

doi: 10.5862/MCE.57.7

Прочность просечно-растяжного профиля

*Аспирант А.С. Синельников,**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

Аннотация. Применение тонкостенных холодногнутых профилей в каркасном строительстве имеет ряд преимуществ: всепогодность и точность монтажа, легкость надземного каркаса, экономичность. Перфорированный профиль в составе стеновых ограждающих конструкций позволяет снизить теплопроводность наружных стен.

Новым типом перфорированных профилей является просечно-растяжной. Обзор литературы показал отсутствие научных исследований его работы как сжатой стойки. Численный анализ просечно-растяжного профиля на основе метода конечных элементов показал напряженно-деформированное состояние и позволил определить значения критических сжимающих сил. Подтверждена зависимость преобладающей формы потери устойчивости от толщины сечения, соотношения жесткостных характеристик стенки и полки сечения. Вычислены коэффициенты редукации, предназначенные для выполнения прочностных расчетов на основе нормативных методик согласно Еврокоду 3 и руководству Э.Л. Айрумяна.

Ключевые слова: тонкостенный холодногнутый профиль; прочность; метод конечных элементов; Еврокод; эффективное сечение

Введение

Одним из факторов национального благосостояния в масштабе страны является степень обеспеченности ее граждан жильем. Доступность жилья для заданной локации может быть обеспечена финансовыми механизмами, технологическими и техническими решениями [1, 2]. Финансовые механизмы представляют собой различные программы субсидирования, кредитования и социальных выплат. Снизить стоимость квадратного метра может применение современных технологий, эффективных строительных конструкций, которые позволяют уменьшить количество издержек на этапе строительства.

Проведенные исследования [3] показали, что наиболее оптимальной конструктивной системой малоэтажных зданий, которая отвечает всем нормативным требованиям, включая параметры энергоэффективности [4], является каркасная система. Самый распространенный материал каркасных зданий – дерево [5]. Легкие строительные тонкостенные конструкции (ЛСТК) являются относительно новой технологией каркасного строительства, более 50 лет активно используются в западных странах при строительстве малоэтажных зданий, мансардных этажей при реконструкции [6] и в основе каркаса фасадных систем.

Энергоэффективность зданий определяется показателем теплопроводности наружных ограждающих конструкций [7]. Наличие перфорации в стенке холодногнутого тонкостенного профиля позволяет избежать появления мостика холода и снизить его теплопроводность, но отрицательно сказывается на его несущей способности. Технические решения, которые нивелируют отрицательное влияние просечек, позволили бы применить равнозначный по несущей способности профиль меньшей толщины сечения. Классический вариант перфорированного профиля, просечной, широко распространен, применяется в качестве стоек в стеновых конструкциях. Геометрические размеры перфорации, марка стали и оцинкованного покрытия могут отличаться в зависимости от завода-производителя.

Просечно-растяжной профиль является новым типом перфорированного профиля. Его производство предусматривает способ получения просечек, отличный от известных. Конструктивное отличие заключается в наличии в стенке сечения срединного ребра жесткости, задача которого состоит в улучшении прочностных характеристик.

Развитие строительства из ЛСТК сдерживается отсутствием методики расчета холодногнутого тонкостенного профиля в отечественных национальных нормативных документах [8, 9]. В отличие от толстостенных сечений горячекатаного металлопроката, для тонкостенного холодногнутого профиля характерна местная потеря устойчивости и потеря формы сечения, которая проявляется до общей потери устойчивости. Европейские нормы содержат методику учета данных факторов путем определения геометрии эффективного сечения сплошностенчатого профиля, без выключенных из работы участков сечения [10]. Определение геометрических характеристик эффективного сечения перфорированного профиля не предусмотрено. В России

производители для собственных сортаментов на базе институтов разработали руководства и рекомендации [11–13], которые содержат расчетные характеристики профилей. Методика определения параметров эффективного сечения в них отсутствует.

Обзор литературы

Теоретическая основа работы тонкостенных холодногнутых профилей была разработана в XX веке. Неоценимый вклад в развитие общей теории изгиба, кручения и устойчивости тонкостенных стержней произвольного открытого профиля внес С.П. Тимошенко [14, 15]. Развитие эмпирической формулы И. Ходкинсона и теоретических выводов Дж. Брайана задачи устойчивости сжатых прямоугольных пластин с различными граничными условиями, включая пластины с продольными ребрами жесткости, были подробно изложены в его исследованиях [16]. С.П. Тимошенко вывел точное решение определения центра изгиба сечения. В. Ритц дал приближенное решение этой задачи, также данным вопросом занимался Б.Г. Галеркин. Работы С.П. Тимошенко стали основополагающими в исследованиях К. Вебера, Г. Вагнера, Ф. и Г. Блейхи. К. Вебер, решив задачу в более общем виде, расширил теорию стесненного кручения для балок швеллерного, Z-образного, двутаврового сечения с различной шириной полок. Развитием теории стесненного кручения также занимались Д.В. Бычков [17], В.Н. Беляев и другие. П.М. Знаменский и Г. Вагнер [18] независимо друг от друга вывели формулу для определения критической сжимающей силы при кручении.

Большой вклад в теорию тонкостенных стержней внес советский ученый В.З. Власов. Он развил бессдвиговую теорию произвольно нагруженных тонкостенных стержней открытого профиля в 1930-х гг. [19]. Построенная им теория позволила дать исчерпывающее решение задачи об изгибно-крутильной форме потери устойчивости и колебаниях тонкостенных упругих стержней.

В настоящее время отечественными учеными, теоретиками и практиками, развивается теория и решаются задачи поведения тонкостенного холодногнутого профиля: к ним относятся Э.Л. Айрумян [20, 21], А.Р. Туснин [22, 23], Г.И. Белый [24], В.В. Лалин [25], В.И. Сливкер [26], И.И. Крылов, В.В. Катюшин [27], В.В. Егоров [28], В.В. Зверев [29] и другие [30–37]. Среди них следует отметить работы А.Р. Туснина [38–40], в которых предложен новый численный метод расчета тонкостенных стержней открытого профиля (метод тонкостенных элементов, ТКЭ), разработанный на основе теории В.З. Власова. Метод ТКЭ заключается в том, что в узлах стержней рассматривается 7 степеней свободы (линейные перемещения, угловые повороты и деформация). Разработанные матрицы жесткости и преобразования позволяют учитывать как чистое, так и стесненное кручение. Результаты работы имеют теоретическое и экспериментальное подтверждения, что позволило практически реализовать ТКЭ при разработке нового вычислительного комплекса для расчета тонкостенных конструкций [41]. Работы Г.И. Белого [42–44] известны тем, что предложенный им аналитически-численный подход позволил решить задачу пространственной устойчивости стержневого элемента в упругой и упруго-пластической стадии работы материала. Для учета физической нелинейности был применен специальный алгоритм с введением добавочных пространственных перемещений.

За последние десять лет интерес молодых ученых к исследованию тонкостенных конструкций значительно усилился. Особое внимание привлекают исследования И.В. Астахова [45], И.Г. Катранова [46], А.Ю. Кузнецова [47], О.А. Тусниной [48], В.А. Рыбакова [49], А.Г. Холкина [50], В.М. Шишкина [51] и другие [52–61].

За рубежом развитием расчетных методов анализа несущей способности холодногнутого тонкостенного профиля занимаются такие известные ученые как Г. Хэнкок [62], М. Хейнисуо [63], Р. Ландольфо [64], Б. Шафер [65, 66], Х. Пастернак [67], К. Расмуссен [68].

В последние годы было проведено большое количество экспериментальных исследований холодногнутого профиля различного сечения [69–72]: двутавровых составных, С-образных, Z-образных, швеллерных, в том числе сплошных и перфорированных. Однако лабораторные испытания и теоретический анализ действительной работы просечно-растяжного профиля не выполнялись.

Таким образом, в силу отсутствия экспериментально-теоретических данных по работе просечно-растяжного профиля тема исследования является актуальной.

