

Article

Received: April 15, 2021

Accepted: July 02, 2021

Published: July 02, 2021

ISSN 2304-6295

Parametric Study and Proposed Design Equation for Cold-Formed Steel Channels with Slotted Webs Subjected to Web Crippling under Interior Two Flange Load Case

Degtyareva, Natalia^{1*}

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation; degtyareva_nv@mail.ru
Correspondence:* email degtyareva_nv@mail.ru; contact phone [+79058318194](tel:+79058318194)

Keywords:

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

Abstract:

The parametric study was undertaken to investigate the web crippling capacities of cold-formed steel channels with staggered slotted perforations under interior two flanges (ITF) load case. The study was performed on finite element models developed in ANSYS and validated using experimental data. The effects of cross-section size, perforation pattern and mechanical property of channels on the web crippling capacity were investigated on the models. Web slots reduced web crippling strength of the investigated channels by 80–95%. Design equations based on the reduction factor were developed for predicting the web crippling capacity of slotted channels and demonstrated a good agreement with the results of finite element analysis.

1 Introduction

Развитие производственных технологий и применение высокопрочных сталей привело к широкому распространению легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) по всему миру. ЛСТК с перфорацией в виде отверстий, расположенных в шахматном порядке (рис. 1) применяются для повышения энергоэффективности зданий за счет снижения теплопроводности конструкций. При работе ЛСТК на изгиб в местах опирания и приложения нагрузки может произойти потеря устойчивости стенки профиля, если отсутствует дополнительное усиление. Для определения несущей способности при местном действии нагрузки известны формулы для неперфорированных профилей [1]–[3] и профилей с одиночными отверстиями в стенке [1]. Рекомендации по определению несущей способности перфорированных профилей, показанных на рис. 1, при местном действии нагрузки не разработаны.

Для исследования работы легких стальных тонкостенных профилей и разработки формул для определения несущей способности проводятся численные параметрические исследования. При местном действии нагрузки параметрические исследования выполнялись для неперфорированных профилей [4]–[6], профилей с одиночными отверстиями в стенке при действии нагрузки на две полки [7]–[13] и на одну полку [14]–[18]. Рекомендации по расчету профилей с перфорацией стенки в виде просечек (рис. 1) при срезе [19], чистом изгибе [20] и поперечном изгибе [21] были также разработаны в результате параметрических исследований. Они были основаны на применении понижающего коэффициента, который определял величину снижения несущей способности перфорированного профиля по сравнению с неперфорированным профилем. Такой же подход использовался при разработке уравнений для определения несущей способности профилей с одиночными отверстиями в стенке [7], [8], [12], [14]–[16].

Degtyareva, N.

Parametric study and proposed design equation for cold-formed steel channels with slotted webs subjected to web crippling under interior two flange load case;

2021; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 97 Article No 9701. doi: 10.4123/CUBS.97.1

Результаты экспериментальных исследований и КЭ моделирования перфорированных и неперфорированных профилей при местном действии промежуточной нагрузки на две полки представлены в работах [22] и [23], соответственно. По результатам испытаний [22] были предложены формулы для определения несущей способности перфорированных профилей. Применение предложенных формул возможно для профилей, геометрические и механические характеристики которых совпадают с рассмотренными при испытаниях. Целью данной работы является проведение параметрических исследований и получение данных о несущей способности перфорированных профилей с различными размерами поперечного сечения, схемами перфораций и свойствами материала с помощью КЭ моделей, валидация которых была проведена в статье [23]. Полученные данные о несущей способности используются для получения формулы для определения несущей способности, которая основана на использовании коэффициента снижения несущей способности, зависящего от варьируемых параметров.

2 Materials and Methods

2.1 Параметрические исследования

В рамках параметрических исследований были выполнены расчеты перфорированных профилей, поперечное сечение и схемы перфораций которых показаны на рис. 1. Размеры исследуемых профилей и перфораций приведены в табл.1. Такие параметры профилей были выбраны, чтобы охватить наиболее распространенные профили на рынке производителей.

В результате параметрических исследований было изучено влияние различных схем перфораций на несущую способность профилей с перфорированной стенкой. Были рассмотрены три высоты профиля, две толщины профиля, три внутренних радиуса изгиба, три предела текучести, две ширины опорной пластины, две длины перфорации, две высоты перфорации, две схемы перфораций для профилей высотой 150 мм, четыре схемы перфораций для профилей высотой 200 мм и 250 мм. (см. табл. 1). Всего в параметрических исследованиях было рассмотрено 1440 перфорированных профилей.

Профили с неперфорированной стенкой в данных параметрических исследованиях не изучались. Несущая способность профилей без перфораций определялась по формуле (1), предложенной в [4],

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

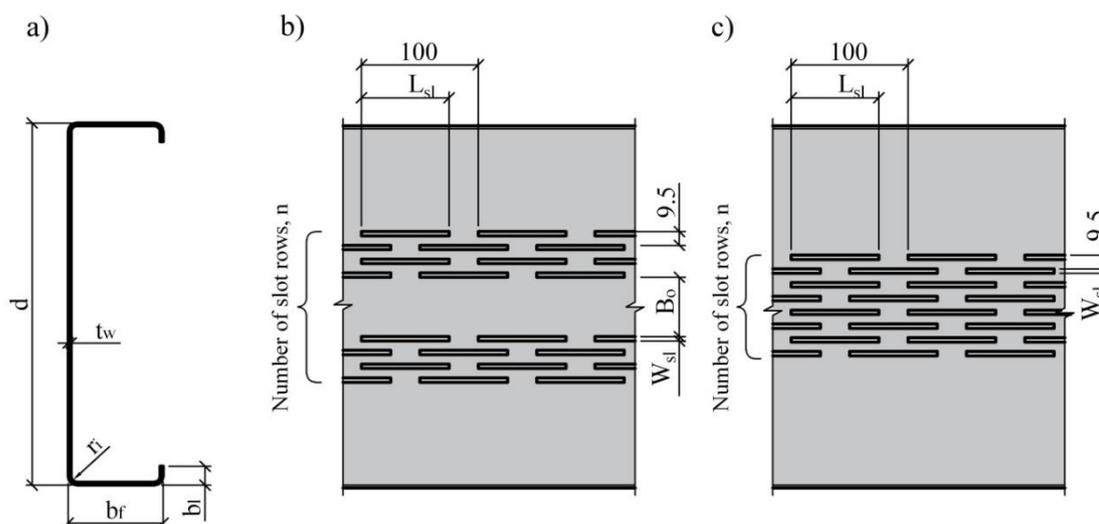


Рис. 1 - Перфорированные профили для параметрических исследований: (b) с двумя областями перфораций; (c) с одной областью перфораций

Fig. 1 - Perforated profiles for parametric study: (b) with two perforated regions; (c) with one perforated region

Таблица 1. Варьируемые параметры
Table 1. Varied parameters

d	t_w	r_i	b_f	b_l	l_b	f_y	L_{sl}	W_{sl}	N	n	B_0
mm	mm	mm	mm	mm	mm	MPa	mm	mm	-	-	mm
150	1,5; 2	3; 5; 7	45	13	50;100	300; 500; 600	60; 75	3; 5	1	6	-
150	1,5; 2	3; 5; 7	45	13	50;100	300; 500; 600	60; 75	3; 5	2	6	26,5
200	1,5; 2	3; 5; 7	45	13	50;100	300; 500; 600	60; 75	3; 5	1	6; 8	-
200	1,5; 2	3; 5; 7	45	13	50;100	300; 500; 600	60; 75	3; 5	2	6; 8	37
250	1,5; 2	3; 5; 7	65	13	50;100	300; 500; 600	60; 75	3; 5	1	6; 8	-
250	1,5; 2	3; 5; 7	65	13	50;100	300; 500; 600	60; 75	3; 5	2	6; 8	37

Обозначения: d – высота профиля, t_w – толщина стенки профиля, r_i – внутренний радиус изгиба, b_f – ширина полки профиля, b_l – размер отгиба, l_b – ширина опорной пластины, f_y – предел текучести, L_{sl} – длина перфорации, W_{sl} – высота перфорации, N – количество областей перфораций, n – количество рядов перфораций, B_0 – расстояние между областями перфораций.

