

ISSN 2304-6295

Finite Element Analysis of Cold-Formed Steel Channels with Solid and Slotted Webs Subjected to Web Crippling under Interior Two Flange Load Case

Degtyareva, Natalia1* 匝

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation Correspondence:* email <u>degtyareva_nv@mail.ru</u>; contact phone <u>+79058318194</u>

Keywords:

Cold-formed steel design; Web crippling; Cold-formed steel section; Channel sections; Perforated webs; Slotted channels; Slotted webs; Finite element method; Numerical study

Abstract:

The numerical study was undertaken to investigate the web crippling behaviour and capacities of cold-formed steel channels with staggered slotted perforations with their flanges unfastened to the supports under the interior two flange load case. Finite element models were developed in ANSYS and validated using experimental results. The effect of initial geometric imperfections on the web crippling capacity was investigated. The closest web crippling capacities for the solid and slotted models to the web crippling capacities obtained from the tests were obtained for the scaling factor of the initial geometric imperfection of $-d_1/150$. The results show that the developed finite element models predicted the web crippling capacities and failure mode shapes of the solid and slotted channels. Proposed design equations for perforated channels showed a good agreement with FE results. However, the formulas are based on the test results of a limited range of sections and perforation patterns. The FE models can be used to investigate the effects of various geometrical and mechanical parameters of the slotted channels in further parametric studies.

1 Introduction

Легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК) используются при строительстве малоэтажных зданий и сооружений, а также для реконструкции существующих зданий. Одним из видов ЛСТК являются термопрофили (рис. 3) – конструкции с перфорацией стенки в виде просечек, расположенных в шахматном порядке с целью снижения теплопроводности [1]–[3]. Несмотря на то, что термопрофили известны с 90-х годов прошлого века, рекомендации по расчету и проектированию таких конструкций разработаны не в полном объеме. Зарубежные нормативные документы [4], [5] не содержат информации по расчету перфорированных профилей такого типа. В российских нормах СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования» (Russian Federation applicable Code Design SP 260.1325800.2016 «Cold-formed thin-walled steel profile and galvanized corrugated plate constructions. Design rules») [6] представлены рекомендации по расчету перфорированных профилей на основе учета ослабления поперечного сечения отверстиями за счет введения эффективной толщины. Применение этих рекомендаций возможно не для всех случаев нагружения.

Влияние перфораций стенки термопрофилей на несущую способность исследовано при работе профилей на сжатие [7]–[11], срез [12] и изгиб [10], [13]–[15]. В статье [16] представлены результаты экспериментальных исследований перфорированных профилей при местном действии промежуточной и концевой нагрузки на две полки. На рис. 1 показаны схемы действия нагрузки на одну полку (рис. 1,a,b) и на две полки(1,c,d). На рис. 2 показано, как схемы нагружения, существующие на практике, можно отнести к одному из условий действия нагрузки,

Degtyareva, N.

показанных на рис.1. В этой статье рассмотрен случай действия промежуточной нагрузки на две полки (рис. 1,d).



Рис. 1 – Варианты действия местной нагрузки для испытаний: (а) нагрузка – концевая, на одну полку; (b) нагрузка – промежуточная, на одну полку, (c) нагрузка – концевая, на две полки; (d) нагрузка – промежуточная, на две полки [17] Fig. 1 - Loading conditions for web crippling tests: (a) EOF loading; (b) IOF loading; (c) ETF loading; (d) ITF loading [17]



Рис. 2 - Классификация условий нагружения, встречающихся на практике [17] Fig. 2 - Classification of loading conditions occurring in practice [17]

В результате экспериментальных исследований перфорированных профилей при местном действии промежуточной нагрузки на две полки (рис. 1,d) было определено, что перфорации снижают несущую способность профилей в среднем на 88%. На основе полученных экспериментальных данных были разработаны формулы для определения несущей способности перфорированных профилей. Эти формулы применимы только для тех видов и размеров профилей, которые были рассмотрены в эксперименте, т.е. для двух вариантов высоты и толщины профилей и одного вида перфораций. Профили с другими геометрическими и механическими характеристиками должны быть также изучены. Конечно-элементное (КЭ) моделированных профилей [18]–[22] и профилей с одиночными отверстиями в стенке [23], [24] при местном действии нагрузки на две полки.

Основной целью данной работы было выполнить КЭ моделирование неперфорированных и перфорированных профилей для исследования несущей способности при местном действии промежуточной нагрузки на две полки. Для достижения этой цели анализировалось влияние начальных геометрических несовершенств на несущую способность КЭ моделей, а также выполнялась валидация КЭ моделей, в рамках которой результаты расчета в программном комплексе ANSYS сравнивались с результатами эксперимента. Объектом исследования были легкие стальные тонкостенные неперфорированные и перфорированные профили, а предметом

Degtyareva, N.

Finite element analysis of cold-formed steel channels with solid and slotted webs subjected to web crippling under interior two flange load case;

исследования – несущая способность перфорированных профилей при местном действии промежуточной нагрузки на две полки.

2 Materials and Methods

В программном комплексе ANSYS были созданы КЭ модели перфорированных и неперфорированных профилей, которые были испытаны в [16]. В данном разделе приводится описание разработанных КЭ моделей.