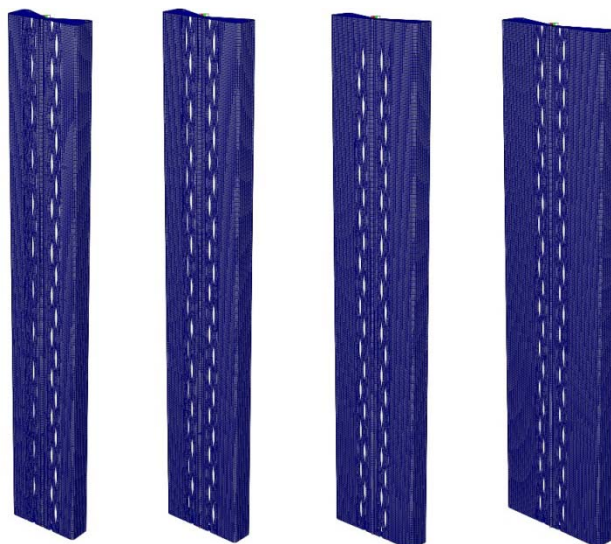


Рисунок 2. Зависимость K_{σ} от соотношения γ для сжатой пластины с продольными ребрами жесткости

Граничные условия были приняты шарнирными на обоих концах стержня. Связи устанавливались на два узла, расположенных в плоскости сечения верхнего и нижнего концов стержня. Координаты данных узлов были определены с учетом центра тяжести заданных сечений, а также случайного эксцентриситета приложения нагрузки. Объединение совместной работы всех узлов сечения моделировалось твердым телом на каждом из концов стержня. Мастер-узлом был принят узел с установленными связями, ведомыми – все узлы, принадлежащие сечению.

Сжимающая нагрузка прикладывалась на мастер-узел по направлению вдоль стержня в виде сосредоточенной силы $P = 100$ кН.

Значение случайного эксцентриситета было задано согласно пособию к СНиП II-23-81*,

$$e_o = \frac{l}{750} + \frac{i}{20}$$
 (l – высота стойки, i – минимальный радиус инерции). Радиус инерции для каждого типа сечения был определен согласно формуле 1:

$$i = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}}, \quad (1)$$

где I_{min} – минимальный момент инерции сечения, mm^4 ; A – площадь сечения профиля, mm^2 .

Площадь и минимальный момент инерции были определены согласно общим правилам геометрии и сопротивления материалов.

Анализ работы просечно-растяжного профиля как сжатой стойки выполнялся для моделей различной длины (1000, 2000 и 3000 мм), высоты сечения профиля (150, 175, 200 и 250 мм) и толщины сечения (1,5 и 2,0 мм).

Обработка исходных данных и полученных результатов в рассматриваемой задаче выполнялась в следующем порядке. Исходя из заданной высоты стойки и радиуса инерции сечения, гибкость сжатого стержня определялась по формуле 2:

$$\lambda = \frac{l}{i_{min}}, \quad (2)$$

где l – высота стойки, мм; i_{min} – минимальный радиус инерции сечения, мм.

Значение критической силы вычислялось согласно формуле:

$$P_{cr.} = K_{buckl.} \cdot P, \quad (3)$$

где $K_{buckl.}$ – коэффициент запаса устойчивости сжатой стойки; P – сжимающая сосредоточенная сила, кН.

В результате решения задачи устойчивости вычислительный программный комплекс получал графическое изображение формы потери устойчивости сжатой стойки, по которой определялся ее тип.

Значения критических сил, тип формы потери устойчивости и гибкости для каждого профиля приведены в таблице 1. Из таблицы видно, что гибкость стержней рассматриваемых сечений длиной 1000 мм, $\lambda_{\max} = 60 \dots 70$; длиной 2000 мм, $\lambda_{\max} = 120 \dots 140$; длиной 3000 мм, $\lambda_{\max} = 180 \dots 200$.

Таблица 1. Критические силы и форма потери устойчивости просечно-растяжного профиля при сжатии

№	Марка профиля	Длина, м	E_0 , мм	λ	Центральное сжатие		Внецентренное сжатие	
					Критич. сила, кН	Форма п.у.	Критич. сила, кН	Форма п.у.
1	ТСс 150-45-1.5	1000	4,28	61	44,6	Местная	37,7	Местная
2		2000	5,61	122	42,9	Местная	36,2	Местная
3		3000	6,95	183	30,2	Общая	26,6	Общая
4	ТСс 150-45-2.0	1000	4,27	62	83,9	Местная	71,3	Местная
5		2000	5,60	124	78,4	Общая	69,0	Местная
6		3000	6,94	185	41,6	Общая	36,9	Общая
7	ТСс 175-45-1.5	1000	4,71	62	36,6	Местная	31,4	Местная
8		2000	6,05	125	34,2	Местная	29,1	Местная
9		3000	7,38	187	29,0	Общая	25,1	Общая
10	ТСс 175-45-2.0	1000	4,70	63	69,6	Местная	60,2	Местная
11		2000	6,04	126	65,8	Местная	56,0	Местная
12		3000	7,37	190	40,8	Общая	35,6	Общая
13	ТСс 200-45-1.5	1000	5,14	64	29,2	Местная	24,8	Местная
14		2000	6,47	128	27,2	Местная	22,8	Местная
15		3000	7,80	192	26,2	Местная	21,2	Местная
16	ТСс 200-45-2.0	1000	5,13	65	55,8	Местная	47,7	Местная
17		2000	6,46	130	53,1	Местная	44,3	Местная
18		3000	7,79	194	39,7	Общая	34,1	Общая
19	ТСс 250-45-1.5	1000	5,96	67	19,8	Местная	16,4	Местная
20		2000	7,29	134	18,3	Местная	14,7	Местная
21		3000	8,62	201	17,9	Местная	13,9	Местная
22	ТСс 250-45-2.0	1000	5,95	68	38,2	Местная	31,8	Местная
23		2000	7,28	136	36,9	Местная	29,8	Местная
24		3000	8,61	204	35,9	Местная	28,1	Местная

Формы потери устойчивости для стоек высотой 1000, 2000 и 3000 мм представлены на рисунках 3, 4, 5 соответственно. Численные расчеты показали, что исчерпание несущей способности стержней просечно-растяжного профиля высокой гибкости ($\lambda_{\max} = 180 \dots 200$) длиной 3000 мм происходит в основном по общей потере устойчивости (рис. 5).

Для стержней малой и средней гибкости ($\lambda_{\max} = 40 \dots 60, 120 \dots 140$) длиной 1000...2000 мм характерна местная потеря устойчивости стенки сечения (рис. 3, 4). Анализ полученных данных показывает:

- увеличение толщины сечения повышает вероятность возникновения общей потери устойчивости для сжатого стержня;
- увеличение высоты стенки сечения понижает вероятность возникновения общей потери устойчивости для сжатого стержня.

Данный результат согласуется с ранее сделанным выводом [73] при определении зависимости формы потери устойчивости от соотношения γ для сжатой пластины с продольными ребрами жесткости. Увеличение толщины сечения повышает соотношение изгибной жесткости полок с отгибами к цилиндрической жесткости стенки. Увеличение высоты сечения, напротив,

увеличивает знаменатель в выражении $\gamma = \frac{2 \cdot B}{C \cdot b}$ (B – изгибная жесткость отгиба по отношению к плоскости стенки сечения; C – цилиндрическая жесткость стенки; b – ширина стенки) и снижает соотношение изгибной жесткости полок с отгибами к цилиндрической жесткости стенки.

