УДК 624.072.2.014.2-415

© М. О. Смирнов, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: smirnov.maxim.sk@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-2-60-67

© М. О. Smirnov, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)
E-mail: smirnov.maxim.sk@gmail.com

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДУЦИРОВАННЫХ СЕЧЕНИЙ СТЕРЖНЕЙ ИЗ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРИ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ЗАГРУЖЕНИИ

IMPROVING THE METHODOLOGY FOR DETERMINING REDUCED CROSS-SECTIONS OF RODS FROM COLD-FORMED PROFILES AT ONE-PARAMETER LOADING

Предлагается усовершенствованная методика определения редукции в сечениях холодногнутых тонкостенных профилей, позволяющая упростить и автоматизировать процесс расчета для конкретных сечений. Данный подход предполагает необходимость задания лишь исходных данных, а весь процесс расчета происходит в автоматизированном режиме, что позволяет значительно снизить его трудоемкость.

Ключевые слова: тонкостенные холодногнутые профили, прочность, редукция сечения, автоматизация расчета.

The paper presents an improved methodology for determining the reduction in sections of cold-formed thin-walled profiles, which allows simplifying and automating the calculation process for specific sections. This approach implies the necessity to specify only the initial data, and the entire calculation process takes place in the automated mode, which can significantly reduce its complexity.

Keywords: thin-walled cold-formed profiles, strength, reduced cross-section, automation of calculation.

В настоящее время конструкции из холодногнутых тонкостенных профилей получили значительное распространение на территории России. С появлением отечественных нормативных документов (СП 260.1325800.2016)¹ количество организаций, использующих данный вид конструкций в своей проектной документации, неуклонно растет. Это обусловлено рядом конкурентных преимуществ легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) — малым удельным весом конструктивных элементов, сочетающимся с прочностью и устойчивостью; возможностью создавать разнообразные сечения профилей; сокращением сроков строительства за счет быстрого всесезонного монтажа; широкими архитектурными возможностями [1].

¹ СП 260.1325800.2016. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. М., 2016. 116 с.

ЛСТК проектируются на основе тонкостенных (толщиной до 4 мм) оцинкованных элементов, которые могут иметь открытое или закрытое сечение. Многообразие форм холодногнутых профилей позволяет регулировать несущую способность элементов за счет не только площади поперечного сечения, но и их конструктивных особенностей [2].

Одной из основных проблем, возникающих при использовании тонкостенных холодногнутых профилей, является потеря местной устойчивости, которая происходит до достижения предельного состояния [3]. Другой немаловажной особенностью работы ЛСТК является потеря устойчивости формы сечения. В этом случае нарушается гипотеза недеформированности контура поперечного сечения [4]. Потеря местной устойчивости и устойчивости формы

в зависимости от толщины элемента, его геометрии, наличия продольных ребер жесткости (отгибов полок) может существенно влиять на напряженно-деформированные и предельные состояния в его сечениях [5–6]. Таким образом, одной из основных задач проектирования и расчета холодногнутых тонкостенных элементов является определение эффективных (редуцированных) характеристик сечения. Использование такого подхода предполагает выключение из работы частей сечения, которые теряют местную устойчивость [7–8].

Согласно методике, изложенной в EN 1993-1-3-2006², холодногнутый профиль заменяют совокупностью отдельных пластин. Пластинки, составляющие стержень, в зависимости от условий опирания (закрепления) могут терять местную устойчивость [9]. Для анализа поведения пластинчатых элементов используется концепция эффективной ширины этих пластин, изложенная в EN 1993-1-5-2006³. Согласно этой концепции, при определении эффективных характеристик пластинки вводится понижающий коэффициент учета местной потери устойчивости, который обуславливает ширину и положение зоны, выключаемой из работы, в зависимости от варианта закрепления и распределения напряжений.

² EN 1993-1-3-2006. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. European Committee for Standardization, 2006.

³ EN 1993-1-5-2006. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements. European Committee for Standardization, 2006.