Рис. 3 - Испытанные и замоделированные профили: (а) неперфорированные; (b) перфорированные с номинальной высотой 195 мм; (с) перфорированные с номинальной высотой 145 мм

Fig. 3 - Tested and modeled profiles: (a) with solid web; (b) with slotted web with nominal depth of 195 mm; (c) with slotted web with nominal depth of 145 mm

Испытанные профили показаны на рис. 3. В эксперименте профили имели номинальную высоту 195 мм и 145 мм и номинальную толщину 1,5 мм и 2 мм. Номинальная ширина полки была одинаковой для всех профилей и была равна 70 мм. Длины профилей высотой 145 мм и 195 мм были равны 750 мм и 1000 мм, соответственно. В перфорированных профилях отверстия располагались в двух областях. В профилях высотой 195 мм было восемь рядов перфораций по четыре ряда в каждой области (рис. 3,b). В профилях высотой 145 мм было шесть рядов перфораций, по три ряда в каждой области (рис. 3,c). Длина одного отверстия была равна 75 мм, ширина – 3,5 мм. Шаг отверстий по длине профиля составлял 100 мм, по высоте профиля – 10 мм. Фактические геометрические и прочностные характеристики профилей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики испытанных профилей **Table 1. Properties of tested channels**

№ п/п Наименование		l _b	f _y	t _w	r _i	b _f	bı	d	a ₁	d ₁
	мм	МПа	Мм	ММ	мм	ММ	ММ	ММ	м	
	Неперфорированные профили									
1	ITF-C-145-1.5-25	25	404	1,43	4,4	69,1	17,6	146,7	-	136,5
2	ITF-C-145-2.0-25	25	340	1,94	4,5	69,1	18,2	146,9	-	135,9
3	ITF-C-195-1.5-25	25	404	1,43	3,0	68,6	17,7	195,9	-	188,4
4	ITF-C-195-2.0-25	25	340	1,94	3,9	70,1	18,4	196,9	-	187,2
5	ITF-C-145-1.5-50	50	404	1,43	3,3	69,4	17,4	146,9	-	138,9
6	ITF-C-145-2.0-50	50	340	1,94	4,6	70,0	18,7	147,4	-	136,2
7	ITF-C-195-1.5-50	50	404	1,43	4,1	68,6	18,2	195,4	-	185,7
8	ITF-C-195-2.0-50	50	340	1,94	4,1	69,6	18,7	196,9	-	186,7
9	ITF-C-145-1.5-100	100	404	1,43	4,0	69,4	17,2	146,9	-	137,4
10	ITF-C-145-2.0-100	100	340	1,94	4,6	70,0	18,7	147,4	-	136,2
11	ITF-C-195-1.5-100	100	404	1,43	4,4	68,1	17,9	195,9	-	185,7
12	ITF-C-195-2.0-100	100	340	1,94	4,3	68,9	18,7	197,9	-	187,4
	Перфорированные пр	офили	1							
13	ITF-PC-145-1.5-25	25	404	1,43	3,5	69,4	18,2	145,9	32,0	137,4
14	ITF-PC-145-2.0-25	25	340	1,94	3,8	69,3	18,9	145,9	22,5	136,4
15	ITF-PC-195-1.5-25	25	404	1,43	3,3	68,9	19,3	196,4	43,0	188,4
16	ITF-PC-195-2.0-25	25	340	1,94	3,5	69,0	19,2	196,4	42,0	187,4
17	ITF-PC-145-1.5-50	50	404	1,43	3,6	69,6	18,2	146,6	27,0	137,9
18	ITF-PC-145-2.0-50	50	340	1,94	3,9	70,1	18,7	145,9	40,5	136,2
19	ITF-PC-195-1.5-50	50	404	1,43	3,4	68,0	18,4	194,9	43,0	186,7
20	ITF-PC-195-2.0-50	50	340	1,94	4,1	68,8	19,6	197,9	42,0	187,8
21	ITF-PC-145-1.5-100	100	404	1,43	3,8	69,7	17,9	146,4	32,0	137,4
22	ITF-PC-145-2.0-100	100	340	1,94	3,3	68,9	18,9	146,9	38,0	138,4
23	ITF-PC-195-1.5-100	100	404	1,43	3,9	68,1	18,4	195,9	47,0	186,7
24	ITF-PC-195-2.0-100	100	340	1,94	3,5	68,8	19,1	196,9	41,0	187,9

Обозначения: Ib – ширина опорной пластины, fv – предел текучести, tw – толщина стенки профиля, r_i – внутренний радиус изгиба, b_f – ширина полки профиля, b_l – размер отгиба, d – высота профиля, d₁- высота плоской части стенки профиля, a₁ - расстояние от края профиля до первого ряда отверстий.

2.1 Типы конечных элементов и свойства материала

При испытаниях профиль располагался между двумя опорными пластинами. На рис. 4,а показана установка для испытаний. Учитывая то, что установка для испытаний является симметричной и номинально перфорации в термопрофилях расположены симметрично (фактическое расположение областей перфораций с учетом расстояния а1 не учитывалось в КЭ моделях), КЭ модель состояла из одной верхней опорной пластины и верхней половины профиля (рис. 4, b и 4, c).