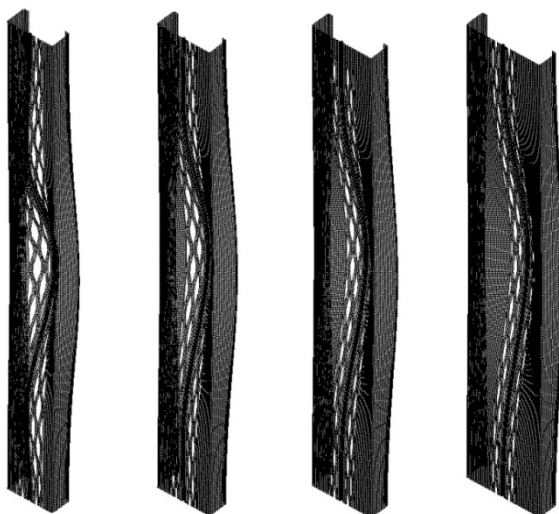


Рисунок 3. Формы потери устойчивости, $l = 1000$ мм

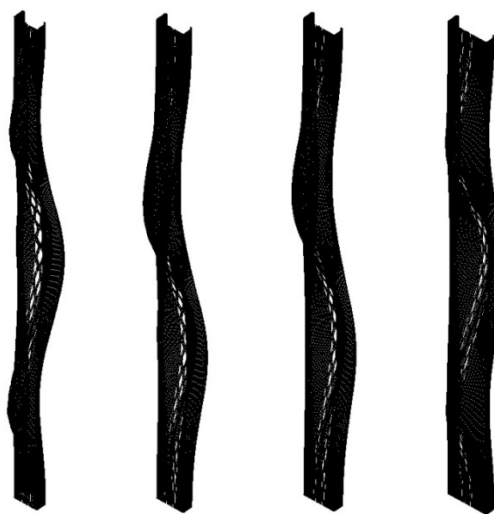


Рисунок 4. Формы потери устойчивости, $l = 2000$ мм

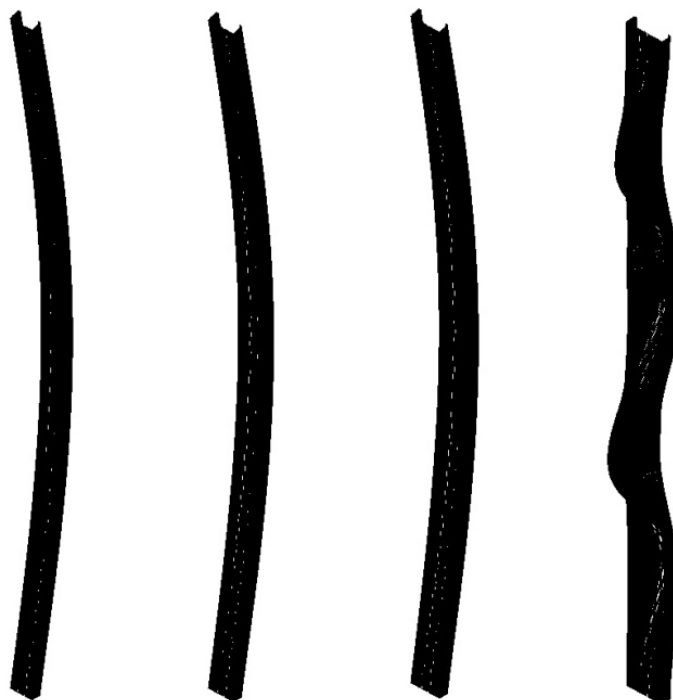


Рисунок 5. Формы потери устойчивости, $l = 3000$ мм

Поля продольных напряжений вдоль направления действия сосредоточенной силы для сжатого просечно-растяжного профиля представлены на рисунке 6. Концентрация напряжений отмечена на концах профиля в месте приложения нагрузки и опоры, а также в зоне перфорации стенки по всей длине стержня. Распределение напряжений по сечению симметрично.

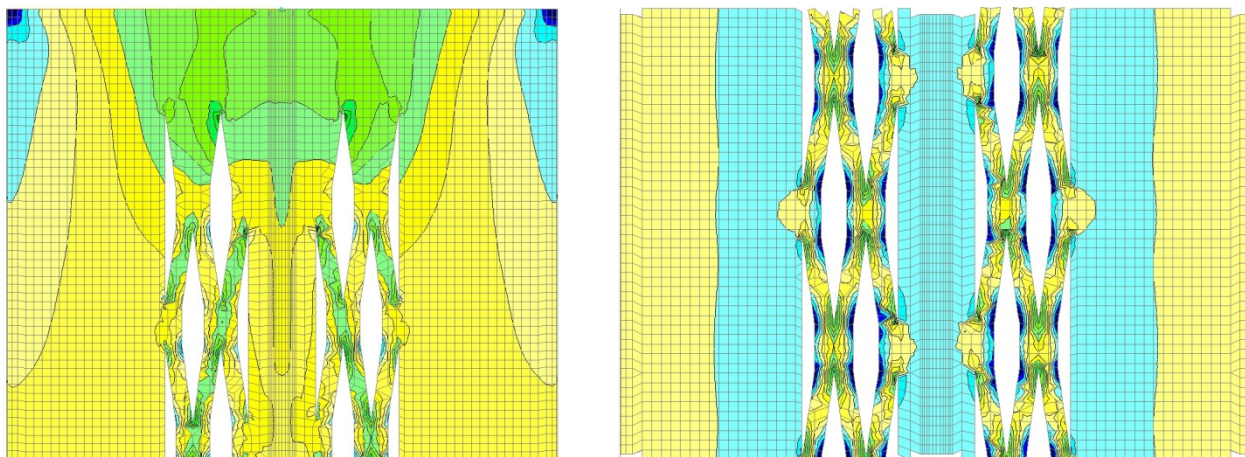


Рисунок 6. Поля продольных напряжений на концах (слева) и в середине высоты (справа) сжатого просечно-растяжного профиля

Аналитическое исследование

Аналитическое исследование несущей способности центрально и внецентренно сжатого просечно-растяжного профиля было проведено согласно требованиям нормативных методик Eurocode 3 (EN 1993-1-1, EN 1993-1-3, EN 1993-1-5) [74] и руководства Э.Л. Айрумяна, основанного на СНиП II-23-81* [12]. Указанные нормативные методики основаны на приведении полного сечения холодногнутого тонкостенного профиля к эффективному (редуцированному). Под эффективным сечением подразумевается сечение профиля без учета выключившихся из работы участков стенки и полок вследствие местной потери устойчивости. Редуцирование сечения профиля позволяет учесть влияние местной потери устойчивости и потери формы сечения на несущую способность сжатого стержня. Дальнейшие расчеты выполняются по аналогии с методикой, разработанной для толстостенных сечений горячекатаного проката.

Учет ослабленных наличием просечек участков стенки сечения не предусмотрен. Классический способ учета просечек основан на приведении стенки с просечками к сплошностенчатой путем редуцирования толщины. Решение задачи определения коэффициента редукиции строится на предположении равенства величин критических сжимающих напряжений для опертых по всем сторонам пластин с просечками и редуцированной сплошностенчатой (далее по тексту РСП). Коэффициент редукиции находится при решении нетривиального выражения 4 при известном значении коэффициента устойчивости сжатой пластины с просечками, $K_{perf.}$. Коэффициент устойчивости РСП известен из решения классической задачи для опертой по всему периметру сжатой пластины, $K_{gr.} = 4$.

$$k = \sqrt{\frac{K_{perf.}}{K_{gr.}}} \quad (4)$$

Определение $K_{perf.}$ для просечно-растяжного профиля было выполнено решением задачи устойчивости сжатой пластины на базе метода конечных элементов. Шаг конечных элементов 3 мм. Геометрические размеры моделируемой пластины (95.5x95.5 мм) соответствовали участку ослабленной просечками стенки между полкой и срединным ребром жесткости стенки профиля АИ ТСс 200-45-t (рис. 7).

Толщина сечения изменялась от 0,75 мм до 1,95 мм, учитывая толщину оцинкованного покрытия, с шагом 0,1 мм.

Анализ нормативных методик показал, что необходимым параметром для проведения аналитического расчета просечно-растяжного профиля является коэффициент редукиции стенки сечения k . Определение значений коэффициента k было произведено на основании равенства критических напряжений стенки с просечно-растяжной перфорацией и сплошной стенки с редуцированной толщиной сечения. Численный расчет проводился на базе метода конечных элементов и заключался в решении задачи устойчивости при заданных граничных условиях и нагрузках. В результате определялся коэффициент запаса устойчивости $K_{buckl.}$

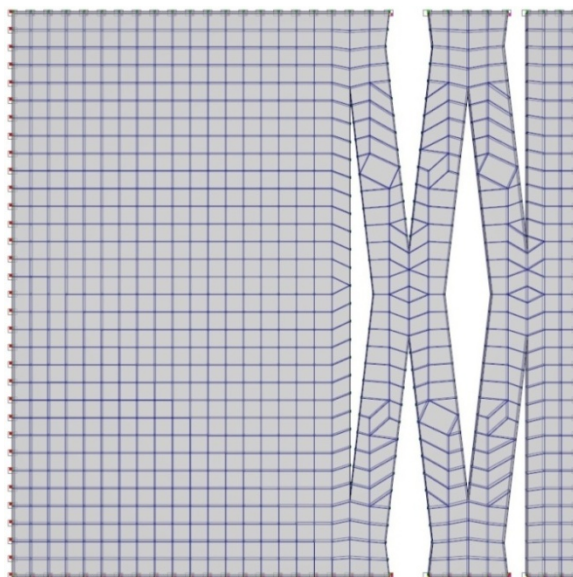


Рисунок 7. Пластина с просечно-растяжной перфорацией, $\frac{1}{2}$ стенки сечения

Получение значений K_{perf} выполнялось по аналогии с решением предыдущих задач согласно порядку, описанному в начале настоящей главы. Форма потери устойчивости сжатой пластины представлена на рисунке 8.