2.2 Конечно-элементные модели

КЭ модели, разработанные в [23], позволяют с достаточной точностью определять несущую способность перфорированных профилей при местном действии промежуточной нагрузки на две полки, когда перфорации стенки расположены в двух областях (рис. 1,б), так как эти КЭ модели созданы с учетом симметрии профилей (рис. 2,а). В том случае, когда стенка профиля имеет только одну область перфораций (рис. 1,с), КЭ модели, представленные в [23] не могут быть использованы для дальнейших исследований ввиду несимметричного расположения отверстий. Следовательно, для параметрических исследований профилей с одной областью перфораций были разработаны КЭ модели без учета симметрии (рис. 2,б). В результате КЭ моделирования несущая способность и формы разрушения КЭ моделей перфорированных профилей сравнивались с результатами испытаний для валидации КЭ моделей. Расчеты выполнялись в программном комплексе ANSYS с использованием суперкомпьютерных ресурсов ЮУрГУ [24].

КЭ модели без учета симметрии состояли из профиля и двух опорных пластин (рис. 2,б), замоделированных с помощью конечных элементов shell181. Контакт между опорными пластинами и профилем задавался с помощью конечных элементов CONTA173 и TARGE170. Граничные условия для КЭ модели без учета симметрии показаны на рис. 3. Верхняя и нижняя опорные пластины были закреплены от перемещений по направлениям X и Z и от поворота вокруг оси Z. Для моделирования шарнирного опирания узлы, расположенные посередине нижней пластины, не перемещались по вертикали. Нагрузка задавалась с помощью перемещения узлов верхней пластины по направлению Y. Перемещения узлов, расположенных посередине длины профиля, запрещены по направлению Z. При испытаниях во время нагружения и деформации профиля между опорными пластинами и профилем сохранялся контакт в местах, отмеченных красными точками на рис. 3, поэтому при КЭ моделировании отмеченные узлы не перемещались по направлению X. Остальные характеристики КЭ модели без учета симметрии совпадают со свойствами КЭ модели, разработанной в [23].

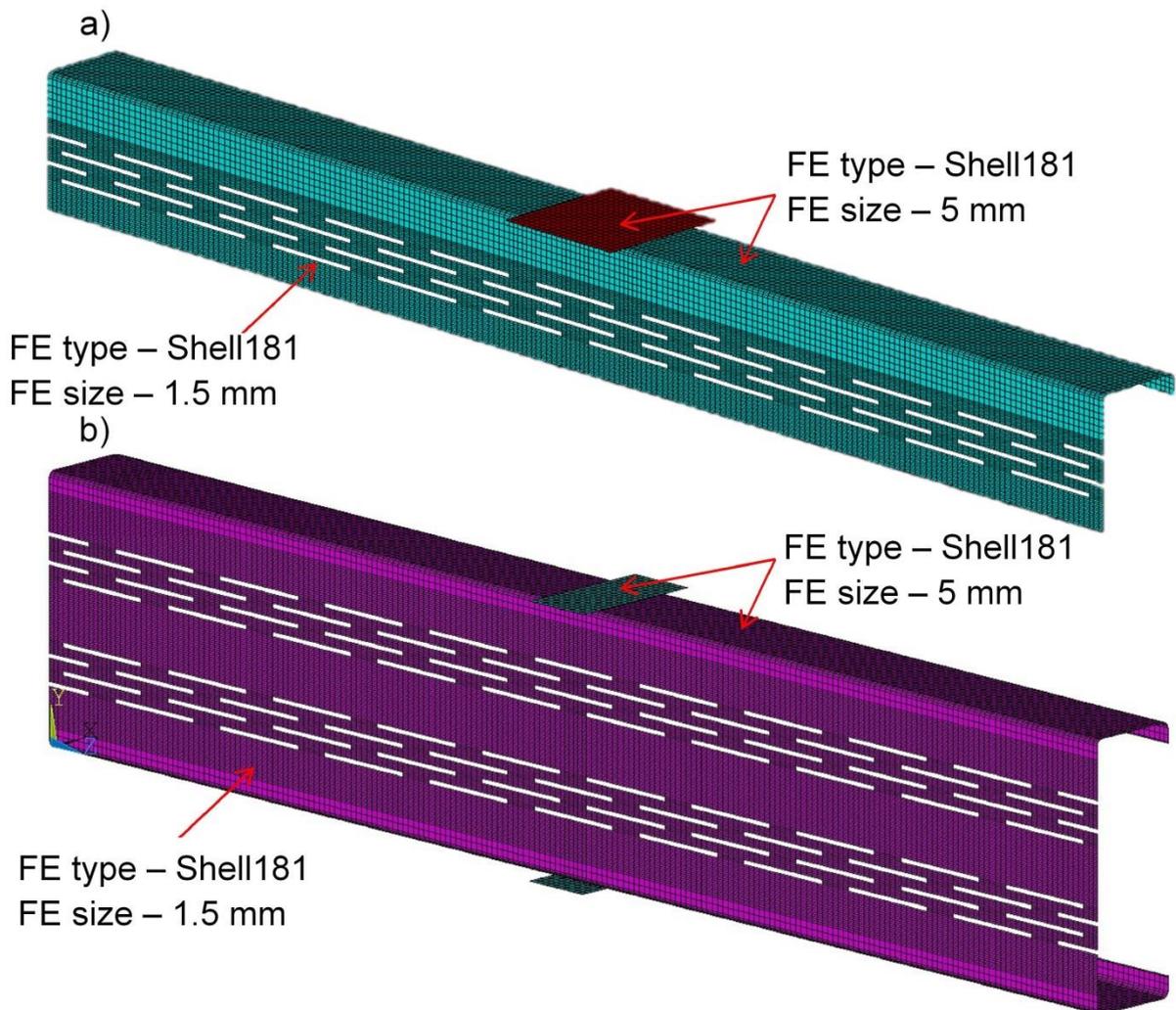


Рис. 2 - КЭ модели перфорированных профилей (a) с учетом симметрии и (b) без учета симметрии

Fig. 2 - FE models of perforated profiles (a) with symmetry boundary conditions and (b) without symmetry boundary conditions

Разрушающие нагрузки определялись в результате нелинейного расчета с учетом начальных геометрических несовершенств, форма которых определялась низшей формой потери устойчивости. В [23] исследовалось влияние величины начальных геометрических несовершенств на несущую способность перфорированных и неперфорированных профилей, и для дальнейших КЭ расчетов было выбрано значение $-d_1/150$. Следовательно, при КЭ моделировании без учета симметрии коэффициент, определяющий величину начальных геометрических несовершенств, был принят таким же.

В табл. 2 представлено сравнение несущей способности перфорированных профилей, полученных в результате испытаний P_{test} и КЭ моделирования P_{FEA} . Среднее значение отношения P_{test}/P_{FEA} равно 0,94 при коэффициенте вариации 0,048.