Опорная пластина и профиль моделировались с помощью четырехузлового конечного элемента shell181. Для профиля без перфораций, неперфорированных частей термопрофиля и для опорной пластины сетка конечных элементов была квадратной с размером конечных элементов 5 мм (рис. 4,b). В профиле с перфорированной стенкой сетка конечных элементов имела сгущение в местах расположения перфораций: вдоль высоты стенки профиля размер конечных элементов был равен 1,5 мм.

Моделирование контактного взаимодействия между опорной пластиной и профилем выполнялось с помощью конечных элементов CONTA173 и TARGE170.

Degtyareva, N.

Материал профиля был принят идеально упруго-пластичным. Опорная пластина была идеально упругой. Для профиля и опорной пластины модуль упругости и коэффициент Пуассона были равны 200 ГПа и 0,3, соответственно. Пределы текучести для неперфорированных и перфорированных профилей приведены в табл. 1. Для моделирования трения между опорной пластиной и профилем был задан коэффициент трения, равный 0,4, как и в [20].



Рис. 4 - Установка для испытаний (a) [16] и конечно-элементные модели неперфорированного профиля (b) и перфорированного профиля (c) Fig. 4 - Test Set up (a) [16] and finite element models of solid channel (b) and slotted channel (c)

2.2 Нагрузка и граничные условия

КЭ модели и заданные граничные условия показаны на рис. 5. С учетом симметрии профилей при испытаниях была создана КЭ модель только верхней часть установки для испытаний и заданы граничные условия симметрии. Узлы профиля и опорной пластины, расположенные посередине профиля, не перемещаются по направлению оси Z. Для того, чтобы учесть, что жесткость опорной пластины выше, чем жесткость профиля, для всех узлов пластины углы поворота вокруг оси X были объединены, а вокруг оси Z были запрещены. Все узлы опорной пластины не перемещаются по направлению осей X и Z, так как при испытаниях пластина не перемещалась в указанных направлениях. Вертикальные перемещения узлов, расположенных посередине опорной пластины, в месте приложения нагрузки, были объединены.



Рис. 5 - Граничные условия Fig. 5 - Boundary conditions

При нагружении КЭ модели задавалось перемещение одного из узлов с объединенными вертикальными перемещениями в направлении противоположном направлению оси Ү. Перемещение узла осуществлялось шагами. На первом шаге было задано небольшое перемещение 0,001 мм, на втором шаге перемещение было 15 мм. На каждом шаге перемещение прикладывалось с малым приращением.

2.3 Начальные геометрические несовершенства

Расчет неперфорированных и перфорированных профилей выполнялся с учетом начальных геометрических несовершенств. Геометрия начальных несовершенств профилей определялась в соответствии с низшей формой потери устойчивости. Перемещения КЭ модели на первой форме потери устойчивости умножались на $d_1/150$ (где d_1 – высота плоской части стенки профиля) в соответствии с рекомендациями [25] и так же, как и в [20]. На рис. 6 показана низшая форма потери устойчивости, характерная для всех рассмотренных перфорированных и неперфорированных профилей. В данном исследовании рассматривалось три варианта учета начальных геометрических несовершенств: без учета начальных несовершенств и для случаев, когда коэффициент, определяющий величину начального несовершенства был положительный $d_1/150$ и отрицательный – $d_1/150$.

Влияние начальных геометрических несовершенств на несущую способность при местном действии нагрузки показано на рис. 7. При положительном коэффициенте $d_1/150$ начальная геометрия профилей менялась таким образом, что полки перемещались наружу, как и при потере устойчивости (рис. 6). В этом случае величина несущей способности была максимальной для неперфорированного и переформированного профилей. При отрицательном значении коэффициента полки перемещались внутрь, то есть в ту же сторону, что и при нагружении (рис. 8). При такой начальной геометрии КЭ моделей величина несущей способности была минимальной для двух представленных видов профилей. Когда расчет выполнялся без учета начальных несовершенств профилей разрушающая нагрузка была выше, чем при коэффициенте $-d_1/150$ и ниже, чем при коэффициенте $d_1/150$.

В табл. 2 представлены результаты КЭ моделирования для всех испытанных профилей с учетом и без учета начальных геометрических несовершенств. Наибольшие значения несущей способности всех КЭ моделей были получены, когда начальные геометрические несовершенства были положительными. В этом случае среднее значение отношения P_{test}/P_{FEA} и коэффициент вариации для всех рассмотренных профилей были равны 0,90 и 0,092, соответственно.



.13939 .250785 .362181 .473576 .584971 .696366 .807762 .919157 1.03055





Рис. 7 - Графики зависимости нагрузки от перемещений для испытанных образцов и КЭ моделей с учетом начальных геометрических несовершенств для профиля ITF-C-195-1.5-100 (слева) и ITF-PC-195-1.5-100 (справа) Fig. 7 - Load-displacement curves of tested specimens and FE models with different initial imperfections for ITF-C-195-1.5-100 (left column) and ITF-PC-195-1.5-100 (right column)

Несущая способность при местном действии нагрузки КЭ моделей неперфорированных и перфорированных профилей была наиболее близка к несущей способности испытанных профилей при отрицательной величине начальных геометрических несовершенств: среднее значение отношения P_{test}/P_{FEA} и коэффициент вариации были равны 0,97 и 0,065, соответственно. Следовательно, для учета начальных геометрических несовершенств в дальнейших исследованиях несущей способности перфорированных профилей при местном действии нагрузки было выбрано значение – *d*₁/150.