Рис. 1. Деформирование контура сечения: а — при потере местной устойчивости; б — при потере устойчивости формы сечения

Методика учета потери устойчивости формы сечения также изложена в EN 1993-1-3-2006. Она предполагает определение реальной жесткости пластин, составляющих сечение, в местах сопряжения с элементами жесткости (краевым и промежуточными отгибами) и определение понижающего коэффициента. Введение данного коэффициента позволяет учесть потерю устойчивости формы путем уменьшения толщины части сечения, в которой присутствует элемент жесткости.

Методика определения выходящих из работы частей сечения, изложенная в EN 1993-1-3-2006, EN 1993-1-5-2006, также принята в СП 260.1325800.2016. Она базируется на множестве теоретических изысканий и экспериментов зарубежных авторов и не вызывает сомнений. С помощью данной методики можно найти редукцию при любом сочетании силовых факторов. Исходя из распределения напряжений по сечению профиля, разделив его на отдельные пластинчатые элементы, можно получить реальную картину редукции. Далее полученные эффективные характеристики используются при расчетах на прочность и устойчивость по EN 1993-1-3-2006.

Расчет эффективных характеристик холодногнутого тонкостенного профиля является достаточно трудоемким и длительным процессом, с которым не всегда может справиться рядовой инженер. В связи с этим проектировщики часто безосновательно отказываются от использования ЛСТК в пользу горячекатаных профилей.

В настоящей работе приводится универсальная методика определения характеристик редуцированного сечения холодногнутого тонкостенного элемента на примере спаренного С-образного профиля (рис. 2, а, б, в). Алгоритм реализован с помощью программного комплекса Microsoft Excel с использованием языка программирования Visual Basic.

В качестве исходных данных используются геометрические размеры рассматриваемого профиля, марка стали, а также относительные эксцентриситеты приложения продольной силы m_x , m_y (табл. 1).

Введение относительных эксцентриситетов позволяет использовать универсальный способ определения напряжения в характерных точках

Рис. 2. Спаренный С-образный профиль: а — общий вид рассматриваемого сечения; б — геометрические параметры профиля; в — геометрические параметры срединной линии; г — схема профиля, разбитого на отдельные пластинки, с нумерацией характерных точек

сечения в безразмерных параметрах по формуле [10]

$$\sigma = \bar{N}_{\text{пр}} \left(1 + m_x \frac{y}{y_*} + m_y \frac{x}{x_*} \right), \quad (1)$$

где $\bar{N}_{\text{пр}} = \frac{N_{\text{пр}}}{R_y A} = \frac{1}{1 + m_x + m_y}$ — предельный параметр усилий; x_* , y_* — координаты наиболее напряженного волокна.

Используя формулу (1), мы можем определить относительное напряжение в характерных

точках сечения как при изгибе, так и при сжатии, регулируя значения относительных эксцентриситетов, например, при сжатии $m_x = 0,001$, $m_y = 0,001$; при изгибе относительно оси x $m_x = 200$, $m_y = 0,001$; при изгибе относительно оси y $m_x = 0,001$, $m_y = 200$. Таким образом, используется аналогия с внецентренным сжатием, которая путем введения малых или очень больших относительных эксцентриситетов вырождается в центральное сжатие или изгиб.

Таблица 1

Исходные данные для определения эффективных характеристик сечения

h_p , мм	b_p , мм	c_p , мм	t , мм	R_y , Н/мм ²	x^* , мм	y^* , мм	m_x	m_y
188	89	20	2	340	95	95	0,001	0,001

Таблица 2

Координаты характерных точек сечения и напряжения в них

№ точки	Координата x, мм	Координата y, мм	Относительные напряжения в точке
0	94	-74	0,7701
1	94	-94	0,9796
2	5	-94	0,9796
3	5	94	-0,9895
4	94	94	-0,9895
5	94	74	-0,7800
6	-94	-74	0,7701
7	-94	-94	0,9796
8	-5	-94	0,9796
9	-5	94	-0,9895
10	-94	94	-0,9895
11	-94	74	-0,7800

Зная геометрические размеры профиля, мы можем определить координаты каждой точки сечения, разделенного на составляющие его пластинки, определить параметры относительных напряжений (табл. 2) и построить графическую схему срединной линии рассматриваемого сечения (рис. 2, з).

