные элементы представляют собой профили повышенной жесткости марок ПГС100Ш (профили гнутые стальные, номинальная высота – 100 мм, швеллерного типа) с отношением габаритных размеров по ширине и высоте  $b/h = 49/102 = 0,4803921 = 1/2,0816326 \approx 1/2$  (рис. 9, б) [42], что обеспечивает профилю базового объекта отношение размеров ширины и высоты, практически совпадающее с аналогичным отношением двутаврового ГЗП:

$$n = U/V = 2 \times 49/102 = 0,9607843 = 1/1,0408163 \approx 1/1.$$



**Рис. 9.** Схемы гнутых профилей:  
а – составного сечения двутавровой формы; б – швеллерного типа  
[Figure 9. Schemes of bent profiles:  
а – composite section of I-shaped; б – channel type]

Для начала примера реализации необходимо рассчитать профиль базового объекта, скомпонованного из пары самых тонкостенных гнутых элементов с сечением  $102 \times 49 \times 0,8$  мм:

$$A_{gr} = 2A_{grl} = 2 \times 1,60 = 3,20 \text{ см}^2 (100 \%); \quad A = 2A_l = 2 \times 1,33 = 2,66 \text{ см}^2 (100 \%);$$

$$I_x = 2I_{xl} = 2 \times 20,0 = 40,0 \text{ см}^4 (100 \%); \quad W_x = 2I_x / h = 2 \times 40 / 10,0 = 8,0 \text{ см}^3 (100 \%),$$

где эталонные (стоцентные) значения приняты для сопоставления с аналогичными величинами по предлагаемому техническому решению;  $A_l$ ,  $I_{xl}$ ,  $x_{0l}$  – соответственно площадь сечения, момент инерции сечения относительно оси  $x-x$ , а также абсцисса центра тяжести того же сечения, обозначенная на схеме как  $z_0$ , но пропущенная в расчетной таблице сортамента и найденная расчетным путем

$$x_{0l} = z_0 = (2 \times 3,3 \times 0,08 \times 0,04 + 2 \times 0,6 \times 0,08 \times 0,34 + 3,6 \times 0,08 \times 0,64 + 2 \times 4,9 \times 0,08 \times 2,45) / 1,60 = 1,35 \text{ см}.$$

Расчетные параметры двутаврового ГЗП с одинаковыми параметрами по ширине и высоте, альтернативного профилю базового объекта, составляют:

$$t = A_{gr} / (5,94U) = 3,20 / (5,94 \times 10,0) = 0,053872 \approx 0,05 \text{ см};$$

$$A_{gr} = 5,94 \times 0,05 \times 10,0 = 2,970 \text{ см}^2 (92,81 \ %);$$

$$A = 0,87 A_{gr} = 0,87 \times 2,97 = 2,584 \text{ см}^2 (97,14 \ %);$$

$$I_x = 0,0065722 A^3 / t^2 = 0,0065722 \times 2,584^3 / 0,05^2 = 45,36 \text{ см}^4 (113,4 \ %);$$

$$W_x = 2I_x / V = 2 \times 45,39 / 10,0 = 9,08 \text{ см}^3 (113,5 \ %).$$

Таблица 1

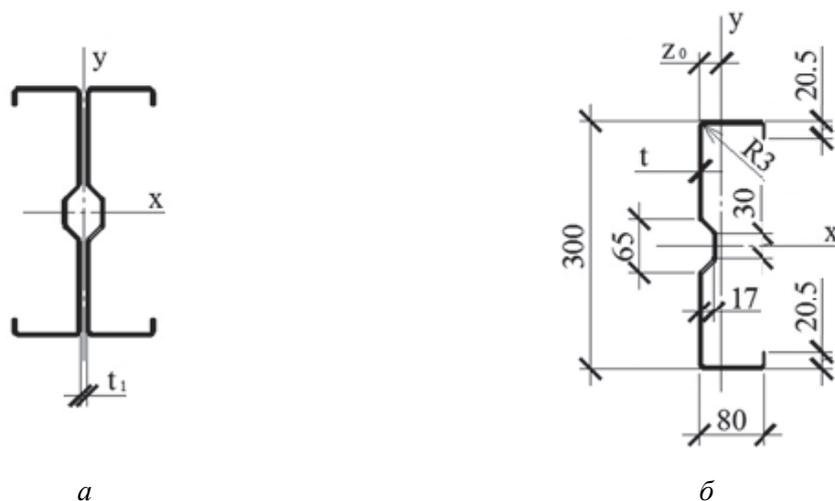
**Расчетные параметры гнутых и гнутозамкнутых профилей**  
 [Table 1. Design parameters of bent and bent closed profiles]