При КЭ расчете без учета начальных несовершенств величины несущей способности для всех КЭ моделей были больше величин несущей способности при отрицательном значении начальных геометрических несовершенств и меньше несущей способности при положительном значении начальных геометрических несовершенств. Среднее значение отношения P_{test}/P_{FEA} было равно 0,93, а коэффициент вариации составил 0,080.

2.4 Метод расчета

Расчет в программном комплексе ANSYS осуществлялся в два этапа. Сначала выполнялся расчет на устойчивость для определения первой формы потери устойчивости, по которой задавались начальные геометрические несовершенства. Затем для определения разрушающих нагрузок проводился нелинейный расчет КЭ моделей. Нелинейный расчет выполнялся с учетом физической и геометрической нелинейностей.

Исследования выполнялись с использованием суперкомпьютерных ресурсов ЮУрГУ [26]. Degtyareva, N.

Finite element analysis of cold-formed steel channels with solid and slotted webs subjected to web crippling under interior two flange load case;

Таблица 2. Экспериментальные и численные значения несущей способности Table 2. Experimental and calculated ultimate web crippling capacities

	Наименование		При начальных		При начальных		Без учета	
Nº		Ptost	несовершенствах		несовершенствах		начальных	
		[16]	<i>d</i> ₁ /150		$-d_1/150$		несовершенств	
п/п		[10]	P_{FEA}	P _{test} /P _{FEA}	P_{FEA}	$P_{\text{test}}/P_{\text{FEA}}$	P_{FEA}	P _{test} /P _{FEA}
		κН	κН	-	κН	-	κН	-
	Неперфорированные	профи	ли	•				
1	ITF-C-145-1.5-25	8,09	8,97	0,90	8,58	0,94	9,77	0,83
2	ITF-C-145-2.0-25	15,38	14,22	1,08	14,18	1,08	14,55	1,06
3	ITF-C-195-1.5-25	9,54	9,52	1,00	9,06	1,05	9,29	1,03
4	ITF-C-195-2.0-25	14,65	13,74	1,07	14,00	1,05	13,42	1,09
5	ITF-C-145-1.5-50	10,10	10,71	0,94	10,28	0,98	10,49	0,96
6	ITF-C-145-2.0-50	16,49	16,18	1,02	15,66	1,05	15,91	1,04
7	ITF-C-195-1.5-50	8,51	9,77	0,87	9,27	0,92	9,51	0,89
8	ITF-C-195-2.0-50	15,46	16,39	0,94	15,66	0,99	16,01	0,97
9	ITF-C-145-1.5-100	9,13	10,62	0,86	10,16	0,90	10,39	0,88
10	ITF-C-145-2.0-100	14,08	18,39	0,77	17,45	0,81	17,91	0,79
11	ITF-C-195-1.5-100	9,30	9,58	0,97	9,22	1,01	9,40	0,99
12	ITF-C-195-2.0-100	15,82	17,90	0,88	17,13	0,92	17,51	0,90
	Перфорированные п	офили						
13	ITF-PC-145-1.5-25	1,22	1,44	0,84	1,29	0,94	1,36	0,89
14	ITF-PC-145-2.0-25	2,42	2,83	0,85	2,48	0,97	2,64	0,91
15	ITF-PC-195-1.5-25	1,07	1,17	0,91	1,05	1,02	1,09	0,98
16	ITF-PC-195-2.0-25	2,07	2,36	0,88	2,10	0,98	2,22	0,93
17	ITF-PC-145-1.5-50	1,17	1,43	0,82	1,28	0,91	1,35	0,86
18	ITF-PC-145-2.0-50	2,38	2,81	0,85	2,47	0,96	2,63	0,90
19	ITF-PC-195-1.5-50	0,97	1,15	0,84	1,05	0,92	1,09	0,88
20	ITF-PC-195-2.0-50	2,06	2,36	0,87	2,10	0,98	2,22	0,93
21	ITF-PC-145-1.5-100	1,15	1,44	0,80	1,28	0,90	1,35	0,85
22	ITF-PC-145-2.0-100	2,23	2,81	0,79	2,47	0,91	2,63	0,85
23	ITF-PC-195-1.5-100	1,00	1,15	0,87	1,05	0,96	1,09	0,92
24	ITF-PC-195-2.0-100	2,09	2,36	0,89	2,10	1,00	2,22	0,94
Для всех профилей:								
среднее				0,90		0,97		0,93
коэффициент вариации				0,092		0,065		0,080
Для неперфорированных профилей:								
среднее				0,91		0,98		0,95
коэффициент вариации				0,087		0,083		0,100
Дл	Для перфорированных профилей:							
	среднее			0,85		0,95		0,90
	коэффициент вариации					0,040		0,042

3 Results and Discussion

В данном разделе сравниваются результаты КЭ моделирования и результаты эксперимента, анализируются несущая способность и формы разрушения КЭ моделей неперфорированных и перфорированных профилей при местном действии промежуточной нагрузки на две полки.