Далее необходимо указать способ закрепления каждой пластинки для определения величины и положения участков, выключающихся из работы (табл. 3). Для автоматизированного процесса вычисления была написана программа (рис. 3), которая учитывает все возможные варианты редукиции согласно EN 1993-1-5-2006. Определяя редукицию в каждой пластинке, получаем графическое отображение частей сечения, выключающихся из расчета (рис. 4).

На следующем этапе строится графическое отображение эффективного сечения относительно начальных осей x , y , необходимое для вычисления влияния потери устойчивости формы сечения. Для этого на участки пластин, закрепленных с двух сторон, добавляются точки, характеризующие предполагаемые места, выключающиеся из работы (рис. 5, б).

Далее рассматриваются части сечения, имеющие элементы жесткости или краевые отгибы. В EN 1993-1-3-2006 предлагается рассматривать процесс потери устойчивости формы сечения при сжатии и изгибе отдельно. Однако очевидным является тот факт, что редуцироваться будут участки, испытывающие сжатие. Поэтому

в данной работе методика расчета из EN 1993-1-3-2006 применяется для каждого из участков (табл. 4). Далее определяется значение редуцированной толщины, которая распространяется на части сечения с краевыми отгибами, испытывающими сжатие (рис. 6). Использование такого подхода не противоречит EN 1993-1-3-2006.

Зная параметры редукиции каждой отдельной пластинки, можно определить эффективную площадь сечения, реальное положение осей редуцированного сечения, а также моменты инерции (табл. 5, 6). Выбрав соответствующий пара-

Таблица 3

Координаты характерных точек сечения и напряжения в них

№ пластинки	№ первого узла	Координата x, мм	Координата y, мм	σ_1	№ второго узла	Координата x, мм	Координата y, мм	σ_2	Количество закрепленных сторон (одна, две)
1	0	94	-74	0,770	1	94	-94	0,980	1
2	1	94	-94	0,980	2	5	-94	0,980	2
3	2	5	-94	0,980	3	5	94	-0,990	2
4	3	5	94	-0,990	4	94	94	-0,990	2
5	5	94	74	-0,780	4	94	94	-0,990	1
6	6	-94	-74	0,770	7	-94	-94	0,980	1
7	7	-94	-94	0,980	8	-5	-94	0,980	2
8	8	-5	-94	0,980	9	-5	94	-0,990	2
9	9	-5	94	-0,990	10	-94	94	-0,990	2
10	11	-94	74	-0,780	10	-94	94	-0,990	1

```

Dim ro As Double
If F_min < 0 Then
    If typec = 2 Then
        If sig1 <= sig2 Then
            psi = sig2 / sig1
            Ks = Find_Ks(psi, typec, sig1, sig2)
            Lp = b / (28.4 * t * Sqr(Ks * 235 / Ry))
            Lpred = Lp * Sqr(Abs(F_min))
            If Lpred > 0.673 Then
                ro = (1 - 0.055 * (3 + psi) / Lpred) / Lpred + 0.18 * (Lp - Lpred) / (Lp - 0.6)
                If ro > 1 Then
                    ro = 1
                End If
                If ro < 1 Then
                    If sig1 <= sig2 And sig1 <= 0 And sig2 <= 0 Then
                        ret(1) = 2 * ro / (5 - psi)
                        ret(2) = 1 - (ro * (psi - 3) / (psi - 5))
                    ElseIf sig1 <= sig2 And sig1 <= 0 And sig2 >= 0 Then
                        ret(1) = -0.4 * ro / (psi - 1)
                        ret(2) = (3 * ro - 5) / (5 * (psi - 1))
                    ElseIf sig2 <= sig1 And sig1 <= 0 And sig2 <= 0 Then
                        ret(1) = ro * (psi - 3) / (psi - 5)
                        ret(2) = 1 + (2 * ro / (psi - 5))
                    ElseIf sig2 <= sig1 And sig2 <= 0 And sig1 >= 0 Then
                        ret(1) = (5 * psi - 3 * ro) / (5 * (psi - 1))
                        ret(2) = (2 * ro + 5 * psi - psi) / (5 * (psi - 1))
                    End If
                End If
            End If
        ElseIf sig1 > sig2 Then
            Dim h As Double
            h = sig1
            sig1 = sig2
            sig2 = h
            psi = sig2 / sig1
            Ks = Find_Ks(psi, typec, sig1, sig2)
            Lp = b / (28.4 * t * Sqr(Ks * 235 / Ry))
            Lpred = Lp * Sqr(Abs(F_min))
            If Lpred > 0.673 Then
                ro = (1 - 0.055 * (3 + psi) / Lpred) / Lpred + 0.18 * (Lp - Lpred) / (Lp - 0.6)
                If ro > 1 Then
                    ro = 1
                End If
                If ro < 1 Then
                    If sig1 <= sig2 And sig1 <= 0 And sig2 <= 0 Then
                        ret(1) = 2 * ro / (5 - psi)
                        ret(2) = 1 - (ro * (psi - 3) / (psi - 5))
                    ElseIf sig1 <= sig2 And sig1 <= 0 And sig2 >= 0 Then