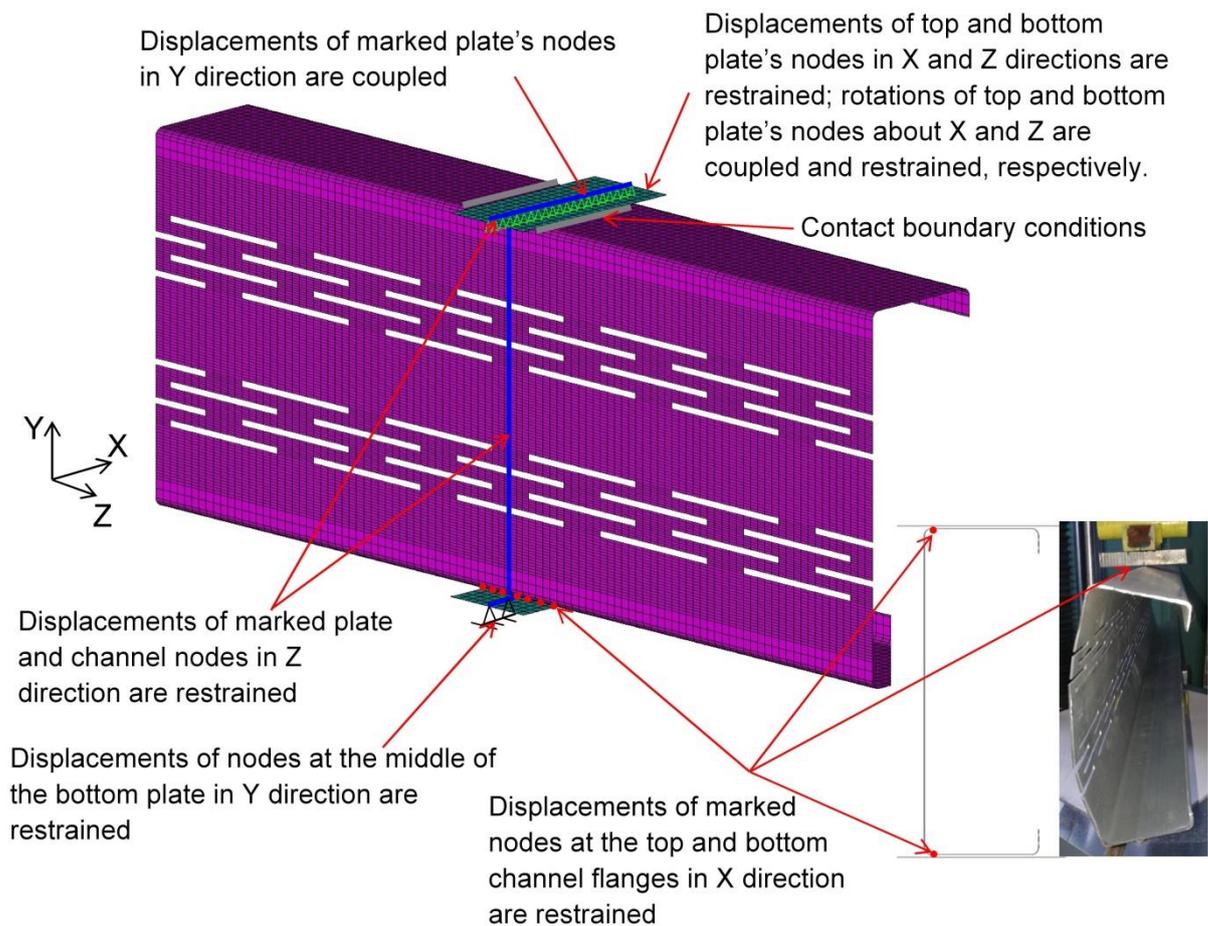


Рис. 3 - Граничные условия для КЭ модели без учета симметрии
Fig. 3 - Boundary conditions for FE model without symmetry boundary conditions

Таблица 2. Экспериментальные и численные значения несущей способности перфорированных профилей
Table 2. Experimental and calculated ultimate web crippling capacities of perforated channels

№	Наименование	P_{test} [22]	P_{FEA}	P_{test}/P_{FEA}
		kN	kN	-
1	ITF-PC-145-1.5-25	1.22	1.32	0.92
2	ITF-PC-145-2.0-25	2.42	2.55	0.95
3	ITF-PC-195-1.5-25	1.07	1.06	1.01
4	ITF-PC-195-2.0-25	2.07	2.12	0.98
5	ITF-PC-145-1.5-50	1.17	1.32	0.89
6	ITF-PC-145-2.0-50	2.38	2.55	0.93
7	ITF-PC-195-1.5-50	0.97	1.06	0.91
8	ITF-PC-195-2.0-50	2.06	2.12	0.97
9	ITF-PC-145-1.5-100	1.15	1.32	0.87
10	ITF-PC-145-2.0-100	2.23	2.56	0.87
11	ITF-PC-195-1.5-100	1.00	1.06	0.95
12	ITF-PC-195-2.0-100	2.09	2.13	0.98
Для перфорированных профилей:				
среднее				0.94
коэффициент вариации				0.048

Графики зависимости нагрузки от перемещений для перфорированного профиля высотой 195 мм и толщиной 1,5 мм при ширине опирания 100 мм, представленные на рис. 4, показывают, Degtyareva, N.

Parametric study and proposed design equation for cold-formed steel channels with slotted webs subjected to web crippling under interior two flange load case;

2021; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 97 Article No 9701. doi: 10.4123/CUBS.97.1

что разрушающие нагрузки, полученные в результате эксперимента и КЭ моделирования с учетом и без учета симметрии, практически совпадают. Согласно этим графикам, КЭ модель без учета симметрии обладает меньшей жесткостью, чем КЭ с учетом симметрии и экспериментальный образец.

Форма разрушения КЭ модели, показанная на рис.5, не отличается от формы разрушения образца для испытаний ITF-PC-195-2-100.

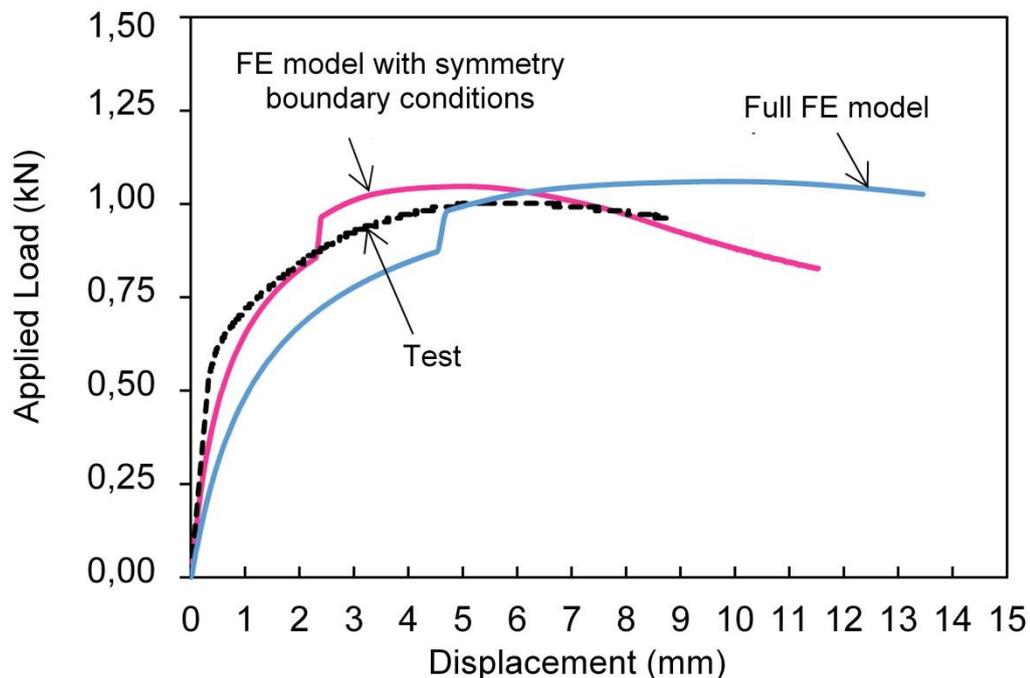


Рис. 4 - Графики зависимости нагрузки от перемещений для испытанного образца и КЭ моделей с учетом и без учета симметрии для профиля ITF-PC-195-1.5-100

Fig. 4 - Load-displacement curves of tested specimen and FE models with symmetry boundary conditions and without symmetry boundary conditions for channel ITF-PC-195-1.5-100

ITF-PC-195-2-100

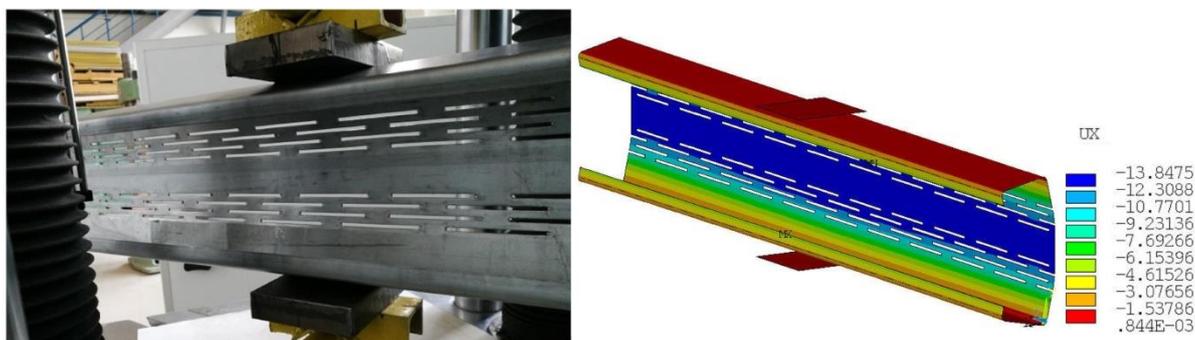


Рис. 5 - Формы разрушения испытанного образца [22] (слева) и КЭ модели (справа)
Fig. 5 - Failure mode shapes of tested specimen [22] (left) and FE model (right)

Сравнение результатов КЭ моделирования и эксперимента показывает, что разработанная КЭ модель без учета симметрии может быть использована для определения несущей способности перфорированных профилей при местном действии промежуточной нагрузки на две полки. В параметрических исследованиях для КЭ расчета перфорированных профилей с одной и двумя областями перфораций использовались КЭ модели без учета (рис. 6,b) и с учетом симметрии (рис. 6,a), соответственно. Длины профилей были равны $5d$, что соответствует требованиям [25].