Коэффициенты редукции стенки сечения для просечно-растяжного профиля марки АИ ТСс 200-45- t приведены в таблице 2. Значения параметра k находятся в диапазоне от 0,75 до 0,85, увеличиваясь с уменьшением толщины сечения.

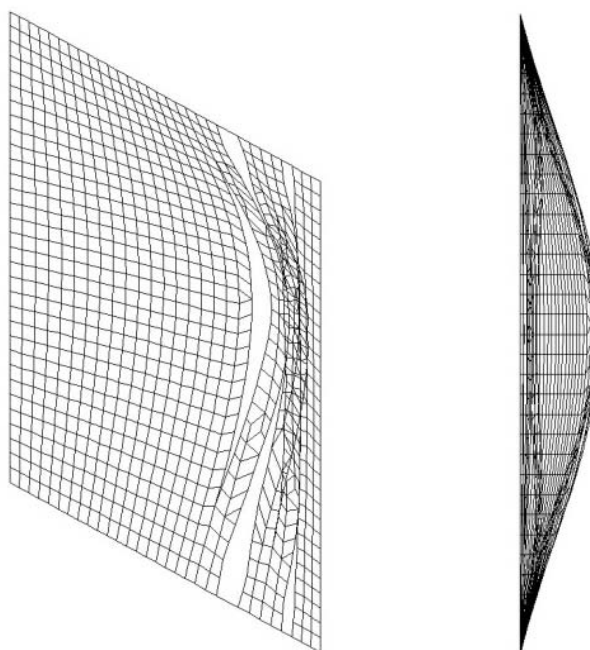


Рисунок 8. Форма потери устойчивости просечно-растяжной пластины

Сравнительный анализ методом конечных элементов несущей способности на сжатие просечно-растяжного профиля и профиля с редуцированной стенкой сечения показал, что исчерпание несущей способности приведенного сплошностенчатого профиля по потере устойчивости происходит при значениях сосредоточенной нагрузки, на 20 % меньших. Данное явление обусловлено наличием упругого поворота стенки, который не учитывался при определении коэффициентов редукции.

Таблица 2. Коэффициенты редукции для АИ ТСс 200-45- t

t , мм	0,75	0,85	0,95	1,05	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,75
k	0,835	0,814	0,798	0,785	0,775	0,767	0,761	0,756	0,752	0,748	0,746

Таблица 3. Аналитические расчеты. Критическая сила просечно-растяжного профиля при сжатии

№	Марка профиля	Длина, м	Критическая сила при центральном сжатии, кН		Критическая сила при внецентренном сжатии, кН	
			Eurocode 3	Э.Л. Айрумян	Eurocode 3	Э.Л. Айрумян
1	ТСс 200-45-1.5	1000	32,4	40,3	26,2	23,2
2		2000	23,4	20,1	17,3	13,4
3		3000	14,5	10,4	10,8	7,8
4	ТСс 200-45-2.0	1000	50,5	64,9	40,6	36,4
5		2000	33,5	30,9	25,1	20,5
6		3000	19,9	15,9	15,0	11,9

Аналитические расчеты были произведены для просечно-растяжного профиля марки ТСс 200-45-t толщиной сечения 1,5 и 2,0 мм, с длиной стержня 1000, 2000 и 3000 мм. Результаты аналитического расчета просечно-растяжного профиля на сжатие согласно Eurocode 3 и руководству Э.Л. Айрумяна с учетом классической методики приведения стенки с просечками к редуцированной сплошностенчатой представлены в таблице 3. Согласно расчету Eurocode 3, потеря устойчивости сжатой стойки происходит по изгибной форме. Сравнительный анализ результатов аналитических и численных расчетов показал удовлетворительную сходимость. Относительная погрешность составляет не более 10%.

Заключение

В качестве общих выводов и результатов выполненного исследования можно отметить следующее:

1. Исследован новый тип тонкостенного холодногнутого профиля (просечно-растяжной) с получением просечек в стенке сечения способом прорезания и последующего растяжения на профилегибочном оборудовании.

2. На основании анализа результатов численных расчетов просечно-растяжного профиля показано, что проявление местной потери устойчивости характерно для сжатых стоек высотой до 2.0 м, общей потери устойчивости – для сжатых стоек высотой более 3.0 м. Увеличение толщины сечения при неизменных остальных геометрических размерах повышает вероятность возникновения общей потери устойчивости для сжатого стержня. Увеличение высоты стенки сечения при неизменных остальных геометрических размерах понижает вероятность возникновения общей потери устойчивости для сжатого стержня.

3. Разработаны рекомендации и получены значения коэффициентов редукиции стенки сечения, необходимые для проведения инженерных расчетов согласно Eurocode 3 и руководству Э.Л. Айрумяна.

4. На основании теоретических расчетов установлено, что методы расчета тонкостенных холодногнутого профилей на сжатие согласно руководству Э.Л. Айрумяна, Eurocode 3 и на базе оболочечной конечно-элементной модели верны и могут применяться в инженерном проектировании конструкций из просечно-растяжного профиля с учетом результатов данной работы.

Литература

1. Теличенко В.И., Король Е.А., Каган П.Б., Сборщиков С.Б., Дмитриев А.Н., Карданская Н.Л. Основы управления инвестиционно-строительными программами в условиях мегаполиса. М.: Издательство АСВ, 2008. 240 с.
2. Вильман Ю.А., Синенко С.А., Грабовый П.Г., Грабовый К.П., Король Е.А., Каган П.Б. Особенности технологии и механизации возведения многоэтажных зданий // Вестник МГСУ. 2012. №4. С. 170–174.
3. Жмарин Е.Н. Международная ассоциация легкого стального строительства // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. №2. С. 27–30.