```

Рис. 3. Фрагмент программного кода Visual Basic, описывающего редуцию в пластинках

Рис. 4. Участки сечения, выключающиеся из расчета

метр эффективного сечения в зависимости от указанных в начале расчета относительных эксцентриситетов, можно переходить к расчетам элементов на прочность при действии отдельных силовых факторов (N , M_x , M_y) относительно редуцированных сечений от данного фактора (A_{ef} — сжатие, $I_{x,ef}$ — изгиб относительно оси x , $I_{y,ef}$ — изгиб относительно оси y).

В случае когда на стержень воздействует несколько силовых факторов одновременно, в EN 1993-1-3-2006 предлагается использовать следующую формулу [10]:

$$\frac{N}{A_{ef} R_y} + \frac{M_x + N e_{ef,y}}{W_{ef,x} R_y} + \frac{M_y + N e_{ef,x}}{W_{ef,y} R_y} \leq 1, \quad (2)$$

где A_{ef} — эффективная площадь сечения при действии только продольной силы N ; $W_{ef,x}$ — момент сопротивления эффективного сечения, которое определяется только при действии M_x ; $W_{ef,y}$ — то

Рис. 5. Рассматриваемое сечение: а — схема сечения с промежуточными точками, характеризующими потерю устойчивости; б — реальная картина редуцированного сечения

Таблица 4

Результаты расчета редуцированной толщины участков сечения с краевыми отгибами

№ участка	№ пластинки	1-й узел	Координата x_p , мм	Координата y_p , мм	2-й узел	Координата x_p , мм	Координата y_p , мм	k_f	K	$\sigma_{кр,s}$	l_d	c_d
1	1	0	94	-74	1	94	-94	0,875	0,2329	217,247	1,251	0,566
	2	1	94	-94	2	49,5	-94					
2	7	9	57,55	94	10	94	94	1,143	0,2004	225,246	1,2286	0,582
	8	10	94	94	11	94	74					
3	9	12	-94	-74	13	-94	-94	0,875	0,2329	217,247	1,251	0,566
	10	13	-94	-94	14	-49,5	-94					
4	15	21	-57,55	94	22	-94	94	1,143	0,2004	225,246	1,2286	0,582
	16	22	-94	94	23	-94	74					

же при действии только M_y ; $e_{ef,y}$, $e_{ef,x}$ — смещения главных осей эффективных сечений, которые определяются раздельным действием M_x и M_y соответственно.