Degtyareva, N.

Parametric study and proposed design equation for cold-formed steel channels with slotted webs subjected to web crippling under interior two flange load case;

2021; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 97 Article No 9701. doi: 10.4123/CUBS.97.1

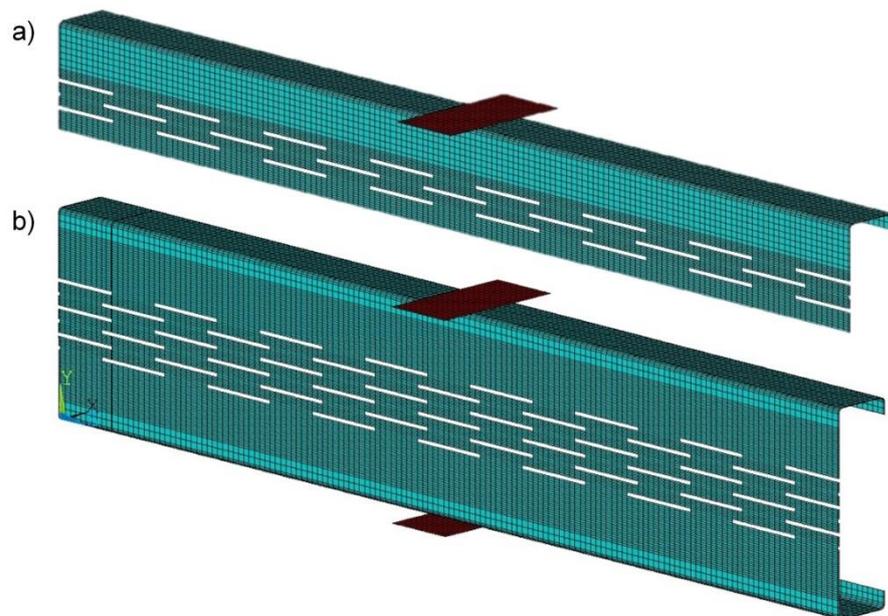


Рис. 6 - КЭ модели перфорированных профилей для параметрических исследований: (а) с двумя областями перфораций; (б) с одной областью перфораций
 Fig. 6 - FE models of perforated profiles for parametric study: (a) with two perforated regions; (b) with one perforated region

3 Results and Discussion

3.1 Формы разрушения

На рис. 7 и 8 показаны деформированные схемы и эквивалентные напряжения по Мизесу в КЭ моделях перфорированных профилей толщиной 1,5 мм с одной и двумя областями перфораций высотой 150 мм и 250 мм с пределом текучести 300 МПа и 600 МПа при ширине опорной пластины 50 мм. Для КЭ моделей, показанных на рис. 7 и 8, приняты следующие обозначения: d - t_w - l_b - r_i - L_{sl} - W_{sl} - N - n - F_y , где d – высота профиля, t_w – толщина стенки профиля, l_b – ширина опорной пластины, r_i – внутренний радиус изгиба, L_{sl} – длина перфорации, W_{sl} – высота перфорации, N – количество областей перфораций, n – количество рядов перфораций, f_y – предел текучести.

Деформированные схемы КЭ моделей перфорированных профилей совпадают с типовой формой разрушения профилей при местном действии промежуточной нагрузки на две полки. Для всех рассмотренных профилей максимальное выпучивание стенки профиля было в местах расположения перфораций. Из-за меньшей гибкости стенки в профилях с низкой высотой стенки величина выпучивания стенки была меньше, чем в профилях с высокой стенкой. Согласно рис. 7, в момент разрушения в профилях высотой 150 мм перемещения стенки меньше, чем в профилях высотой 250 мм.

Для большинства рассмотренных в этом исследовании профилей характерно то, что в профилях с одной областью перфораций выгиб стенки был больше, чем в профилях с двумя областями перфораций (рис. 7). Это можно объяснить тем, что в профилях с одной областью перфораций отверстия располагаются посередине стенки профиля, что приводит к большему снижению жесткости стенки, по сравнению с профилями с двумя областями перфораций.

В перфорированных профилях с пределом текучести 600 МПа область стенки с максимальными перемещениями и величина максимальных перемещений больше, чем в перфорированных профилях с пределом текучести 300 МПа (рис. 7).

Для всех рассмотренных перфорированных профилей максимальные напряжения по Мизесу возникают в стенке и локализованы по краям отверстий (рис. 8).

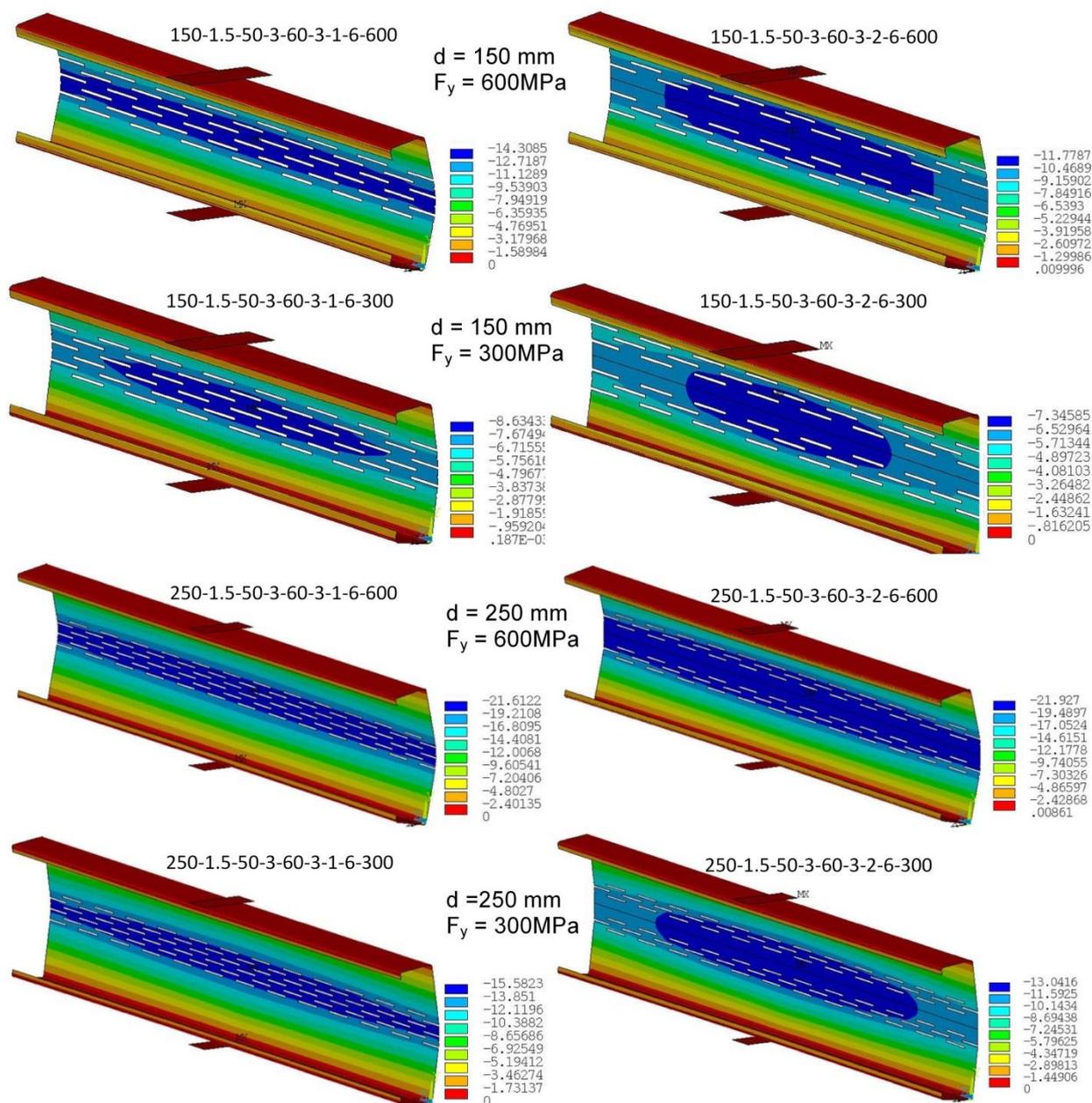


Рис. 7 - Формы разрушения КЭ моделей профилей с одной областью перфораций (слева) и с двумя областями перфораций (справа) при максимальной нагрузке

Fig. 7 - Failure mode shapes of FE models of channels with one perforated region (left column) and two perforated regions (right column) at maximum applied load

3.2 Влияние параметров на несущую способность

Влияние параметров поперечного сечения на коэффициент снижения несущей способности q_s перфорированных профилей при местном действии промежуточной нагрузки на две полки показано на рис. 9. Коэффициент снижения несущей способности q_s определяется, как отношение несущей способности неперфорированного профиля P_{sol} , вычисленной по формуле (1), к отношению несущей способности перфорированного профиля P_{slot} , полученной в результате КЭ моделирования. Варьируемые в данном исследовании параметры поперечного сечения оказывают слабое влияние на изменение коэффициента снижения несущей способности q_s : с увеличением высоты профиля d_1 , толщины профиля t_w и внутреннего радиуса изгиба r_i коэффициент q_s незначительно увеличивается (рис. 9).