4. Грабовый П.Г., Король Е.А., Грабовый К.П., Семенов В.Н., Каган П.Б., Пугач Е.М. Инновационные технологии разработки программно-целевой системы управления энергосбережением в строительстве. М.: Издательство НТО ПМУ, 2014. 235 с.
5. Ушаков А.Ю., Долганов А.И. Автоматизация проектирования деревянных конструкций в малоэтажном строительстве // Научное обозрение. 2014. №7-1. С. 140–143.
6. Теличенко В.И., Король Е.А., Каган П.Б., Сборщиков С.Б. Управление проектами реконструкции и реновации жилой застройки. М.: Издательство АСВ, 2009. 208 с.
7. Михайлин М.В., Соловьёв А.К. Применение энергоэффективных технологий при реконструкции зданий и сооружений современные тенденции и особенности // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2008. №11. С. 62.
8. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. Взамен СНиП II-В.3-74. Введ. 01-01-1987. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. 96 с.
9. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. Введ. 2011-05-20. М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2011. 172 с.
10. Алмазов В.О. Проблемы использования Еврокодов в России // Промышленное и гражданское строительство. 2012. №7. С. 36–38.
11. Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу ограждающих и несущих конструкций из стальных гнутых профилей повышенной жесткости. Введ. 1999-07-07. М.: ЦНИИПСК им. Мельникова, 1999. 32 с.
12. Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутого стальных оцинкованных профилей производства ООО «БалтПрофиль». Введ. 2004-01-01. М.: ЦНИИПСК им. Мельникова, 2004. 69 с.
13. СТО 0061-2008. Прогонь и ригели стальные оцинкованные из холодногнутого профилей С-образного и Z-образного сечений для систем покрытий и стен зданий. Введ. 2008-12. М.: ЦНИИПСК им. Мельникова, 2008. 90 с.
14. Тимошенко С.П. Прочность и колебания элементов конструкций. М.: Наука, 1975. 704 с.
15. Тимошенко С.П. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 575 с.
16. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. М.: Наука, 1971. 807 с.
17. Бычков Д.В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций. М.: Гостройиздат, 1962. 476 с.
18. Wagner C., Pretscher W. Verdrehung und Knickung von offenen Profilen // Luftfahrtforschung. 1934. №6. Рр. 174–180.
19. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. М.: Физматлит, 1959. 568 с.
20. Айрумян Э.Л. Исследования действительной работы тонкостенных холодногнутого прогонь из оцинкованной стали // Промышленное и гражданское строительство. 2002. №6. С. 31–34.
21. Айрумян Э.Л., Белый Г.И. Исследование работы стальной фермы из холодногнутого профилей с учетом их местной и общей устойчивости // Промышленное и гражданское строительство. 2010. №5. С. 41–44.
22. Туснин А.Р. Расчет и проектирование конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля: дис. докт. тех. наук. М., 2003. 353 с.
23. Туснин А.Р. Конечный элемент для численного расчета конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля // Металлические конструкции. 2009. №1(15). С. 73–78.
24. Белый Г.И. Пространственная работа и предельные состояния стержневых элементов металлических конструкций: дис. докт. тех. наук. Л., 1987. 464 с.
25. Лалин В.В., Рыбаков В.А., Морозов С.А. Исследование конечных элементов для расчета тонкостенных стержневых систем // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 1 (27). С. 53–73.
26. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М.: ДМК Пресс, 2002. 618 с.
27. Катюшин В.В. Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения (расчет, проектирование, строительство). М.: Стройиздат, 2005. 656 с.
28. Егоров В.В. Свободные колебания тонкостенных криволинейных стержней произвольного профиля, нагруженных параметрической нагрузкой: автореф. дис. канд. тех. наук. СПб., 2001. 127 с.
29. Зверев В.В. Эффективные строительные металлоконструкции на основе объемно-формованного тонколистового проката: исследование, проектирование, изготовление: автореф. дис. докт. тех. наук. Липецк, 2000. 395 с.

30. Белый А.Г. Деформационный расчет и устойчивость тонкостенных призматических стержней произвольного профиля сжатых с двухосным эксцентриситетом: автореф. дис. канд. тех. наук. СПб., 2000. 114 с.
31. Бобарыкина О.Б. Работа изгибаемых стержней из тонкостенных гнутых профилей с учетом влияния редуцирующих и конструктивных факторов: автореф. дис. канд. тех. наук. М., 1995. 202 с.
32. Гуркова А.Г. Кручение тонкостенного стержня открытого и замкнутого профиля и автоматизация процесса расчета: автореф. дис. канд. тех. наук. М., 2000. 168 с.
33. Кретинин А.Н. Тонкостенные балки из гнутых оцинкованных профилей: составных поясов коробчатого сечения и гофрированных стенок: автореф. дис. канд. тех. наук. Новосибирск, 2008. 138 с.
34. Осокин А.В. Развитие метода конечных элементов для расчета систем, включающих тонкостенные стержни открытого профиля: автореф. дис. канд. тех. наук. М., 2010. 134 с.
35. Пашалишвили С.Т. Напряженно-деформированное состояние тонкостенных составных стержней открытого профиля с учетом ползучести бетона: автореф. дис. канд. тех. наук. Тбилиси, 1984. 132 с.
36. Тугаев А.С. Устойчивость пластин и тонкостенных стержней: автореф. дис. канд. тех. наук. Харьков, 1984. 151 с.
37. Белов И.Д., Юрченко В.В. Про проверку устойчивости центрально-сжатых стержней из одиночных тонкостенных холодногнутох профилей открытого сечения // Металлические конструкции. 2010. №4(16). С. 239–250.
38. Туснин А.Р. Численный расчет конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля. М.: МГСУ, АСВ, 2009. 143 с.
39. Туснин А.Р. Точность расчета тонкостенного стержня открытого профиля методом конечных элементов // Промышленное и гражданское строительство. 2003. №6. С. 59–60.
40. Туснин А.Р. Особенности численного расчета конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля // Промышленное и гражданское строительство. 2010. №11. С. 60–63.
41. Туснин А.Р., Туснина О.А. Вычислительная система «Сталькон» для расчета и проектирования стержневых конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля // Промышленное и гражданское строительство. 2012. №8. С. 62–64.
42. Белый Г.И. Влияние эксцентричного опирания концов и уровня приложения нагрузки на устойчивость плоской формы изгиба тонкостенного криволинейного стержня // Сб. трудов ЛИСИ. 1974. С. 18–25.
43. Белый Г.И., Родиков Н.Н. О пространственной деформации тонкостенных стержней, сжатых с двухосными эксцентриситетами // Исследования по механике строительных конструкций и материалов. 1982. С. 30–36.
44. Белый Г.И. Расчет упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформируемой схеме // Межвуз. темат. сб. тр., №42 (Строительная механика сооружений). 1983. С. 40–48.
45. Астахов И.В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутох профилей: автореф. дис. канд. тех. наук. СПб., 2006. 24 с.
46. Катранов И.Г. Несущая способность винтовых и заклепочных соединений стальных тонкостенных конструкций: автореф. дис. канд. тех. наук. М., 2011. 202 с.
47. Кузнецов А.Ю. Прочность и пространственная устойчивость составных стержневых элементов конструкций из холодногнутох профилей: автореф. дис. канд. тех. наук. СПб, 2013. 25 с.
48. Туснина О.А. Несущая способность тонкостенных холодногнутох прогонов покрытия с учетом влияния жесткости соединения с сэндвич-панелями: дис. канд.тех. наук. 2015. 168 с.
49. Рыбаков В.А. Применение полусдвиговой теории В.И. Сливкера для анализа напряженно-деформированного состояния систем тонкостенных стержней: автореф. дис. канд. тех. наук. СПб., 2012. 184 с.
50. Холкин А.Г. Исследование местной устойчивости тонкостенных трапециевидных профилей при продольно-поперечном изгибе: автореф. дис. канд. тех. наук. Омск, 2010. 118 с.
51. Шишкин В.М. Разработка эффективных методов расчета тонкостенных конструкций с учетом пластических и демпфирующих свойств материала: дис. докт. тех. наук. Казань, 2008. 440 с.
52. Жилкин В.А. Численный расчет тонкостенных стержней открытого профиля в MSC Patran-Nastran // Вестник ЧГАА. 2013. №65. С. 84–95.