Профили [Profiles]	Характеристики сечений [Cross section characteristics]				
	$A, \text{ см}^2 [\text{sm}^2], \ %$	$A_{gr}, \text{ см}^2 [\text{sm}^2], \ %$	$A / A_{gr}$	$I_x, \text{ см}^4 [\text{sm}^4], \ %$	$W_x, \text{ см}^3 [\text{sm}^3], \ %$
2ПГС100Ш $t = 0,8 \text{ мм} [\text{mm}]$	2,66 100	3,20 100	0,831	40,0 100	8,0 100
ГЗП [ВСР] 100×100 $t = 0,5 \text{ мм} [\text{mm}]$	2,584 97,14	2,970 92,81	0,870	45,36 113,4	9,08 113,5

Из основных результатов сравнительного расчета, приведенных в табл. 1, следует, что замена профиля базового объекта на двутавровый ГЗП при прочих равных условиях сопровождается уменьшением расхода конструкционного материала и увеличением геометрических (статических) характеристик расчетного сечения нетто.

### 3.2. Реализация двутаврового ГЗП оптимальной компоновки

Еще один пример реализации предлагаемого технического решения можно привести, если представить его гнутозамкнутым двутавром оптимальной компоновки с отношением параметров по ширине и высоте 1 / 5, 2. За базовый объект для сравнения вполне допустим профиль составного сечения двутаврового очертания из парных элементов (рис. 10, а). Эти элементы представляют собой сигма-профили размера-ми 300×80×2 мм (рис. 10, б) [43].



**Рис. 10.** Схемы гнутых профилей:  
 а – составного сечения двутавровой формы; б –  $\Sigma$ -профиль  
 [Figure 10. Schemes of bent profiles:  
 а – composite section of I-shaped; б –  $\Sigma$ -profile]

Гнутый двутавр базового объекта, скомпонованный из пары сигма-профилей, имеет следующие расчетные параметры редуцированного сечения:

$$A_{gr} = 20,03 \text{ см}^2 (100 \ %); \quad A = 11,63 \text{ см}^2 (100 \ %);$$

$$I_x = 753,25 \text{ см}^4 (100 \ %); \quad W_x = 32,70 \text{ см}^3 (100 \ %),$$

где эталонные (стоцентные) значения приняты для сопоставления с аналогичными величинами по предлагаемому техническому решению.

Расчетные параметры двутаврового ГЗП оптимальной компоновки (с отношением размеров по ширине и высоте 1/5,2), альтернативного гнутому двутавру базового объекта, составляют:

$$U = nV = 0,1916202 \times 300 = 57,48606 \approx 57,5 \text{ мм};$$

$$t = A_{gr} / (14,377312U) = 20,03 / (14,377312 \times 5,75) = 0,2422899 \approx 0,24 \text{ см};$$

$$A_{gr} = 14,377312 \times 0,24 \times 5,75 = 19,84069 \approx 19,84 \text{ см}^2 (99,05 \ %);$$

$$A = 13,577312tU = 13,577312 \times 0,24 \times 5,75 = 18,73669 \approx 18,74 \text{ см}^2 (161,1 \ %);$$

$$I_x = 0,0178643A^3 / t^2 = 0,0178643 \times 18,74^3 / 0,24^2 = 2041,14 \text{ см}^4 (271,0 \ %);$$

$$W_x = 2I_x / V = 2 \times 2041,14 / 30,0 = 136,076 \text{ см}^3 (416,1 \ %).$$

Таблица 2

Расчетные параметры гнутых и гнутозамкнутых профилей  
[Table 2. Design parameters of bent and bent closed profiles]

Профили [Profiles]	Характеристики сечений [Cross section characteristics]				
	$A, \text{ см}^2 [\text{см}^2], \ %$	$A_{gr}, \text{ см}^2 [\text{см}^2], \ %$	$A / A_{gr}$	$I_x, \text{ см}^4 [\text{см}^4], \ %$	$W_x, \text{ см}^3 [\text{см}^3], \ %$
2Σ 300×80 $t = 2,0 \text{ мм} [\text{мм}]$	11,63 100	20,03 100	0,581	753,25 100	32,70 100
ГЗП [ВСП] 300×57,5 $t = 2,4 \text{ мм} [\text{мм}]$	18,74 161,1	19,84 99,05	0,945	2041,14 271,0	136,076 416,1