Degtyareva, N.

Parametric study and proposed design equation for cold-formed steel channels with slotted webs subjected to web crippling under interior two flange load case;

2021; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 97 Article No 9701. doi: 10.4123/CUBS.97.1

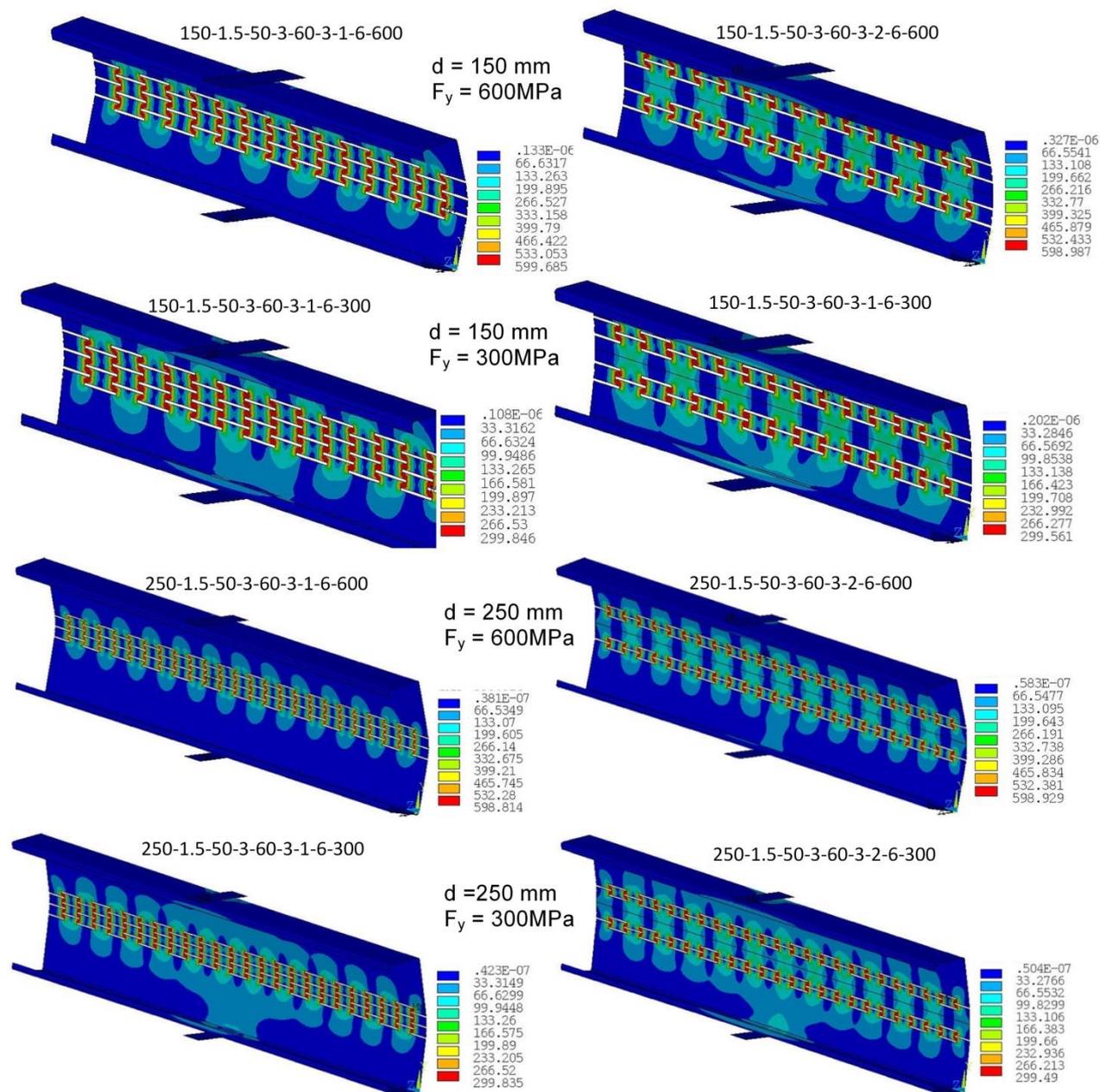


Рис. 8 - Эквивалентные напряжения по Мизесу в КЭ моделях профилей с одной областью перфораций (слева) и с двумя областями перфораций (справа) при максимальной нагрузке
 Fig. 8 - Von Mises stresses in FE models of channels with one perforated region (left column) and two perforated regions (right column) at maximum applied load

На рис. 10 показано влияние параметров перфораций на коэффициент снижения несущей способности q_s . С увеличением размера перфораций (высоты W_{sl} и длины отверстия L_{sl}) коэффициент снижения несущей способности q_s уменьшается. Увеличение количества рядов перфораций n также приводит к падению коэффициента снижения несущей способности q_s . Согласно рис. 9–12, в профилях с одной областью перфораций наблюдается большее снижение несущей способности по отношению к несущей способности неперфорированных профилей, чем в профилях с двумя областями перфораций: в профилях с одной областью перфораций коэффициент q_s принимает меньшие значения, чем для профилей с двумя областями перфораций.

Влияние ширины опорной пластины l_b и предела текучести f_y материала профилей на коэффициент снижения несущей способности показаны на рис. 11 и 12, соответственно. С увеличением ширины опирания профиля l_b коэффициент снижения несущей способности q_s

Degtyareva, N.

Parametric study and proposed design equation for cold-formed steel channels with slotted webs subjected to web crippling under interior two flange load case;

2021; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 97 Article No 9701. doi: 10.4123/CUBS.97.1

незначительно уменьшается (рис. 11). Чем больше предел текучести f_y , тем меньше коэффициент снижения несущей способности q_s (рис. 12).