Такой подход не отражает реальной картины распределения редукиции по сечению, и, следовательно, не является корректным [10, 11].

Представленная методика расчета эффективных характеристик также позволяет определять реальную картину распределения редукиции при внецентренном сжатии (рис. 7) и может быть использована для создания более корректных методов определения сложного напряженного состояния в сечениях из холодногнутых тонкостенных профилей.

Рис. 6. Графическое отображение участков сечения с краевыми отгибами относительно их центральных осей

Таблица 5

Параметры эффективного сечения с учетом смещения осей

№ пластинки	1-й узел	Координата x_p , мм	Координата y_p , мм	2-й узел	Координата x_p , мм	Координата y_p , мм	Длина, мм	Толщина, мм
1	0	94	-83,965	1	94	-103,965	20	2
2	1	94	-103,965	2	49,5	-103,965	44,5	2
3	3	49,5	-103,965	4	5	-103,965	44,5	2
4	4	5	-103,965	5	5	-103,965	0	2
5	6	5	-103,965	7	5	84,035	188	2
6	7	5	84,035	8	41,45	84,035	36,446	2
7	9	57,55	84,035	10	94	84,035	36,446	1,163
8	10	94	84,035	11	94	64,035	20	1,163
9	12	-94	-83,965	13	-94	-103,965	20	2
10	13	-94	-103,965	14	-49,5	-103,965	44,5	2
11	15	-49,5	-103,965	16	-5	-103,965	44,5	2
12	16	-5	-103,965	17	-5	-103,965	0	2
13	18	-5	-103,965	19	-5	84,035	188	2
14	19	-5	84,035	20	-41,45	84,035	36,446	2
15	21	-57,55	84,035	22	-94	84,035	36,446	1,163
16	22	-94	84,035	23	-94	64,035	20	1,163

Таблица 6

Результаты расчета

x (ц. т.)	y (ц. т.)	A_{ef} , мм ²	$I_{x,ef}$, мм ⁴	$I_{y,ef}$, мм ⁴
0	-9,965	1465,1274	8 731 496,8	2 835 279,3

Библиографический список

1. Жмарин Е. Н. Международная ассоциация легкого стального строительства // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. № 2. С. 27–30.

2. Назмеева Т. В. Несущая способность сжатых стальных тонкостенных элементов сплошного и перфорированного сечения из холодногнутого С-профиля // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 5 (40). С. 44–51.

3. Dubina D., Ungureanu V., Landolfo R. Design of Cold-formed Steel Structures // ECCS – European Convention for Constructional Steelwork. 2012. Pp. 13–15.

4. Уэй Э., Хэйвуд М., Беляев Н. А., Билык С. И., Билык А. С. Расчет элементов из стальных холодноформованных профилей в соответствии с Еврокодом 3 //

Рис. 7. Редуцированное сечение относительно начальных осей при (а) $m_x = 0$, $m_y = 0$ (центральной сжатии); (б) $m_x = 0$, $m_y = 0,5$; (в) $m_x = 2$, $m_y = 1$

Украинский центр стального строительства (УЦСС). 2015. 104 с.

5. Кузнецов А. Ю. Прочность и пространственная устойчивость составных стержневых элементов конструкций из холодногнутых профилей: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 142 с.

6. Решетников А. А., Корнет В. Ю., Леонова Д. А. Сравнительный анализ методик расчета тонкостенных стальных балок С-образного профиля по отечественным и зарубежным нормам // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1 (48). С. 174.

7. Айрумян Э. Л. Рекомендации по расчету стальных конструкций из тонкостенных гнутых профилей // СтройПРОФИЛЬ. 2009. № 8 (78). С. 12–14.

8. Айрумян Э. Л., Галстян В. Г. Исследование действительной работы тонкостенных холодногнутых прогонов из оцинкованной стали // Промышленное и гражданское строительство. 2002. № 6. С. 31–34.