Как видно из табл. 2, расчетный переход от составных двутавров из сигма-профилей к двутавровым ГЗП оптимальной компоновки приводит, с одной стороны, к уменьшению расхода конструкционного материала, а с другой стороны – к увеличению геометрических (статических) характеристик и, как следствие, росту несущей способности.

В целом такой итог представляется достаточно корректным обоснованием перспективности предлагаемых профилей для их дальнейшей проработки и оптимизации применительно к несущим конструкциям зданий и сооружений.

#### 4. Заключение

Расчетные параметры двутавровых ГЗП в зависимости от отношения параметров ширины и высоты по новому техническому решению и основные результаты их оптимизации более наглядны на графиках (рис. 11), где на оси ординат для единиц измерений использованы обозначения площади сечения и толщины листовой полосы, подлежащей зигзагообразному резу на четыре заготовки:  $A = \text{const}$ ,  $t = \text{const}$ .

Итоговые графики позволяют сделать некоторые выводы и обобщения.

1. Двутавровый ГЗП с двойной стенкой и двумя трубчатыми полками из листовых заготовок одинаковой толщины имеет компактное сечение, момент сопротивления которого максимален при отношении размеров ширины и высоты, равном 1/5,2 по средней линии расчетного сечения. При этом внутренние грани его стенки и полки имеют в разрезе форму плоскооувального полукольца.

2. Двутавровый ГЗП с двойной стенкой и двумя трубчатыми полками из листовых заготовок разных толщин может оказаться не менее рациональным и эффективным, чем такой же ГЗП из листовых загото-

вок одинаковой толщины. В частности, практический интерес представляет продолжение расчета оптимальной компоновки составного сечения такого профиля в пределах всего интервала отношения толщин.

3. 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. Расчетные параметры такого профиля обладают фиксированными значениями, при которых ширина равна радиусу, высота – диаметру полукольцевой грани, а величина этих фиксированных значений зависит от отношения толщин его полки и стенки. Если развивать 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.

4. Двутавровые ГЗП с трубчатыми полками по новому техническому решению достаточно рациональны и эффективны. Они достаточно универсальны для оптимального проектирования бистальных и перфорированных вариантов. Вполне очевидна также их перспективность в легких тонкостенных конструкциях зданий и сооружений, технико-экономические характеристики которых можно повысить за счет дополнительной оптимизации листовых заготовок, унифицированных для швеллерных и двутавровых профилей.

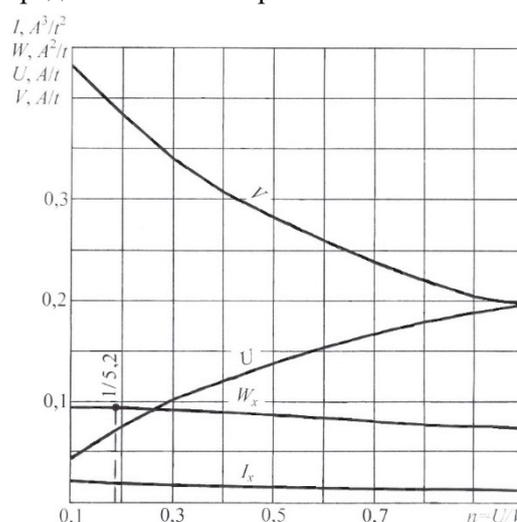


Рис. 11. Графики расчетных параметров двутавровых ГЗП в зависимости от отношения размеров их ширины и высоты  
 [Figure 11. Graphs of the design parameters of I-shaped BCP in depending on the ratio of their width and height sizes]