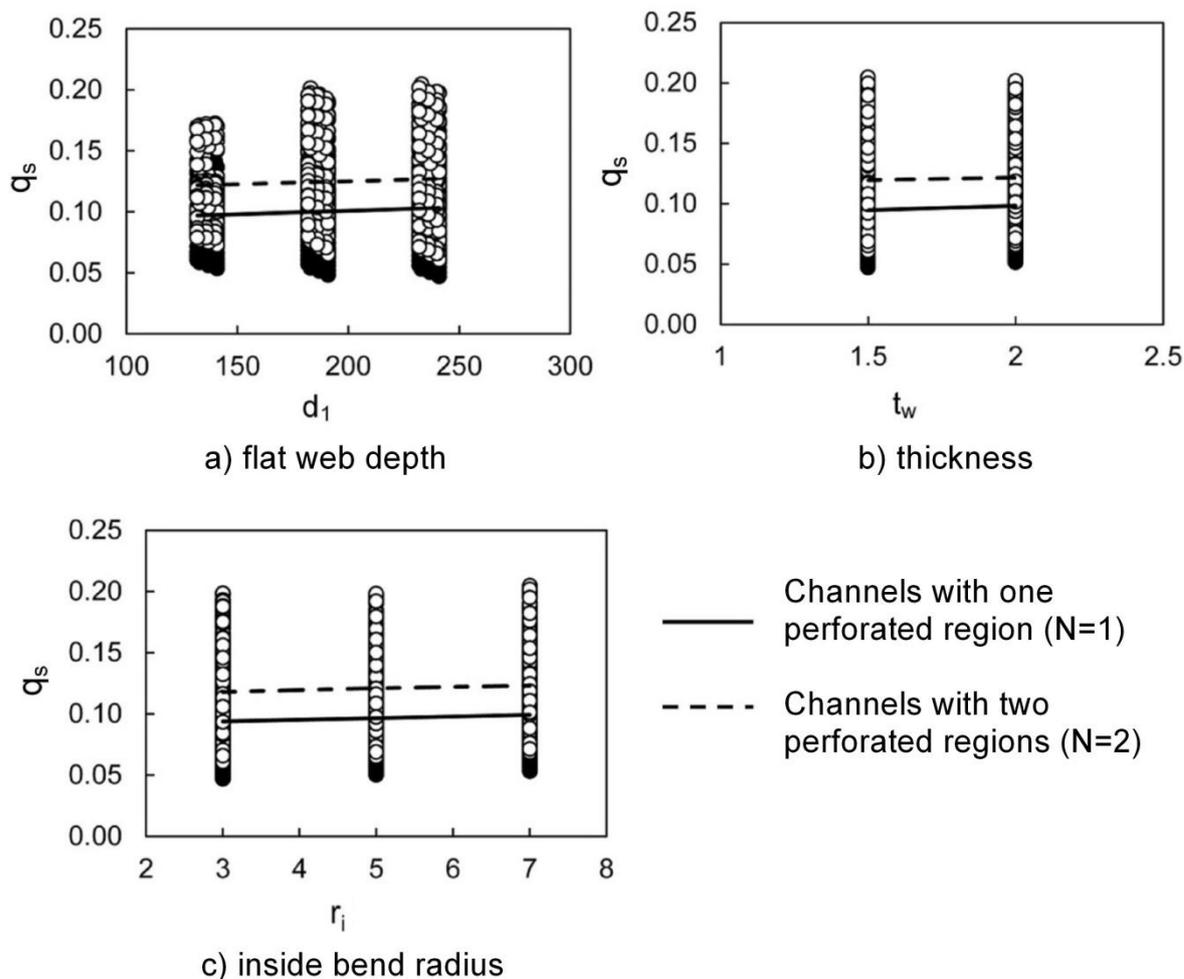


Рис. 9 - Изменение коэффициента снижения несущей способности в зависимости от параметров поперечного сечения
Fig. 9 - Variation in reduction factors with parameters of cross section

В профилях, рассмотренных в данном параметрическом исследовании, перфорации значительно снижают несущую способность при местном действии нагрузки. Наибольшее снижение прочности по сравнению с неперфорированным профилем составило 95% и произошло в профиле высотой 250 мм толщиной 1,5 мм с радиусом изгиба 3 мм с перфорациями длиной 75 мм и высотой 5 мм, расположенными в восемь рядов в одной области, с пределом текучести 600 МПа и шириной опирания 100 мм. Наименьшее снижение прочности по сравнению с профилем без перфораций составило 80 % и произошло в профиле высотой 250 мм толщиной 1,5 мм с радиусом изгиба 7 мм с перфорациями длиной 60 мм и высотой 3 мм, расположенными в шесть рядов в двух областях, с пределом текучести 300 МПа и шириной опирания 50 мм.

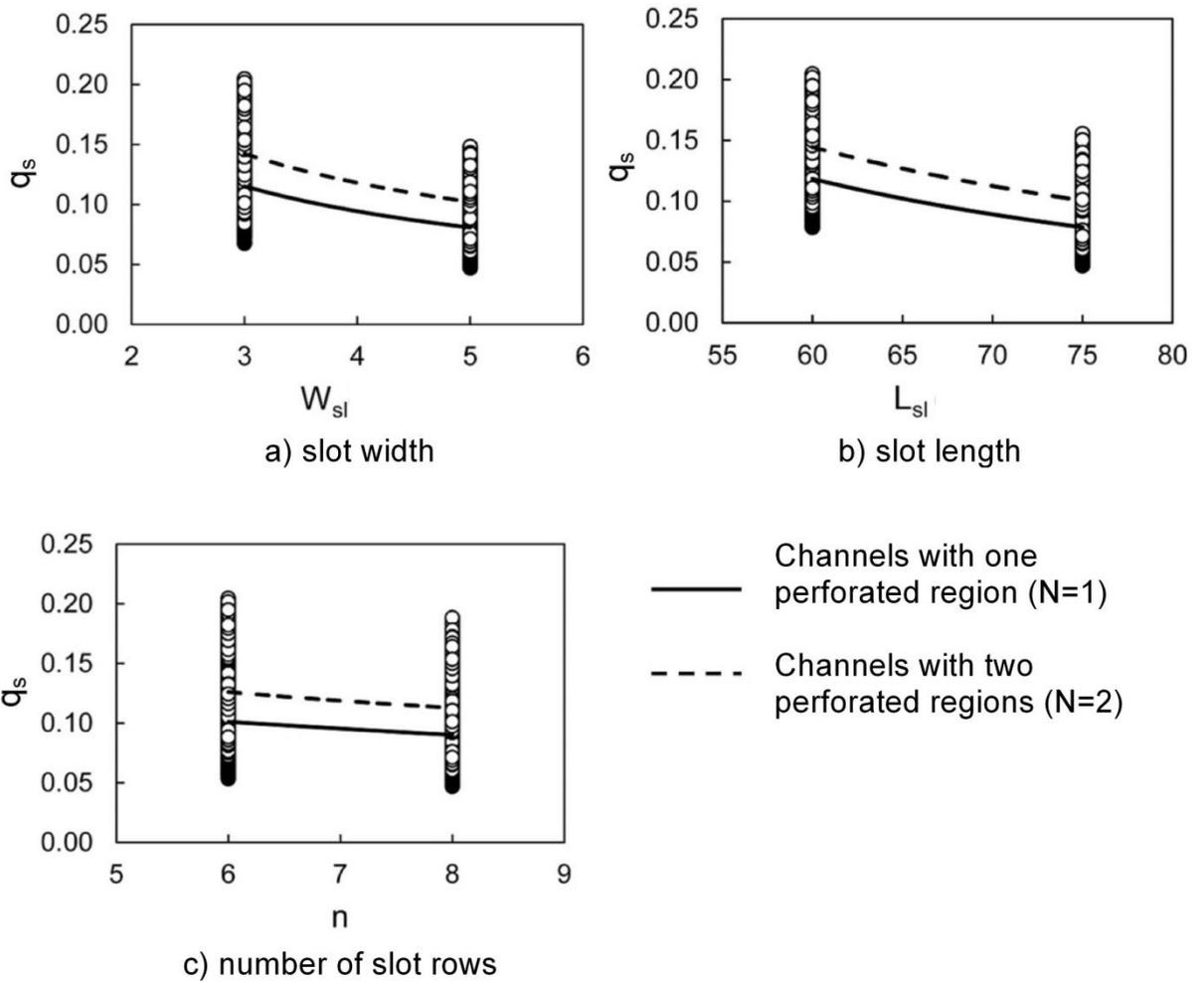


Рис. 10 - Изменение коэффициента снижения несущей способности в зависимости от параметров перфораций

Fig. 10 - Variation in reduction factors with parameters of perforation pattern

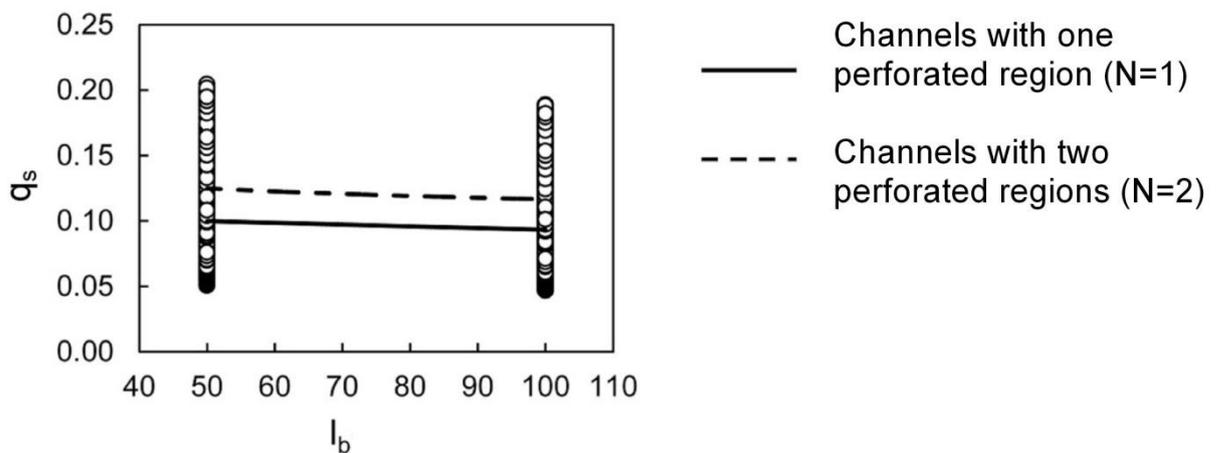


Рис. 11 - Изменение коэффициента снижения несущей способности в зависимости от ширины опорной пластины