3.1 Валидация КЭ модели

Валидация КЭ моделей проводилась с помощью сравнения результатов КЭ моделирования с результатами испытаний [16]. В табл. 2 приведены значения разрушающей нагрузки, полученной в результате эксперимента P_{test} и в результате КЭ моделирования P_{FEA}. Среднее значение отношения P_{test}/P_{FEA} для неперфорированных и перфорированных профилей равны 0,98 и 0,95, соответственно. Коэффициенты вариации для неперфорированных и перфорированных поорилей составляют 0,083 и 0,040, соответственно. Эти значения говорят о том, что несущая способность, полученная в результате КЭ моделирования, незначительно превышает экспериментальные значения несущей способности.

На графиках зависимости нагрузки от перемещений для испытанных образцов и КЭ моделей (рис. 7) видно, что КЭ модели обладают большей жесткостью по сравнению с профилями при испытаниях. Это может быть связано с заданными контактными граничными условиями между опорной пластиной и профилем. Подобный эффект был отмечен в [20].

На рис. 8 показаны типовые деформированные схемы образцов после испытаний и КЭ моделей неперфорированного профиля и перфорированных профилей с восемью и шестью рядами перфораций. При испытаниях неперфорированных профилей максимальное перемещение полки и выпучивание стенки было в месте приложения нагрузки, т.е. посередине установки для испытаний. В результате КЭ моделирования неперфорированных профилей максимальное максимальное перемещение стенки в направлении, перпендикулярном плоскости стенки, и вертикальное перемещение полок локализовано в середине профилей.

В эксперименте у перфорированных образцов при разрушении прогиб полок и величина выпучивания стенки были примерно одинаковыми по всей длине профилей. Такие же деформированные схемы были получены для КЭ моделей ITF-PC-195-2-100 и ITF-PC-145-1.5-50, показанных на рис. 8. Сравнение форм разрушения профилей, полученных в результате эксперимента и КЭ моделирования, показало, что разработанные КЭ модели с достаточной точностью описывают результаты испытаний.

При местном действии промежуточной нагрузки на две полки при ширине опирания I_b, равной 25 мм, в неперфорированных профилях наряду с потерей устойчивости стенки произошло смятие полок. На рис. 9. показано, что в КЭ модели профиля ITF-C-145-2-25 в момент разрушения эквивалентные напряжения по Мизесу достигают напряжений предела текучести (340 МПа) как в стенке, так и в полках. В таком же профиле ITF-C-145-2-100 при ширине опирания 100 мм эквивалентные напряжения по Мизесу достигают напряжений предела текучести только в стенке (рис. 9). Это значит, что разрушение профиля ITF-C-145-2-100 и других неперфорированных профилей с шириной опирания 100 мм произошло в результате потери устойчивости стенки. Ввиду того, что стенки всех перфорированных профилей ослаблены отверстиями, при местном действии нагрузки для них было характерно разрушение в результате потери устойчивости стенки при любой ширине опирания. В КЭ моделях перфорированных профилей эквивалентные напряжения, равные пределу текучести, сконцентрированы в стенке в местах перфораций, также как и для профилей ITF-PC-145-2-25 и ITF-PC-145-2-100, показанных на рис. 9.

3.2 Расчет по формулам

В таблицах 3 и 4 представлено сравнение несущей способности, полученной в результате КЭ моделирования и расчета по формулам, для неперфорированных и перфорированных профилей, соответственно.

Несущая способность профилей без перфораций при местном действии нагрузки определялась по формуле (1) СП 260.1325800.2016 [6]

$$R_b = C t_w^2 f_y \sin \theta \left(1 - C_r \sqrt{\frac{r_i}{t_w}} \right) \left(1 + C_\ell \sqrt{\frac{l_b}{t_w}} \right) \left(1 - C_w \sqrt{\frac{d_1}{t_w}} \right)$$
(1)

и по формуле (2)

Degtyareva, N.

$$R_b = C t_w^2 f_y \sin \theta \left(1 - C_r \sqrt{\frac{r_i}{t_w}} \right) \left(1 + C_\ell \sqrt{\frac{l_b}{t_w}} \right) \left(1 - C_w \sqrt{\frac{d_1}{t_w}} \right) \left(1 + C_f \sqrt{\frac{250}{f_y}} \right), \tag{2}$$

предложенной в [20], основное отличие которой от формулы (1), – в наличии дополнительного множителя [1+ $C_f \sqrt{(250/f_y)}$], учитывающего влияние предела текучести. Обозначения, принятые в формуле (1), изменены с учетом обозначений, принятых в данной статье. Расчет по формуле СП 260.1325800.2016 [6] дал заниженные значения несущей способности неперфорированных профилей, которые значительно отличаются от результатов КЭ моделирования. Среднее значение отношения P_{FEA}/R_b составило 1,62 при коэффициенте вариации 0,354. При расчете по формуле (2) [20] несущая способность профилей без перфораций R_b получилась близкой к несущей способности КЭ моделей: среднее значение отношения P_{FEA}/R_b было 1,01, а коэффициент вариации – 0,057.