53. Кикоть А.А., Григорьев В.В. Влияние ширины пояса и параметров стенки на эффективность стального тонкостенного холодногнутого профиля Сигма-образного сечения при работе на изгиб // Инженерно-строительный журнал. 2013. №1(36). С. 97–102.
54. Колесов А.И., Лапшин А.А., Валов А.В. Современные методы исследования тонкостенных стальных конструкций // Проволжский научный журнал. 2007. №1. С. 28–33.
55. Недвига П.Н., Рыбаков В.А. Эмпирические методы оценки несущей способности стальных тонкостенных просечно-перфорированных балок и балок со сплошной стенкой // Инженерно-строительный журнал. 2009. №8(10). С. 27–30.
56. Саламахин С.В., Синельников А.С. Моделирование узла винтового соединения тонкостенных стальных перфорированных профилей методом конечных элементов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. №4(9). С. 53–63.
57. Смазнов Д.Н. Устойчивость при сжатии составных колонн, выполненных из профилей из высокопрочной стали // Инженерно-строительный журнал. 2009. №3(5). С. 42–49.
58. Туснин А.Р., Прокич М. Прочность двутавровых профилей при стеснённом кручении с учётом развития пластических деформаций // Вестник МГСУ. 2014. №1. С. 75–82.
59. Шатов Д.С. Конечно-элементное моделирование перфорированных стоек открытого сечения из холодногнутого профилей // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3 (21). С. 32–35.
60. Vatin N.I., Havula J., Martikainen L., Sinelnikov A.S., Orlova A.V., Salamakhin S.V. Thin-walled cross-sections and their joints: tests and FEM-modelling // Advanced Materials Research. 2014. Vols. 945–949. Pp. 1211–1215.
61. Ведяков И.И., Соловьев Д.В., Одесский П.Д. Несущая способность болтовых соединений легких конструкций из холодногнутого профилей малых толщин // Промышленное и гражданское строительство. 2010. №10. С. 19–22.
62. Hancock G.J., Cao Hung Pham. Shear buckling of channel sections with simply supported ends using the Semi-Analytical Finite Strip Method // Thin-Walled Structures. 2013. No. 71. Pp. 72–80.
63. Heinisuo M., Kukkonen J. Resistance of cold-formed steel members by new eurostandard // Structural Mechanics. 2006. No.2. Pp. 3–21.
64. Landolfo R., Cascini L., Portioli F. Sustainability of steel structures: towards an integrated approach to life-time engineering design // Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China. 2011. No.3. Pp. 304–314.
65. Li Z., Ádány S., Schafer, B.W. Modal identification for shell finite element models of thin-walled members in nonlinear collapse analysis // Thin-Walled Structures. 2013. No.67. Pp. 15–24.
66. Schafer B.W. Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design // Journal of Constructional Steel Research. 2008. No.64. Pp. 766–778.
67. Pasternak H., Ermopoulos J. Design of steel frames with slender joint-panels // Journal of Constructional Steel Research. 1995. No.2. Pp. 165–187.
68. Rossi B., Rasmussen K.J.R. Carrying capacity of stainless steel columns in the low slenderness range. Journal of Structural Engineering (United States). 2013. No.139 (6). Pp. 1088–1092.
69. Ungermann D., Lübke S., Brune B. Tests and design approach for plain channels in local and coupled local-flexural buckling based on Eurocode 3 // Thin-Walled Structures. 2014. Vol. 81. Pp. 108–120.
70. Moen C.D., Schafer B.W. Experiments on cold-formed steel columns with holes // Thin-Walled Structures. 2008. No.46. Pp. 1164–1182.
71. Tarigopula V., Langseth M., Hopperstad O.S., Clausen A.H. Axial crushing of thin-walled high-strength steel sections // International Journal of Impact Engineering. 2006. No.32. Pp. 847–882.
72. Vatin N.I., Nazmeeva T., Guslinsky R. Problems of cold-bent notched c-shaped profile members // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 941–944. Pp. 1871–1875.
73. Vatin N.I., Havula J., Martikainen L., Sinelnikov A.S., Shurovkina L.L. Reticular-stretched thermo-profile: buckling of the perforated web as a single plate // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vols. 725-726. Pp. 722–727.
74. EN 1993-1-3: 2006. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. CEN, Brussels, 2006. 130 p.

*Алексей Сергеевич Синельников, Санкт-Петербург, Россия
+79500411815; эл. почта: alexey_sinelnikov@mail.ru*

© Синельников А. С., 2015

doi: 10.5862/MCE.57.7

Reticular-stretched thermoprofile: a numerical and analytical study

A.S. Sinelnikov,

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
+7(911)7066001; e-mail: alexey_sinelnikov@mail.ru

Key words

thin-walled cold-formed profile; strength; finite-element method; Eurocode; effective cross-section

Abstract

There are certain advantages to utilizing thin-walled cold-formed profiles in construction, as their use enables construction in all weather conditions, and allows to achieve better assemblage accuracy and to reduce costs. Thermoprofiles have slots in webs that decrease thermal flow through the web, but have a negative effect on the strength of the profiles.

The reticular-stretched thermoprofile is the new type of thin-walled perforated profile. Studies undertaken by the authors have revealed that no analytical research of the profile has been carried out yet. Numerical analysis allowed to obtain the values of critical compressed loads for reticular-stretched thermoprofiles with different parameters. Reduction coefficients were calculated for strength analysis in accordance with Eurocode 3 and Ayrumyan's manual.

References

1. Telichenko V.I., Korol Ye.A., Kagan P.B., Sborshchikov S.B., Dmitriyev A.N., Kardanskaya N.L. *Osnovy upravleniya investitsionno-stroitelnyimi programmami v usloviyakh megapolisa* [Management basis of investment-constructional programs in a city]. Moscow: Izdatelstvo ASV. 2008. 240 p. (rus)
2. Vilman Yu.A., Sinenko S.A., Grabovyy P.G., Grabovyy K.P., Korol Ye.A., Kagan P.B. *Osobnosti tekhnologii i mekhanizatsii vozvedeniya mnogoetazhnykh zdaniy* [Features of technology and mechanization of multistory building construction]. *Vestnik MGSU*. 2012. No. 4. Pp. 170–174. (rus)
3. Zhmarin Ye.N. *Mezhdunarodnaya assotsiatsiya legkogo stalnogo stroitelstva* [International association of light-gauge steel construction]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2012. No. 2. Pp. 27–30. (rus)
4. Grabovyy P.G., Korol Ye.A., Grabovyy K.P., Semenov V.N., Kagan P.B., Pugach Ye.M. *Innovatsionnyye tekhnologii razrabotki programmno-tselevoy sistemy upravleniya energosberezheniyem v stroitelstve* [Innovational technologies of management energy saving development in construction]. Moscow: Izdatelstvo NTO PMU, 2014. 235 p. (rus)
5. Ushakov A.Yu., Dolganov A.I. *Avtomatizatsiya proyektirovaniya derevyannykh konstruksiy v maloetazhnom stroitelstve* [CAD systems for wood structures in low-rise construction]. *Science review*. 2014. No.7-1. Pp. 140–143. (rus)
6. Telichenko V.I., Korol Ye.A., Kagan P.B., Sborshchikov S.B. *Upravleniye proyektami rekonstruksii i renovatsii zhiloy zastroyki* [Design management of residential building renovation]. Moscow: Izdatelstvo ASV. 2009. 208 p. (rus)
7. Mikhaylin M.V., Solovyev A.K. *Primeneniye energoeffektivnykh tekhnologiy pri rekonstruksii zdaniy i sooruzheniy sovremennyye tendentsii i osobnosti* [Usage of energy saving technologies in building and structures renovation: features]. *Construction materials, the equipment, technologies of XXI century*. 2008. No.11. Pp. 62. (rus)
8. *SNiP II-23-81*. Stalnyye konstruksii* [Steel structures]. *Vzamen SNiP II-B.3-74. Vved. 01-01-1987*. Moscow: TsITP Gosstroya SSSR. 1990. 96 p. (rus)
9. *SP 16.13330.2011. Stalnyye konstruksii* [Steel structures]. *Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-23-81*. Vved. 2011-05-20*. Moscow: TsNIISK im. V.A. Kucherenko. 2011. 172 p. (rus)
10. Almazov V.O. *Problemy ispolzovaniya Yevrokodov v Rossii* [Usage problems of Eurocodes in Russia]. *Promyshlennoye i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2012. No.7. Pp. 36–38. (rus)
11. *Rekomendatsii po proyektirovaniyu, izgotovleniyu i montazhu ograzhdayushchikh i nesushchikh konstruksiy iz stalnykh gnutnykh profiley povyshennoy zhestkosti* [Design manual of thin-walled steel construction]. *Vved. 1999-07-07*. Moscow: TsNIIPSK im. Melnikova, 1999. 32 p. (rus)
12. *Rekomendatsii po proyektirovaniyu, izgotovleniyu i montazhu konstruksiy karkasa maloetazhnykh zdaniy i mansard iz kholodnognutnykh stalnykh otsinkovannykh profiley proizvodstva OOO «BaltProfil»* [Design manual of thin-walled steel construction. LLC «BaltProfil»]. *Vved. 2004-01-01*. Moscow: TsNIIPSK im. Melnikova, 2004. 69 p. (rus)