Fig. 11 - Variation in reduction factors with bearing length

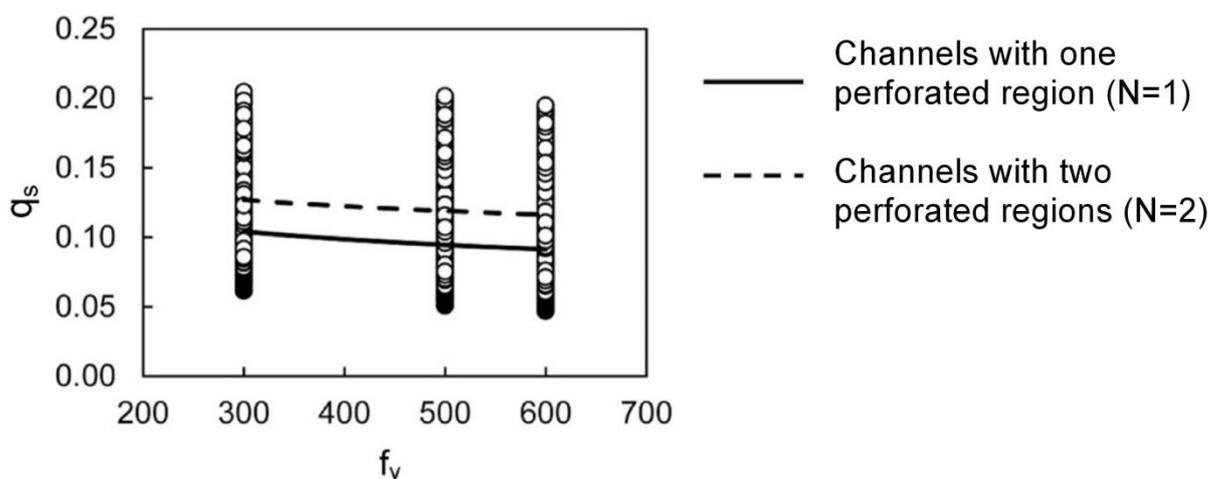


Рис. 12 - Изменение коэффициента снижения несущей способности в зависимости от предела текучести

Fig. 12 - Variation in reduction factors with yield stress

3.3 Уравнения для определения несущей способности

Данные о несущей способности перфорированных профилей при местном действии промежуточной нагрузки на две полки, полученные в результате численных параметрических исследований, использовались для разработки уравнения для определения несущей способности, которое имеет вид:

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

Уравнение (2) основано на введении в уравнение для определения несущей способности неперфорированных профилей (1) коэффициента снижения несущей способности q_s , который зависит от параметров, варьируемых в этом исследовании, и определяется уравнением (3) и уравнениями (4) – (10).

$$q_s = k_{L_{sl}} k_{nW_{sl}} k_N k_{F_y} k_{d_1} k_{l_b} k_{r_i} \quad (3)$$

$$k_{L_{sl}} = 153,6 L_{sl}^{-1,726} \quad (4)$$

$$k_{nW_{sl}} = 7,2141 (nW_{sl})^{-0,606} \quad (5)$$

$$k_N = 0,8934 N^{0,3213} \quad (6)$$

$$k_{F_y} = 2,6265 F_y^{-0,158} \quad (7)$$

$$k_{d_1} = 0,3081 d_1^{0,2236} \quad (8)$$

$$k_{l_b} = 1,5313 l_b^{-0,1} \quad (9)$$

$$k_{r_i} = 0,015 r_i + 0,9275 \quad (10)$$

где $k_{L_{sl}}$, $k_{nW_{sl}}$, k_N , k_{F_y} , k_{d_1} , k_{l_b} , k_{r_i} – коэффициенты, учитывающие влияние длины перфорации L_{sl} , суммарной высоты перфораций nW_{sl} , количества областей перфораций N , предела текучести F_y , высоты плоской части стенки профиля d_1 , ширины опорной пластины l_b и внутреннего радиуса изгиба r_i , соответственно, на коэффициент снижения несущей способности.

Уравнения (4) – (10) для определения коэффициентов снижения несущей способности были получены по ниже представленному алгоритму.

Degtyareva, N.

Parametric study and proposed design equation for cold-formed steel channels with slotted webs subjected to web crippling under interior two flange load case;

2021; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 97 Article No 9701. doi: 10.4123/CUBS.97.1

1. Строились графики зависимости отношения $P_{\text{slot}}/P_{\text{sol}}$ от варьируемых параметров и определялась переменная, при которой была наибольшая корреляция с отношением $P_{\text{slot}}/P_{\text{sol}}$, где P_{slot} – несущая способность перфорированных профилей, определенная в результате КЭ моделирования, P_{sol} – несущая способность неперфорированных профилей, определенная по уравнению (1) [4]. Этой переменной стала L_{sl} . В результате уравнение (4) зависимости отношения $P_{\text{slot}}/P_{\text{sol}}$ от L_{sl} было получено.

2. Строились графики зависимости отношения $P_{\text{slot}}/(P_{\text{sol}} k_{L_{\text{sl}}})$ от варьируемых параметров и определялась переменная, при которой была наибольшая корреляция с отношением $P_{\text{slot}}/(P_{\text{sol}} k_{L_{\text{sl}}})$. Этой переменной было произведение nW_{sl} . В результате уравнение (5) зависимости отношения $P_{\text{slot}}/(P_{\text{sol}} k_{L_{\text{sl}}})$ от nW_{sl} было получено.

3. Строились графики зависимости отношения $P_{\text{slot}}/(P_{\text{sol}} k_{L_{\text{sl}}} k_{nW_{\text{sl}}})$ от варьируемых параметров и определялась переменная, при которой была наибольшая корреляция с отношением $P_{\text{slot}}/(P_{\text{sol}} k_{L_{\text{sl}}} k_{nW_{\text{sl}}})$. Этой переменной была N . В результате уравнение (6) зависимости отношения $P_{\text{slot}}/(P_{\text{sol}} k_{L_{\text{sl}}} k_{nW_{\text{sl}}})$ от N было получено.

4. Эти этапы повторялись, чтобы учесть все параметры, варьируемые в данном исследовании, и чтобы значения несущей способности, вычисленные по уравнению, стали близкими к данным, полученным в результате КЭ расчетов.

Сравнение значений несущих способностей $P_{(2)}$ и $P_{(\text{FEA})}$, полученных в результате расчета по формулам (2) – (10) и расчета в программном комплексе ANSYS, соответственно, приведено на рис. 13. Среднее значение отношения $P_{(\text{FEA})}/P_{(2)}$ составило 1,00 при коэффициенте вариации 0,066.

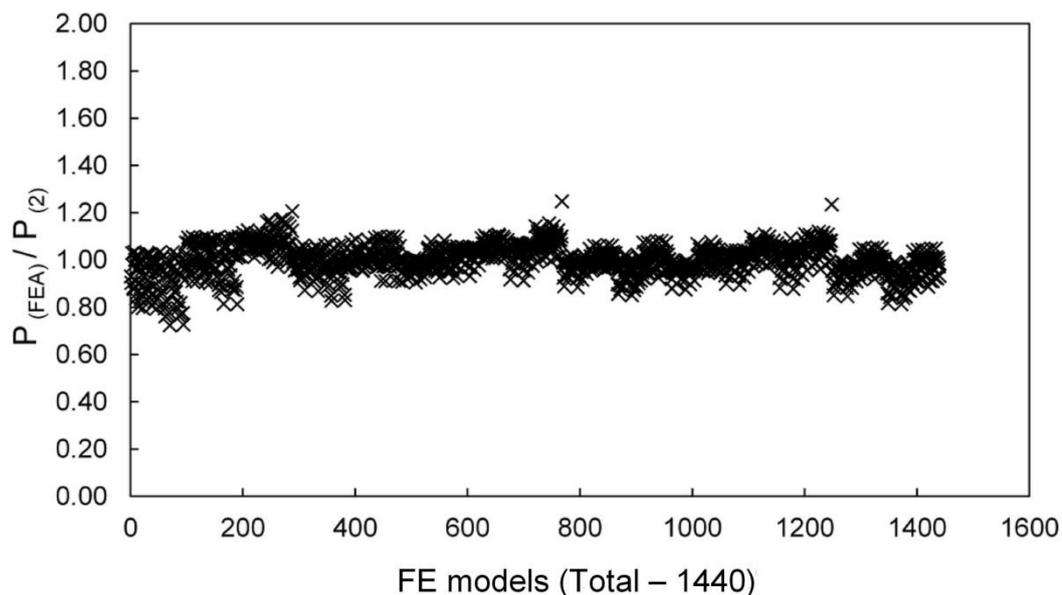


Рис. 13 - Сравнение значений несущей способности, полученной в результате КЭ расчета и вычисленных с помощью уравнения (2)

Fig. 13 - Comparison of web crippling capacities obtained from FEA and calculated using the developed equation (2)

4 Conclusions

В статье представлены результаты параметрических исследований прочности перфорированных профилей при местном действии промежуточной нагрузки на две полки. В рамках исследований изучалось влияние параметров поперечного сечения, ширины опирания, предела текучести и схем и размеров перфораций на величину несущей способности. По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. В профилях, рассмотренных в данном исследовании, перфорации, расположенные в стенке профилей, привели к снижению прочности на 80–95% по сравнению с неперфорированными профилями.