9. Тугаев А. С. Устойчивость пластин и тонкостенных стержней: дис. ... канд. техн. наук. Харьков, 1984. 151 с.

10. Белый Г. И. К определению редуцированных сечений стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 5 (64). С. 33–37.

11. Белый Г. И. Новые положения в инженерной методике расчета на устойчивость стальных стержневых элементов конструкций из холодногнутых профилей // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 75–80.

References

1. Zhmarin E. N. *Mezhdunarodnaya assotsiatsiya legkogo stal'nogo stroitel'stva* [International Association of Light Steel Construction]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy – Construction of unique buildings and structures*, 2012, no. 2, pp. 27–30.

2. Nazmeeva T. V. *Nesushchaya sposobnost' szhatykh stal'nykh tonkostennykh elementov sploshnogo i perforirovannogo secheniya iz kholodnognutogo S-profil'ya* [Load-bearing capacity of compressed steel thin-walled elements of solid and perforated sections from cold-curved C-profile]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering and construction magazine*, 2013, no. 5, pp. 44–51.

3. Dubina D., Ungureanu V., Landolfo R. *Design of cold-formed steel structures*. In: ECCS – European Convention for Constructional Steelwork, 2012, pp. 13–15.

4. Uey E., et al. *Raschet elementov iz stal'nykh kholodnoformovannykh profiley v sootvetstvii s Evrokodom 3* [Calculation of elements from cold-formed steel profiles in accordance with EUROCODE 3]. *Ukrainskiy Tsentral'nyi Stal'nogo Stroitel'stva (UTsSS) Publ.*, 2015, 104 p.

5. Kuznetsov A. Yu. *Prochnost' i prostranstvennaya ustoychivost' sostavnykh sterzhnevyykh elementov konstruktsey iz kholodnognutyykh profiley*. Diss. kand. tekhn. nauk [Strength and spatial stability of composite rod elements of structures made of cold-bent profiles. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2013, 142 p.

6. Reshetnikov A. A., Kornet V. Yu., Leonova D. A. *Sravnitel'nyy analiz metodik rascheta tonkostennykh stal'nykh balok S-obraznogo profil'ya po otechestvennym i zarubezhnym normam* [Comparative analysis of methods for calculating thin-walled steel beams of S-shaped profile according to domestic and foreign standards]. *Inzhenerniy vestnik Dona – Engineering Bulletin of the Don*, 2018, no. 1(48), 174 p.

7. Airumyan E. L. *Rekomendatsii po raschetu stal'nykh konstruktsey iz tonkostennykh gnutyykh profiley* [Recommendations for calculating steel structures from thin-walled bent profiles]. *StroyPROFIL' – Building Profile*, 2009, no. 8(78), pp. 12–14.

8. Airumyan E. L., Galstyan V. G. *Issledovanie deystvitel'noy raboty tonkostennykh kholodnognutyykh progonov iz otsinkovannoy stali* [Investigation of the actual operation of thin-walled cold-curved spans made of galvanized steel]. *Promyshlennoe i grazhdanskoye stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2002, no. 6, pp. 31–34.

9. Tugaev A. S. *Ustoychivost' plastin i tonkostennykh sterzhney*. Diss. kand. tekhn. nauk [Stability of plates and thin-walled rods. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1984, 151 p.

10. Belyy G. I. *K opredeleniyu reduktirovannykh secheniy sterzhnevyykh elementov legkikh stal'nykh tonkostennykh konstruktsey* [About calculation of reduced cross sections of bar elements of light weight thin-walled cold formed steel structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 5 (64), pp. 33–37.

11. Belyy G. I. *Novye polozheniya v inzhenernoy metodike rascheta na ustoychivost' stal'nykh sterzhnevyykh elementov konstruktsey iz kholodnognutyykh profiley* [New provisions in the engineering calculation procedure on the stability of steel bar elements of structures made of cold-formed profiles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 2 (61), pp. 75–80.