### Список литературы

1. Мельников Н.П. Металлические конструкции: современное состояние и перспективы развития. М.: Стройиздат, 1983. 546 с.
2. Ляхович Л.С., Акимов П.А., Тухфатуллин Б.А. Критерий оценки оптимальных решений при формировании кусочно-постоянных участков полки двутаврового поперечного сечения при ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний // Вестник ТГАСУ. 2020. Т. 22. № 1. С. 92–105. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-1-92-105>
3. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Optimal solutions for creations in rods with piecewise constant cross-sections with stability constraints or constraints for value of the first natural frequency. Part 2. Numerical examples // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2019. Vol. 15. No. 4. Pp. 101–110.
4. Перельмутер А.В. Конструктивная форма номер один // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2012. № 1. С. 27–39.
5. Ведяков И.И., Конин Д.В. О совершенствовании отечественных сортов двутавровых профилей с параллельными гранями полки и развитии норм проектирования современных металлических конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. № 3. С. 50–56.
6. 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.
7. Sun Y., Zhao O. Material response and local stability of high-chromium stainless steel welded I-sections // Engineering Structures. 2019. No. 178. Pp. 212–226. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.024>
8. Нежданов К.К., Кузьмишкин А.А., Рубликов С.Г. Эффективный прокатный профиль // Известия вузов. Строительство. 2006. № 1. С. 105–108.
9. Патент РФ № 2232125. Балка / К.К. Нежданов, В.А. Туманов, А.К. Нежданов, А.С. Лаштанкин. 2004. Бюл. № 19. URL: [https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=REPAT&DocNumber=21895068&TypeFile=html](https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=REPAT&DocNumber=21895068&TypeFile=html) (дата обращения: 24.04.2020).
10. Брудка Я., Лубиньски М. Легкие стальные конструкции. М.: Стройиздат, 1974. С. 199–201.
11. Патент РФ № 176462. Многопролетная балка / В.В. Веселов, А.М. Федоров. 2018. Бюл. № 2. URL: [https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPM&DocNumber=176462&TypeFile=html](https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=176462&TypeFile=html) (дата обращения: 24.04.2020).
12. Катюшин В.В. Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения. М.: АСВ, 2018. 1072 с.
13. United States Patent No. 1360720. Metal construction / E.E. Brown, D.J. Mooney. 1920, Nov. 30.

14. Патент РФ № 2043467. Сборно-разборная двутавровая балка с полыми полками / М.Е. Докторова. 1995. Бюл. № 24. URL: [https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2043467&TypeFile=html](https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2043467&TypeFile=html) (дата обращения: 24.04.2020).
15. Авторское свидетельство СССР № 314364. Двутавровая балка / А. Лантернье. 1971. Бюл. № 27. URL: [https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=314364&TypeFile=html](https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=314364&TypeFile=html) (дата обращения: 24.04.2020).
16. United States Patent No. 5501053. Interengageable structural members / L.D. Goleby. 1996, Mar. 26.
17. United States Patent No. 3342007. Structural member / K.J.W. Merson. 1967, Sept. 19.
18. Патент РФ № 2685013. Швеллерный гнутозамкнутый профиль / А.С. Марутян. 2019. Бюл. № 11. URL: [https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2685013&TypeFile=html](https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2685013&TypeFile=html) (дата обращения: 24.04.2020).
19. *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://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-6-415-432>
20. Патент РФ № 2680560. Двутавровый гнутозамкнутый профиль (варианты) / А.С. Марутян. 2019. Бюл. № 6. URL: [https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2680560&TypeFile=html](https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2680560&TypeFile=html) (дата обращения: 24.04.2020).