2. Несущая способность профилей с двумя областями перфораций выше, чем несущая способность профилей с одной областью перфораций.

3. С увеличением размера и количества перфораций по высоте стенки профиля прочность при местном действии промежуточной нагрузки на две полки снижается.

4. С увеличением высоты плоской части профиля, толщины стенки профиля и внутреннего радиуса изгиба отношение несущей способности перфорированного профиля к несущей способности неперфорированного профиля незначительно повышается.

5. С увеличением ширины опирания профиля на опору отношение несущей способности перфорированного профиля к несущей способности неперфорированного профиля незначительно снижается.

6. С увеличением предела текучести профиля отношение несущей способности перфорированного профиля к несущей способности неперфорированного профиля снижается.

7. На основе полученных данных были разработаны уравнения для определения несущей способности перфорированных профилей при местном действии промежуточной нагрузки на две полки. В уравнениях учтены схемы и размеры перфораций, ширина опирания, геометрические и механические характеристики профилей. Сравнение результатов расчета по предложенной формуле и КЭ моделирования позволяют сделать вывод, что разработанные уравнения позволяют с достаточной точностью определять несущую способность перфорированных профилей при местном действии промежуточной нагрузки на две полки.

5 Acknowledgements

Статья выполнена при поддержке Правительства РФ (Постановление №211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.A03.21.0011. Автор статьи выражает признательность и благодарность Южно-Уральскому государственному университету за поддержку, необходимую для проведения исследований.

References

1. AISI-American Iron and Steel Institute. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members AISI S100-16. AISI. 2016.
2. STANDARDIZATION, E.C.F. Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Design of Structural Elements. 2009.
3. Code Design SP 260.1325800.2016 «Cold-formed thin-walled steel profile and galvanized corrugated plate constructions. Design rules». 2017.
4. 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. DOI:10.1016/j.tws.2017.06.003.
5. Ren, W.-X., Fang, S.-E., Young, B. Finite-Element Simulation and Design of Cold-Formed Steel Channels Subjected to Web Crippling. *Journal of Structural Engineering*. 2006. DOI:10.1061/(asce)0733-9445(2006)132:12(1967).
6. 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. DOI:10.1016/j.tws.2012.01.003.
7. Uzzaman, A., Lim, J.B.P., Nash, D., Rhodes, J., Young, B. Cold-formed steel sections with web openings subjected to web crippling under two-flange loading conditions - Part II: Parametric study and proposed design equations. *Thin-Walled Structures*. 2012. DOI:10.1016/j.tws.2012.03.009.
8. Yousefi, A.M., Lim, J.B.P., Clifton, G.C. Cold-formed ferritic stainless steel unlipped channels with web openings subjected to web crippling under interior-two-flange loading condition – Part II: Parametric study and design equations. *Thin-Walled Structures*. 2017. DOI:10.1016/j.tws.2017.03.025.
9. Elilarasi, K., Janarthanan, B. Effect of web holes on the web crippling capacity of cold-formed LiteSteel beams under End-Two-Flange load case. *Structures*. 2020. DOI:10.1016/j.istruc.2020.03.022.
10. Uzzaman, A., Lim, J.B.P., Nash, D., Rhodes, J., Young, B. Effect of offset web holes on web crippling strength of cold-formed steel channel sections under end-two-flange loading condition.

Degtyareva, N.

Parametric study and proposed design equation for cold-formed steel channels with slotted webs subjected to web crippling under interior two flange load case;

2021; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 97 Article No 9701. doi: 10.4123/CUBS.97.1



- Thin-Walled Structures. 2013. DOI:10.1016/j.tws.2012.12.003.
11. Uzzaman, A., Lim, J.B.P., Nash, D., Rhodes, J., Young, B. Web crippling behaviour of cold-formed steel channel sections with offset web holes subjected to interior-two-flange loading. *Thin-Walled Structures*. 2012. DOI:10.1016/j.tws.2011.09.009.
 12. Yousefi, A.M., Lim, J.B.P., Clifton, G.C. Web crippling design of cold-formed ferritic stainless steel unlipped channels with fastened flanges under end-two-flange loading condition. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. DOI:10.1016/j.jcsr.2018.03.032.
 13. Uzzaman, A., Lim, J.B.P., Nash, D., Roy, K. Cold-formed steel channel sections under end-two-flange loading condition: Design for edge-stiffened holes, unstiffened holes and plain webs. *Thin-Walled Structures*. 2020. DOI:10.1016/j.tws.2019.106532.
 14. Lian, Y., Uzzaman, A., Lim, J.B.P., Abdelal, G., Nash, D., Young, B. Web crippling behaviour of cold-formed steel channel sections with web holes subjected to interior-one-flange loading condition – Part II: parametric study and proposed design equations. *Thin-Walled Structures*. 2017. DOI:10.1016/j.tws.2016.10.018.
 15. Lian, Y., Uzzaman, A., Lim, J.B.P., Abdelal, G., Nash, D., Young, B. Effect of web holes on web crippling strength of cold-formed steel channel sections under end-one-flange loading condition - Part II: Parametric study and proposed design equations. *Thin-Walled Structures*. 2016. DOI:10.1016/j.tws.2016.06.026.
 16. Yousefi, A.M., Lim, J.B.P., Charles Clifton, G. Web crippling strength of perforated cold-formed ferritic stainless steel unlipped channels with restrained flanges under one-flange loadings. *Thin-Walled Structures*. 2019. DOI:10.1016/j.tws.2019.01.002.
 17. Yousefi, A.M., Lim, J.B.P., Clifton, G.C. Cold-formed ferritic stainless steel unlipped channels with web perforations subject to web crippling under one-flange loadings. *Construction and Building Materials*. 2018. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.09.152.
 18. Yousefi, A.M., Lim, J.B.P., Uzzaman, A., Lian, Y., Clifton, G.C., Young, B. Design of cold-formed stainless steel lipped channel sections with web openings subjected to web crippling under end-one-flange loading condition. *Advances in Structural Engineering*. 2017. DOI:10.1177/1369433216670170.
 19. 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. DOI:10.1016/j.tws.2017.05.028.
 20. 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. DOI:10.1016/j.tws.2020.106951.
 21. 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. DOI:10.1016/j.jcsr.2019.07.008.
 22. Degtyareva, N., Poologanathan, K., Mahendran, M. Web crippling tests of cold-formed steel channels with staggered web perforations. *Thin-Walled Structures*. 2020. DOI:10.1016/j.tws.2020.107314.
 23. Degtyareva, N. V. Finite Element Analysis of Cold-Formed Steel Channels with Solid and Slotted Webs Subjected to Web Crippling under Interior Two Flange Load Case. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2021. 95(2)(Article No 9502). DOI:10.4123/CUBS.95.2.
 24. Kostenetskiy, P., Semenikhina, P. SUSU Supercomputer Resources for Industry and fundamental Science. *Proceedings - 2018 Global Smart Industry Conference, GloSIC 2018*. 2018. DOI:10.1109/GloSIC.2018.8570068.
 25. AISI S909-17. Test Standard for Determining the Web Crippling Strength of Cold-Formed Steel Flexural Members, 2017 Edition 2018.

Degtyareva, N.

Parametric study and proposed design equation for cold-formed steel channels with slotted webs subjected to web crippling under interior two flange load case;

2021; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 97 Article No 9701. doi: 10.4123/CUBS.97.1