ITF-C-195-2-100

ITF-PC-145-1.5-50



Рис. 8 - Формы разрушения испытанных образцов [16] (слева) и КЭ моделей (справа) Fig. 8 - Failure mode shapes of tested specimens [16] (left column) and FE models (right column)



Рис. 9 - Эквивалентные напряжения по Мизесу в неперфорированных и перфорированных профилях при максимальной нагрузке

Fig. 9 - Von Mises stresses in solid and slotted channels at maximum applied load

Для определения несущей способности перфорированных профилей в [16] было предложено две формулы (3) и (4)

$$R_b = q_s C t_w^2 f_y \sin \theta \left(1 - C_r \sqrt{\frac{r_i}{t_w}} \right) \left(1 + C_\ell \sqrt{\frac{l_b}{t_w}} \right) \left(1 - C_w \sqrt{\frac{d_1}{t_w}} \right) \left(1 + C_f \sqrt{\frac{250}{f_y}} \right)$$
(3)

 $q_s = 0,188$ for ETF load case

 $q_s = 0,133$ for ITF load case.

$$R_{b} = q_{s}Ct_{w}^{2}f_{y}\sin\theta\left(1 - C_{r}\sqrt{\frac{r_{i}}{t_{w}}}\right)\left(1 + C_{lp}C_{\ell}\sqrt{\frac{l_{b}}{t_{w}}}\right)\left(1 - C_{wp}C_{w}\sqrt{\frac{d_{1}}{t_{w}}}\right)\left(1 + C_{f}\sqrt{\frac{250}{f_{y}}}\right)$$
(4)

 $q_s = 0,188, C_{lp} = 0,435, C_{wp} = 0,726$ for ETF load case

 $q_s = 0,133, C_{lp} = 0,014, C_{wp} = 0,544$ for ITF load case.

Обе формулы были получены в результате усовершенствования формулы (2) [20] на основе экспериментальных данных. В формуле (3) был использован только понижающий коэффициент q_s , а формуле (4) – понижающий коэффициент q_s и дополнительные коэффициенты учитывающие изменение ширины опирания профилей C_{lp} и высоты профилей C_{wp} . Расчет по обеим формулам (3) и (4) демонстрирует хорошее соответствие между несущими способностями перфорированных профилей, определенных по формулам и в результате расчета в программном комплексе ANSYS.

Таблица 3. Сравнение несущей способности неперфорированных профилей, полученно	ой из
уравнений и КЭ моделиров	ания
Table 3. Comparison of web crippling capacities from design equations and FEA for solid char	nnels

	Наименование	P _{FEA}	СП 260.132	25800.2016 [6]	Уравнение (2) [20]		
№ п/п			R _b	P _{FEA} / <i>R</i> _b	R_b	P_{FEA}/R_b	
		κН	кН	-	κН	-	
1	ITF-C-145-1,5-25	8,58	2,89	2,97	8,49	1,01	
2	ITF-C-145-2,0-25	14,18	9,75	1,45	15,60	0,91	
3	ITF-C-195-1,5-25	9,06	7,87	1,15	8,45	1,07	
4	ITF-C-195-2,0-25	14,00	12,40	1,13	15,06	0,93	
5	ITF-C-145-1,5-50	10,28	8,00	1,28	9,48	1,08	
6	ITF-C-145-2,0-50	15,66	10,57	1,48	16,33	0,96	
7	ITF-C-195-1,5-50	9,27	4,32	2,14	8,48	1,09	
8	ITF-C-195-2,0-50	15,66	12,95	1,21	15,70	1,00	
9	ITF-C-145-1,5-100	10,16	5,77	1,76	9,87	1,03	
10	ITF-C-145-2,0-100	17,45	12,60	1,38	17,49	1,00	
11	ITF-C-195-1,5-100	9,22	4,00	2,31	9,04	1,02	
12	ITF-C-195-2,0-100	17,13	14,55	1,18	16,70	1,03	
		1,62		1,01			
	КОЭС	0,354		0,057			

Таблица 4. Сравнение несущей способности перфорированных профилей, полученной из уравнений и КЭ моделирования Table 4. Comparison of web crippling conceition from decign equations and EEA for performed

 Table 4. Comparison of web crippling capacities from design equations and FEA for perforated channels