21. *Белов Г.И.* К расчету на прочность стержневых элементов легких стальных конструкций при многопараметрическом нагружении // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. № 4. С. 13–17. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-4-13-17.
22. *Yousefi A.M., Lim J.B.P., 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. No. 152. Pp. 12–28. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.03.032.
23. *Jun Ye, Hajirasouliha I., Becque J.* Experimental investigation of local-flexural interactive buckling of cold-formed steel channel columns // *Twin-Walled Structures*. 2019. No. 125. Pp. 245–258. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.01.020>
24. *Марутян А.С.* Гнутозамкнутые профили и расчет их оптимальных параметров // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2019. Т. 15. № 1. С. 33–43. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-1-33-43>
25. *Roy K., Mohammadjani Ch., Lim J.B.P.* Experimental and numerical investigation into the behaviour of face-to-face built-up cold-formed steel channel sections under compression // *Thin-Walled Structures*. 2019. No. 134. Pp. 291–309. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.09.045>
26. *Jun Ye, Becque J., Hajirasouliha I., Mojtabaei S.M., Lim J.B.P.* Development of optimum cold-formed steel sections for maximum energy dissipation in uniaxial bending // *Engineering Structures*. 2018. No. 161. Pp. 55–67. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.01.070.
27. *Anbarasu M., Adil Dar M.* Improved design procedure for battened cold-formed steel built-up columns composed of lipped angles // *Journal of Constructional Steel Research*. 2020. No. 164. Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105781.
28. *Корсун Н.Д., Простакишина Д.А.* Применение легких тонкостенных конструкций как способ энергосбережения в стальном строительстве // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. № 5. С. 83–89. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-5-83-89.
29. *Кузнецов И.Л., Гайнетдинов Р.Г.* Болтовой узел соединения холодногнутого профиля с трапециевидной стенкой с применением сплошных втулок // *Известия КГАСУ*. 2020. № 1. С. 85–92.
30. 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](https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2478764&TypeFile=html) (дата обращения: 24.04.2020).
31. *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. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.12.021>
32. *Москалев Н.С., Попова Р.А.* Стальные конструкции легких зданий. М.: АСВ, 2003. С. 60–61.
33. *Марутян А.С.* Новый способ перепрофилирования круглых труб и расчет оптимальных параметров для балочных конструкций // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2018. № 1. С. 66–72.
34. *Морозов Ю.А.* Исследование предельных деформации листовой вытяжки с учетом пластического утонения и разрушения материала // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2019. Т. 15. № 5. С. 353–359. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-353-359>
35. *Скляднеев А.И., Попова Г.Н.* Оптимальное сечение симметричного двутавра при развитии пластических деформаций и совместном действии продольной силы и изгибающего момента // *Вестник ВолгГАСУ. Серия: Стр-во и архит.* 2013. Вып. 34 (53). С. 57–61.
36. СП 260.132555800.2016. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутого оцинкованного профиля и гофрированных листов. Правила проектирования / Минстрой России. М., 2016. 124 с.
37. *Марутян А.С.* Оптимизация конструкций из трубчатых (гнуто сварных) профилей квадратных (прямоугольных) и ромбических сечений // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2016. № 1. С. 30–38.
38. *Марутян А.С.* Расчет оптимальных параметров полуплоскоовальных труб для ферменных и балочных конструкций // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2019. № 2. С. 68–74.