13. STO 0061-2008. *Progony i rigeli stalnyye otsinkovannyye iz kholodnogutykh profiley S-obraznogo i Z-obraznogo secheniy dlya sistem pokrytiy i sten zdaniy* [Steel zinc-galvanized rafters and beams with C- and Z-crosssection for roofing and wall systems]. *Vved. 2008-12*. Moscow: TsNIIPSK im. Melnikova. 2008. 90 p. (rus)
14. Timoshenko S.P. *Prochnost i kolebaniya elementov konstruksiy* [Strength and vibration of structural elements]. Moscow: Nauka. 1975. 704 p. (rus)
15. Timoshenko S.P. *Teoriya uprugosti* [Elasticity theory]. Moscow: Nauka. 1975. 575 p. (rus)
16. Timoshenko S.P. *Ustoychivost sterzhney, plastin i obolochek* [Shell, plate and bar-elements buckling]. Moscow: Nauka. 1971. 807 p. (rus)
17. Bychkov D.V. *Stroitel'naya mekhanika sterzhnevnykh tonkostennykh konstruksiy* [Structural mechanics of thin-walled frame structures]. Moscow: Gostroyizdat. 1962. 476 p. (rus)
18. Wagner C., Pretschner W. Verdrehung und Knickung von offenen Profilen. *Luftfahrtforschung*. 1934. No. 6. Pp. 174–180.
19. Vlasov V.Z. *Tonkostennyye uprugiy sterzhni* [Thin-walled elastic bar-elements]. Moscow: Fizmatlit. 1959. 568 p. (rus)
20. Ayrumyan E.L. Issledovaniya deystvitelnoy raboty tonkostennykh kholodnogutykh progonoov iz otsinkovannoy stali [Research of real behavior of thin-walled cold-formed rafters]. *Promyshlennoye i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2002. No.6. Pp. 31–34. (rus)
21. Ayrumyan E.L., Belyy G.I. Issledovaniye raboty stalnoy fermy iz kholodnogutykh profiley s uchetom ikh mestnoy i obshchey ustoychivosti [Research of truss real behavior produced from thin-walled cold-formed profiles taking into account local and overall buckling]. *Promyshlennoye i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2010. No.5. Pp. 41–44. (rus)
22. Tusnin A.R. *Raschet i proyektirovaniye konstruksiy iz tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya* [Numerical calculation of structures made of open-section thin-walled bars]: dis. dokt. tekhn. nauk. Moscow. 2003. 353 p. (rus)
23. Tusnin A.R. Konechnyy element dlya chislennogo rascheta konstruksiy iz tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya [Finite element for numeric computation of structures of thin-walled open profile bars]. *Metallicheskiye konstruksii*. 2009. No.1(15). Pp. 73–78. (rus)
24. Belyy, G.I. *Prostranstvennaya rabota i predelnyye sostoyaniya sterzhnevnykh elementov metallicheskiy konstruksiy: dis. dokt. tekhn. nauk* [Three-axis behavior and ultimate states of bar-elements steel structures: doctoral theses]. Leningrad. 1987. 464 p. (rus)
25. Lalin V.V., Rybakov V.A., Morozov, S.A. Issledovaniye konechnykh elementov dlya rascheta tonkostennykh sterzhnevnykh sistem [The finite elements Research for Calculation of Thin-Walled Bar Systems]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 1 (27). Pp. 53–73. (rus)
26. Perelmuter A.V., Slivker V.I. *Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza* [Design models of structures and their analysis]. Moscow: Izd-vo DMK Press. 2002. 618 p. (rus)
27. Katyushin V.V. *Zdaniya s karkasami iz stalnykh ram peremennogo secheniya (raschet, proyektirovaniye, stroitelstvo)* [Steel frame building (analysis, design, construction)]. Moscow: Stroyizdat. 2005. 656 p. (rus)
28. Yegorov, V.V. *Svobodnyye kolebaniya tonkostennykh krivolinyeynykh sterzhney proizvolnogo profilya, zagruzhennykh parametricheskoy nagruzkoy: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Free vibrations of thin-walled curvilinear bar elements with free oriented load: candidate theses]. Saint-Petersburg. 2001. 127 p. (rus)
29. Zverev V.V. *Effektivnyye stroitelnyye metallokonstruksii na osnove obyemno-formovannogo tonkolistovogo prokata: issledovaniye, proyektirovaniye, izgotovleniye: avtoref. dis. dokt. tekhn. nauk* [Effective metalwork on the basis of the molded body-rolled products: Research, design, manufacture: doctoral theses]. Lipetsk. 2000. 395 p. (rus)
30. Belyy A.G. *Deformatsionnyy raschet i ustoychivost tonkostennykh prizmaticheskikh sterzhney proizvolnogo profilya szhatykh s dvukhosnym eksstentrisitetom: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Deformation calculation and stability of thin-walled prismatic bars of arbitrary profile biaxial eccentric compression: candidate theses]. Saint-Petersburg. 2000. 114 p. (rus)
31. Bobarykina O.B. *Rabota izgibayemykh sterzhney iz tonkostennykh gnutnykh profiley s uchetom vliyaniya redutsiruyushchikh i konstruktivnykh faktorov: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Behavior of bending thin-walled bar-elements taking into account reduction and constructional factors: candidate theses]. Moscow. 1995. 202 p. (rus)
32. Gurkova A.G. *Krucheniy tonkostennogo sterzhnya otkrytogo i zamknutogo profilya i avtomatizatsiya protsessa rascheta: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Torsion of thin-walled open- and closed cross-section profile and its software analysis: candidate theses]. Moscow. 2000. 168 p. (rus)
33. Kretinin A.N. *Tonkostennyye balki iz gnutnykh otsinkovannykh profiley: sostavnykh poyasov korobchatogo secheniya i gofrirovannykh stenok: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Thin-walled beams with box – and S-shaped wall: candidate theses]. Novosibirsk. 2008. 138 p. (rus)
34. Osokin, A.V. *Razvitiye metoda konechnykh elementov dlya rascheta sistem, vkluchayushchikh tonkostennyye sterzhni otkrytogo profilya: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Development of the finite element method for the calculation of systems, including thin-walled open profile: candidate theses]. Moscow, 2010. 134 p. (rus)