	Наименование	P _{FEA}	Уравнение (3) [16		Уравнение (4) [16]	
№ п/п			R _{nl}	$P_{\text{FEA}}/R_{\text{nl}}$	R _{nl}	P _{FEA} / R _{nl}
		κН	κН	-	кН	-
1	ITF-PC-145-1.5-25	1,29	1,18	1,09	1,20	1,07
2	ITF-PC-145-2.0-25	2,48	2,14	1,16	2,15	1,15
3	ITF-PC-195-1.5-25	1,05	1,11	0,94	1,17	0,89
4	ITF-PC-195-2.0-25	2,10	2,03	1,03	2,11	0,99
5	ITF-PC-145-1.5-50	1,28	1,24	1,03	1,19	1,07
6	ITF-PC-145-2.0-50	2,47	2,24	1,10	2,14	1,15
7	ITF-PC-195-1.5-50	1,05	1,17	0,90	1,17	0,90
8	ITF-PC-195-2.0-50	2,10	2,09	1,00	2,07	1,02
9	ITF-PC-145-1.5-100	1,28	1,33	0,96	1,19	1,08
10	ITF-PC-145-2.0-100	2,47	2,45	1,01	2,20	1,12
11	ITF-PC-195-1.5-100	1,05	1,23	0,85	1,14	0,92
12	ITF-PC-195-2.0-100	2,10	2,29	0,92	2,12	0,99
		1,00		1,03		
	КОЭС	0,091		0,091		

Однако, предложенные в [16] уравнения для определения несущей способности перфорированных профилей получены на основе анализа результатов испытаний профилей с ограниченным набором данных: две высоты профиля (145 и 195 мм), две толщины профиля (1,5 и 2 мм) и один вид и размер перфораций. Для того чтобы исследовать влияние параметров поперечного сечения и перфораций на несущую способность и чтобы разработать формулу для определения несущей способности при местном действии промежуточной нагрузки на две полки, необходимо проведение параметрических исследований. Разработанная КЭ модель может быть использована для этих целей.

Degtyareva, N.

Finite element analysis of cold-formed steel channels with solid and slotted webs subjected to web crippling under interior two flange load case;

4 Conclusions

В статье выполнены численные исследования неперфорированных и перфорированных легких стальных тонкостенных профилей при местном действии промежуточной нагрузки на две полки. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Сравнение несущей способности, полученной в результате испытаний и КЭ моделирования, показали, что разработанные КЭ модели описывают работу неперфорированных и перфорированных профилей с достаточной точностью.

2. В результате исследования влияния начальных геометрических несовершенств на несущую способность КЭ моделей неперфорированных и перфорированных профилей, была определена величина начальных геометрических несовершенств, равная $-d_1/150$, при которой получается наилучшее соответствие несущих способностей испытанных и замоделированных профилей.

3. Перфорации, расположенные в стенке профилей, значительно снижают несущую способность при местном действии промежуточной нагрузки на две полки

4. Сравнение результатов КЭ моделирования с результатами расчета по СП 260.1325800.2016 [6] для неперфорированных профилей показало, что расчет по СП 260.1325800.2016 [6] дает заниженные значения несущей способности, которые значительно отличаются от результатов КЭ моделирования.

5. Формула для определения несущей способности перфорированных профилей, разработанная на основе результатов эксперимента, позволила с высокой точностью определить несущую способность перфорированных профилей, рассмотренных в этой работе.

6. Полученная в рамках данного исследования КЭ модель может быть использована для дальнейших параметрических исследований. Это позволит проверить, насколько предложенная формула эффективна для определения несущей способности перфорированных профилей с другими геометрическими и механическими характеристиками.

5 Acknowledgements

Статья выполнена при поддержке Правительства РФ (Постановление №211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.А03.21.0011. Автор статьи выражает признательность и благодарность Южно-Уральскому государственному университету за поддержку, необходимую для проведения исследований.

References

- 1. Höglund, T., Burstrand, H. Slotted steel studs to reduce thermal bridges in insulated walls. Thin-Walled Structures. 1998. 32(1–3). Pp. 81–109. DOI:10.1016/S0263-8231(98)00028-7. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823198000287.
- 2. Lipták-Váradi, J. Equivalent thermal conductivity of steel girders with slotted web. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2010. 54(2). Pp. 163. DOI:10.3311/pp.ci.2010-2.12. URL: https://pp.bme.hu/ci/article/view/508.
- 3. LaBoube, R.A. RP02-9 Development of cost-effective, energy efficient steel framing: thermal performance of slit-web steel web studs. Research rep. AISI/Steel Framing Alliance2006.
- 4. AISI. S200-12. North American Standard for Cold-Formed Steel Framing General Provisions,. American Iron and Steel Institute. 2012. Pp. 49.
- 5. Standard, E. Eurocode 3 Design of steel structures Part 1-3: General rules Suplementary rules for cold-formed members and sheeting. Design. 2005.
- 6. Russsian Code Design SP 260.1325800.2016 «Cold-formed thin-walled steel profile and galvanized corrugated plate constructions. Design rules». 2017.
- 7. KESTI, J., DAVIES, J. Local and Distortional Buckling of Perforated Steel Wall Studs. Advances in Steel Structures (ICASS '99). Elsevier, 1999. Pp. 367–374.
- 8. Nazmeeva, T. V. Bearing capacity of compressed continuous and perforated thin-walled steel members of C-shaped cold-formed profiles. Magazine of Civil Engineering. 2013. 40(5). Pp. 44–51. DOI:10.5862/MCE.40.5. URL: https://engstroy.spbstu.ru/article/2013.40.5 (date of

Degtyareva, N.

application: 24.12.2020).