39. Нежданов К.К., Гарькин И.Н. Подкрановая балка с повышенным техническим ресурсом эксплуатации // Региональная архитектура и строительство. 2017. № 3. С. 119–122.
40. Архитектурно-строительная энциклопедия: справочник-словарь / под ред. А.Б. Голышева. М.: АСВ, 2006. С. 53.
41. Справочник по сопротивлению материалов / под ред. Г.С. Писаренко. Киев: Наукова думка, 1988. С. 68–69.
42. Рекомендации по проектированию, изготовлению монтажу ограждающих и несущих конструкций из стальных гнутых профилей повышенной жесткости. М.: ЦНИИПСК имени Н.П. Мельникова, 1999. С. 8–11.
43. 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. Melnikov N.P. *Metallicheskie konstruksii: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Metal constructions: current status and development prospects]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1983. (In Russ.)
2. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. A criterion for evaluating optimal solutions in the formation of piecewise constant sections of a flange of an I-beam with limited stability or the value of the first frequency of natural vibrations. *Vestnik TGASU*. 2020;22(1):92–105. (In Russ.) <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-1-92-105>
3. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Optimal solutions for creations in rods with piecewise constant cross-sections with stability constraints or constraints for value of the first natural frequency. Part 2. Numerical examples. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019;15(4):101–110. DOI: 10.22337/2587-9618-2019-15-4-101-110. (In Russ.)
4. Perelmuter A.V. Constructive form number one. *Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture*. 2012;1:27–39. (In Russ.)
5. Vedyakov I.I., Konin D.V. On the improvement of domestic assortments of I-profiles with parallel flange faces and the development of design standards for modern metal structures. *Structural Mechanics and Structural Analysis*. 2014;3:50–56. (In Russ.)
6. Vedyakov I.I., Konin D.V., Ereemeev P.G. Development of a new assortment (GOST R) for the production of I-beams with wide shelves. *Building materials, equipment, technologies of the XXI century*. 2017;3–4:40–43. (In Russ.)
7. Sun Y., Zhao O. Material response and local stability of high-chromium stainless steel welded I-sections. *Engineering Structures*. 2019;178:212–226. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.024>
8. Nezhdanov K.K., Kuzmishkin A.A., Publishing S.G. Effective rolling profile. *News of higher educational institutions. Construction*. 2006;1:105–108. (In Russ.)
9. Nezhdanov K.K., Tumanov V.A., Nezhdanov A.K., Lashtankin A.S. *Balka* [Beam]. Russian Federation patent No. 2232125. 2004. Bull. No. 19. (In Russ.) Available from: [https://www1.fips.ru/register-doc-view/fips\\_servlet?DB=REPAT&DocNumber=21895068&TypeFile=html](https://www1.fips.ru/register-doc-view/fips_servlet?DB=REPAT&DocNumber=21895068&TypeFile=html) (accessed: 24.04.2020).
10. Brudka J., Lubinski M. *Legkie stal'nye konstruksii* [Lightweight steel structures]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1974. p. 199–201. (In Russ.)
11. Veselov V.V., Fedorov A.M. *Mnogoproletnaya balka* [Multi-span beam]. Russian Federation patent No. 176462. 2018. Bull. No. 2. (In Russ.) Available from: [https://www.fips.ru/register-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPM&DocNumber=176462&TypeFile=html](https://www.fips.ru/register-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=176462&TypeFile=html) (accessed: 24.04.2020).
12. Katyushin V.V. *Zdaniya s karkasami iz stal'nykh ram peremennogo secheniya* [Buildings with frames from steel frames of variable section]. Moscow: ASV Publ.; 2018. (In Russ.)
13. Brown E.E., Mooney D.J. *Metal construction*. United States Patent No. 1360720. 1920, Nov. 30.
14. Doktorova M.E. *Sborno-razbornaya dvutavrovaya balka s polymi polkami* [Collapsible I-beam with hollow shelves]. Russian Federation patent No. 2043467. 1995. Bull. No. 24. (In Russ.) Available from: [https://www.fips.ru/register-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2043467&TypeFile=html](https://www.fips.ru/register-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2043467&TypeFile=html) (accessed: 24.04.2020).
15. Lanternier A. *Dvutavrovaya balka* [I-beam]. USSR author's certificate No. 314364. 1971. Bull. No. 27. (In Russ.) Available from: [https://www.fips.ru/register-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=314364&TypeFile=html](https://www.fips.ru/register-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=314364&TypeFile=html) (accessed: 24.04.2020).
16. Goleby L.D. *Interengageble structural members*. United States Patent No. 5501053. 1996, Mar. 26.
17. Merson K.J.W. *Structural member*. United States Patent No. 3342007. 1967, Sept. 19.
18. Marutyanyan A.S. *Shvellernyi gnutozamknutyi profil* [Channel bent closed profile]. Russian Federation patent No. 2685013. 2019. Bull. No. 11. (In Russ.) Available from: [https://www.fips.ru/register-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2685013&TypeFile=html](https://www.fips.ru/register-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2685013&TypeFile=html) (accessed: 24.04.2020).
19. Marutyanyan A.S. Comparative calculation of optimal parameters of channel bent and bent closed profiles. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019;15(6):415–432. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-6-415-432>.
20. Marutyanyan A.S. *Dvutavrovyyi gnutozamknutyi profil* (varianty) [I-beam bent closed profile (options)]. Russian Federation patent No. 2680560. 2019. Bull. No. 6. (In Russ.) Available from: <https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/013/%D0%98%D0%97-02685013-00001/document.pdf> (accessed: 24.04.2020).