35. Pashalishvili S.T. *Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye tonkostennykh sostavnykh sterzhney otkrytogo profilya s uchetom polzuchesti betona: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Stress-strain behavior of built-up thin-walled bar-elements with opened cross-section taking into account creep of concrete: candidate theses]. Tbilisi. 1984. 132 p. (rus)
36. Tugayev A.S. *Ustoychivost plastin i tonkostennykh sterzhney: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Stability of plates and thin-walled bar-elements: candidate theses]. Kharkov. 1984. 151 p. (rus)
37. Belov I.D., Yurchenko V.V. Pro proverku ustoychivosti tsentralno-szhatykh sterzhney iz odinoknykh tonkostennykh kholodnognutnykh profiley otkrytogo secheniya [Check the stability of the central compressed rods of single walled cold-formed profiles open section]. *Metallicheskiye konstruksii*. 2010. No.4(16). Pp. 239–250. (rus)
38. Tusnin A.R. *Chislenny raschet konstruksiy iz tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya* [Numerical calculation of structures of thin-walled open section]. Moscow: MGSU: ASV. 2009. 143 p. (rus)
39. Tusnin A.R. Tochnost rascheta tonkostennogo sterzhnya otkrytogo profilya metodom konechnykh elementov [Exactness of numerical calculation of open-section thin-walled bar-elements]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2003. No.6. Pp. 59–60. (rus)
40. Tusnin A.R. Osobennosti chislennogo rascheta konstruksiy iz tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya [Features of numerical calculation of structures made of open-section thin-walled bars]. *Promyshlennoe i grazhdanskoye stroitelstvo*. 2010. No.11. Pp. 60–63. (rus)
41. Tusnin A.R., Tusnina O.A. Vychislitel'naya sistema "Stalkon" dlya rascheta i proyektirovaniya sterzhnevnykh konstruksiy iz tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya [Numerical calculation of structures made of open-section thin-walled bars: software "Stalkon"]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2012. No. 8. Pp. 62–64. (rus)
42. Bely G.I. Vliyaniye eksentrichnogo opiraniya kontsov i urovnya prilozheniya nagruzki na ustoychivost ploskoy formy izgiba tonkostennogo krivolinyenogo sterzhnya [Influence of eccentric bearing ends and application-level load on stability of plane bending of thin-walled curved bar]. *Sb.trudov LISI*. 1974. Pp.18–25. (rus)
43. Bely G.I., Rodikov N.N. O prostranstvennoy deformatsii tonkostennykh sterzhney, szhatykh s dvukhosnymi eksstentrisitetami [Spatial deformation of thin-walled bar-elements compressed with dual eccentricity]. *Issledovaniya po mekhanike stroitelnykh konstruksiy i materialov*. 1982. Pp.30–36. (rus)
44. Bely, G.I. Raschet uprugoplasticheskikh tonkostennykh sterzhney po prostranstvenno-deformiruyemoy scheme [Calculation of elastic-plastic thin-walled in the space-deformable scheme]. *Mezhvuz. temat. sb. tr., No.42 (Stroitel'naya mekhanika sooruzheniy)*. 1983. Pp. 40–48. (rus)
45. Astakhov I.V. *Prostranstvennaya ustoychivost elementov konstruksiy iz kholodnognutnykh profiley: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Spatial stability of structural elements of cold-formed profiles: candidate theses]. Saint-Petersburg. 2006. 24 p. (rus)
46. Katranov I.G. *Nesushchaya sposobnost vintovykh i zaklepochnykh soyedineniy stalnykh tonkostennykh konstruksiy: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Bearing capacity of screw and riveted joint: candidate theses]. Moscow. 2011. 202 p. (rus)
47. Kuznetsov A.Yu. *Prochnost i prostranstvennaya ustoychivost sostavnykh sterzhnevnykh elementov konstruksiy iz kholodnognutnykh profiley: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Strength and spatial buckling of constructional built-up bar-elements made of cold-formed profiles: candidate theses]. Saint-Petersburg. 2013. 25 p. (rus)
48. Tusnina O.A. *Nesushchaya sposobnost tonkostennykh kholodnognutnykh progonov pokrytiya s uchetom vliyaniya zhestkosti soyedineniya s sendvich-panelyami: dis. kand.tekhn. nauk* [Bearing capacity of thin-walled cold-formed rafters taking into account their connections with sandwich panel: candidate theses]. 2015. 168 p. (rus)
49. Rybakov V.A. *Primeneniye polusdvigovoy teorii V.I. Slivkera dlya analiza napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sistem tonkostennykh sterzhney: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Application of semi-shear theory of V.I. Slivkera for analysis of stress-strain state of thin-walled systems: candidate theses]. Saint-Petersburg. 2012. 184 p. (rus)
50. Kholkin A.G. *Issledovaniye mestnoy ustoychivosti tonkostennykh trapetsiyevidnykh profiley pri prodolno-poperechnom izgibe: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Study local stability of thin-walled trapezoidal profiles with longitudinal and transverse bending: candidate theses]. Omsk. 2010. 118 p. (rus)
51. Shishkin V.M. *Razrabotka effektivnykh metodov rascheta tonkostennykh konstruksiy s uchetom plasticheskikh i dempfiyuyushchikh svoystv materiala: dis. dokt. tekhn. nauk* [Development of effective analysis method of thin-walled construction taking into account plastic and damp material features: doctoral theses]. Kazan. 2008. 440 p. (rus)
52. Zhilkin V.A. *Chislenny raschet tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya v MSC Patran-Nastran* [Numerical analysis of thin-walled opened cross-section profile in software Patran-Nastran]. *Vestnik CSAA*. 2013. No.65. Pp. 84–95. (rus)
53. Kikot A.A., Grigoryev V.V. Vliyaniye shiriny poyasa i parametrov stenki na effektivnost stalnogo tonkostennogo kholodnognutnogo profilya Sigma-obraznogo secheniya pri rabote na izgib [Influence of flange width and wall parameters on effectiveness of cold-formed steel Sigma-profile in bending behavior]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 1 (36). Pp. 97–102. (rus)

54. Kolesov A.I., Lapshin A.A., Valov A.V. Sovremennyye metody issledovaniya tonkostennykh stalnykh konstruktsey [Contemporary methods of thin-walled steel structures research]. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2007. No.1. Pp. 28–33. (rus)
55. Nedviga P.N., Rybakov V.A. Empiricheskiye metody otsenki nesushchey sposobnosti stalnykh tonkostennykh prosechno-perforirovannykh balok i balok so sploshnoy stenкой [Empirical methods for estimating the bearing capacity of steel thin-walled expanded perforated beams and beams with a solid wall]. *Magazine of Civil Engineering*. 2009. No. 8 (10). Pp. 27–30. (rus)
56. Salamakhin S.V., Sinelnikov A.S. Modelirovaniye uzla vintovogo soyedineniya tonkostennykh stalnykh perforirovannykh profiley metodom konechnykh elementov [Modeling node screwing thin perforated steel profiles by finite element method]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2013. No. 4 (9). Pp. 53–63. (rus)
57. Smaznov D.N. Ustoychivost pri szhatii sostavnykh kolonn, vypolnennykh iz profiley iz vysokoprochnoy stali [Compressive resistance of composite columns made of high strength steel profiles]. *Magazine of Civil Engineering*. 2009. No. 3 (5). Pp. 42–49. (rus)
58. Tusnin A.R., Prokich M. Prochnost dvutavrovyykh profiley pri stesennom kruchenii s uchedom razvitiya plasticheskikh deformatsiy [Resistance of i-beams in warping torsion with account for the development of plastic deformations]. *Vestnik MGSU*. 2014. No.1. Pp. 75–82. (rus)
59. Shatov D.S. Konechno-elementnoye modelirovaniye perforirovannykh stoyek otkrytogo secheniya iz kholodnogutykh profiley [Finite modeling of thin-walled perforated studs]. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 3 (21). Pp. 32–35. (rus)
60. Vatin N.I., Havula J., Martikainen L., Sinelnikov A.S., Orlova A.V., Salamakhin S.V. Thin-walled cross-sections and their joints: tests and FEM-modelling. *Advanced Materials Research*. 2014. Vols. 945–949. Pp. 1211–1215.
61. Vedyakov I.I., Solovyev D.V., Odesskiy P.D. Nesushchaya sposobnost boltovykh soyedineniy legkikh konstruktsey iz kholodnogutykh profiley malykh tolshchin [Bearing capacity of bolted connection of thin-walled cross-section structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2010. No.10. Pp. 19–22. (rus)
62. Hancock G.J., Cao Hung Pham. Shear buckling of channel sections with simply supported ends using the Semi-Analytical Finite Strip Method. *Thin-Walled Structures*. 2013. No. 71. Pp. 72–80.
63. Heinisuo M., Kukkonen J. Resistance of cold-formed steel members by new eurostandard. *Structural Mechanics*. 2006. No.2. Pp. 3–21.
64. Landolfo R., Cascini L., Portioli F. Sustainability of steel structures: towards an integrated approach to lifetime engineering design. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*. 2011. No.3. Pp. 304–314.
65. Li Z., Ádány S., Schafer B.W. Modal identification for shell finite element models of thin-walled members in nonlinear collapse analysis. *Thin-Walled Structures*. 2013. No.67. Pp. 15–24.
66. Schafer, B.W. Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design. *Journal of Constructional Steel Research*. 2008. No.64. Pp. 766–778.
67. Pasternak, H., Ermopoulos, J. Design of steel frames with slender joint-panels. *Journal of Constructional Steel Research*. 1995. No.2. Pp. 165–187.
68. Rossi B., Rasmussen K.J.R. Carrying capacity of stainless steel columns in the low slenderness range. *Journal of Structural Engineering (United States)*. 2013. No.139 (6). Pp. 1088–1092.
69. Ungermann, D., Lübke, S., Brune, B. Tests and design approach for plain channels in local and coupled local-flexural buckling based on eurocode 3. *Thin-Walled Structures*. 2014. Vol. 81. Pp. 108–120.
70. Moen, C.D., Schafer, B.W. Experiments on cold-formed steel columns with holes. *Thin-Walled Structures*. 2008. No.46. Pp. 1164–1182.
71. Tarigopula, V., Langseth, M., Hopperstad, O.S., Clausen, A.H. Axial crushing of thin-walled high-strength steel sections. *International Journal of Impact Engineering*. 2006. No.32. Pp. 847–882.
72. Vatin N.I., Nazmeeva T., Guslinsky R. Problems of cold-bent notched c-shaped profile members. *Advanced Materials Research*. 2014. Vols.941-944. Pp. 1871–1875.
73. Vatin N.I., Havula J., Martikainen L., Sinelnikov A.S., Shurovkina L.L. Reticular-stretched thermo-profile: buckling of the perforated web as a single plate. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. Pp. 722–727.
74. EN 1993-1-3: 2006. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. CEN, Brussels. 2006. 130 p.

Full text of this article in Russian: pp. 74–85