- 9. Sinelnikov, A.S. Reticular-stretched thermoprofile: a numerical and analytical study. Magazine of Civil Engineering. 2015. 57(05). Pp. 74–85. DOI:10.5862/MCE.57.7. URL: http://www.engstroy.spb.ru/index_2015_05/07.html.
- 10. LaBoube, R.A. RP02-8 Development of Cost- Effective, Energy Efficient Steel Framing: Structural Performance of Slit-Web Steel Wall Studs. Circulation. 2006.
- Garifullin, M., Bronzova, M., Sinelnikov, A., Vatin, N. Buckling analysis of cold-formed c-shaped columns with new type of perforation. Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies - Proceedings of the International Conference on Engineering Sciences and Technologies, ESaT 2015. 2016. Pp. 63–68. URL: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84949908644&partnerID=40&md5=859d342008a2f0a9b2e48151be2f507f.
- Degtyarev, V. V., Degtyareva, N. V. Numerical simulations on cold-formed steel channels with flat slotted webs in shear. Part II: Ultimate shear strength. Thin-Walled Structures. 2017. 119. Pp. 211–223. DOI:10.1016/j.tws.2017.05.028. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823116304554.
- Degtyareva, N., Gatheeshgar, P., Poologanathan, K., Gunalan, S., Tsavdaridis, K.D., Napper, S. New distortional buckling design rules for slotted perforated cold-formed steel beams. Journal of Constructional Steel Research. 2020. 168. Pp. 106006. DOI:10.1016/j.jcsr.2020.106006. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X19311332.
- Degtyareva, N., Gatheeshgar, P., Poologanathan, K., Gunalan, S., Shyha, I., McIntosh, A. Local buckling strength and design of cold-formed steel beams with slotted perforations. Thin-Walled Structures. 2020. 156. Pp. 106951. DOI:10.1016/j.tws.2020.106951. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823120308296.
- Degtyareva, N., Gatheeshgar, P., Poologanathan, K., Gunalan, S., Lawson, M., Sunday, P. Combined bending and shear behaviour of slotted perforated steel channels: Numerical studies. Journal of Constructional Steel Research. 2019. 161. Pp. 369–384. DOI:10.1016/j.jcsr.2019.07.008. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X19305243.
- Degtyareva, N., Poologanathan, K., Mahendran, M. Web crippling tests of cold-formed steel channels with staggered web perforations. Thin-Walled Structures. 2021. 159. Pp. 107314. DOI:10.1016/j.tws.2020.107314. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823120311812.
- Yu, W.-W., LaBoube, R.A. Cold-Formed Steel Design. Hoboken, NJ, USA, John Wiley & Sons, Inc., 2010. ISBN:9780470949825.
- Chen, Y., Chen, X., Wang, C. Experimental and finite element analysis research on cold-formed steel lipped channel beams under web crippling. Thin-Walled Structures. 2015. 87. Pp. 41–52. DOI:10.1016/j.tws.2014.10.017. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823114003139.
- Macdonald, M., Heiyantuduwa Don, M.A., KoteŁko, M., Rhodes, J. Web crippling behaviour of thin-walled lipped channel beams. Thin-Walled Structures. 2011. 49(5). Pp. 682–690. DOI:10.1016/j.tws.2010.09.010. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823110001667.
- Sundararajah, L., Mahendran, M., Keerthan, P. New design rules for lipped channel beams subject to web crippling under two-flange load cases. Thin-Walled Structures. 2017. 119. Pp. 421–437. DOI:10.1016/j.tws.2017.06.003. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823117300721.
- Macdonald, M., Heiyantuduwa, M.A. A design rule for web crippling of cold-formed steel lipped channel beams based on nonlinear FEA. Thin-Walled Structures. 2012. 53. Pp. 123–130. DOI:10.1016/j.tws.2012.01.003. URL:
- https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823112000067.
 22. Natário, P., Silvestre, N., Camotim, D. Computational modelling of flange crushing in cold-formed steel sections. Thin-Walled Structures. 2014. 84. Pp. 393–405.

DOI:10.1016/j.tws.2014.07.006. URL:

- https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823114002195.
- 23. Elilarasi, K., Janarthanan, B. Effect of web holes on the web crippling capacity of cold-formed Degtyareva, N.

Finite element analysis of cold-formed steel channels with solid and slotted webs subjected to web crippling under interior two flange load case;

LiteSteel beams under End-Two-Flange load case. Structures. 2020. 25. Pp. 411–425. DOI:10.1016/j.istruc.2020.03.022. URL:

https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352012420301053.

- 24. Uzzaman, A., Lim, J.B.P., Nash, D., Rhodes, J., Young, B. Web crippling behaviour of coldformed steel channel sections with offset web holes subjected to interior-two-flange loading. Thin-Walled Structures. 2012. 50(1). Pp. 76–86. DOI:10.1016/j.tws.2011.09.009. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823111002254.
- Schafer, B., Peköz, T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. Journal of Constructional Steel Research. 1998. 47(3). Pp. 193–210. DOI:10.1016/S0143-974X(98)00007-8. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X98000078.
- Kostenetskiy, P., Semenikhina, P. SUSU Supercomputer Resources for Industry and fundamental Science. 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). 2018. Pp. 1–7. DOI:10.1109/GloSIC.2018.8570068. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8570068/.