21. Belov G.I. To the calculation of the strength of the core elements of light steel structures with multi-parameter loading. *Bulletin of civil engineers*. 2019;4:13–17. (In Russ.)
22. Yousefi A.M., Lim J.B.P., 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. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.03.032.
23. Jun Ye, Hajirasouliha I., Becque J. Experimental investigation of local-flexural interactive buckling of cold-formed steel channel columns. *Twin-Walled Structures*. 2019;125:245–258. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.01.020>
24. Marutyan A.S. Bent profiles and calculation of their optimal parameters. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019;15(1):33–43. (In Russ.)
25. Roy K., Mohammadjani Ch., Lim J.B.P. Experimental and numerical investigation into the behavior of face-to-face built-up cold-formed steel channel sections under compression. *Thin-Walled Structures*. 2019;134:291–309. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.09.045>
26. Jun Ye, Becque J., Hajirasouliha I., Mojtabaei S.M., Lim J.B.P. Development of optimum cold-formed steel sections for maximum energy dissipation in uniaxial bending. *Engineering Structures*. 2018;161:55–67. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.01.070.
27. Anbarasu M., Adil Dar M. Improved design procedure for battened cold-formed steel built-up columns composed of lipped angles. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020;164:1–13. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105781.
28. Korsun N.D., Prostakishina D.A. The use of light thin-walled structures as a way of energy saving in steel construction. *Bulletin of civil engineers*. 2019;5:83–89. (In Russ.)
29. Kuznetsov I.L., Gaynetdinov R.G. Bolt assembly of cold-formed sections with a trapezoidal wall using continuous bushings. *News of KGASU*. 2020;1:85–92. (In Russ.)
30. Endzhiievsky L.V., Tarasov A.V., Tarasov I.V. *Gnutyi stal'noi profil' i sostavnoi stroitel'nyi element na ego osnove* [Bent steel profile and composite building element based on it]. Russian Federation patent No. 2478764. 2013. Bull. No. 10. (In Russ.) Available from: [https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2478764&TypeFile=html](https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2478764&TypeFile=html) (accessed: 24.04.2020).
31. Jun Ye, Hajirasouliha I., Becque J., Pilakoutas K. Development of more efficient cold-formed steel channel sections in bending. *Thin-Walled Structures*. 2016;101:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.12.021>
32. Moskalev N.S., Popova R.A. *Stal'nye konstrukcii legkih zdaniy* [Steel structures of light buildings]. Moscow: ASV Publ.; 2003. (In Russ.)
33. Marutyan A.S. A new way of reprofiling round pipes and calculating optimal parameters for beam structures. *Structural Mechanics and Structural Analysis*. 2018;1:66–72. (In Russ.)
34. Morozov Yu.A. Investigation of the ultimate deformation of sheet hoods taking into account plastic thinning and fracture of the material. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019;15(5):353–359. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-353-359>
35. Sklyadnev A.I., Popova G.N. The optimal section of a symmetric I-beam during the development of plastic deformations and the combined action of longitudinal force and bending. *Bulletin of VolgGASU. Series: Construction and architecture*. 2013;34(53):57–61. (In Russ.)
36. SP 260.132555800.2016. *Konstruksii stal'nye tonkostennye iz kholodnognutykh otsinkovannykh profilei i gofirovannykh listov. Pravila proektirovaniya* [Thin-walled steel structures made of cold-formed galvanized profiles and corrugated sheets. Design Rules]. Moscow: Ministry of Construction of Russia Publ.; 2016. (In Russ.)
37. Marutyan A.S. Optimization of structures from tubular (bent-welded) profiles of square (rectangular) and rhombic sections. *Construction Mechanics and Structural Analysis*. 2016;1:30–38. (In Russ.)
38. Marutyan A.S. Calculation of optimal parameters of half-flat pipe for truss and beam structures. *Structural mechanics and calculation of structures*. 2019;2:68–74. (In Russ.)
39. Nezhdanov K.K., Garkin I.N. Crane beam with increased technical service life. *Regional architecture and construction*. 2017;3:119–122. (In Russ.)
40. Golysheva A.B. (Ed.). *Arkhitekturno-stroitel'naya entsiklopediya: spravochnik-slovar'* [Architecture and Construction Encyclopedia: Reference Dictionary]. Moscow: ASV Publ.; 2006. (In Russ.)
41. Pisarenko G.S. (Ed.). *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook of resistance to materials]. Kiev: Naukova Dumka Publ.; 1988. p. 68–69. (In Russ.)
42. *Rekomendatsii po proektirovaniyu, izgotovleniyu montazhu ograzhdayushchikh i nesushchikh konstruksii iz stal'nykh gnutnykh profilei povyshennoi zhestkosti* [Recommendations for the design, manufacture of installation of enclosing and supporting structures from steel bent profiles of increased rigidity]. Moscow: TSNIIPSK imeni N.P. Melnikova Publ.; 1999. p. 8–11. (In Russ.)
43. Korsun N.D., Prostakishina D.A. Analiz NDS sostavnogo secheniya iz tonkostennykh profilej s uchetom nachal'nykh geometricheskikh nesovershenstv [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.)