

# CFSteel

*Версия 4.3*

Том II

**Верификационные расчёты**

2022

НПК Дельта Инжиниринг оставляет за собой право на внесение изменений в данный документ без предварительного уведомления.

Никакая часть данного документа не может быть воспроизведена или передана в любой форме и любыми способами в каких-либо целях без письменного согласия НПК Дельта Инжиниринг.

© 2008 – 2022 НПК Дельта Инжиниринг с сохранением всех прав

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. СЕЧЕНИЕ.....	6
1.1. Вычисление геометрических характеристик полного сечения.....	6
1.2. Вычисление геометрических характеристик эффективного сечения.....	16
1.2.1. Вычисление геометрических характеристик эффективного сечения С-образного профиля в соответствии с СП 260.1325800.2016 .....	16
1.2.2. Вычисление геометрических характеристик эффективного сечения С-образного профиля при сжатии в соответствии с ЕС3 .....	25
1.2.3. Вычисление геометрических характеристик эффективного сечения С-образного профиля .....	30
1.2.4. Вычисление геометрических характеристик эффективного сечения С-образного профиля при изгибе относительно оси наибольшей жёсткости в соответствии с ЕС3.....	32
1.2.5. Вычисление геометрических характеристик эффективного сечения Швеллера при сжатии в соответствии с ЕС3 .....	34
2. ЭЛЕМЕНТЫ .....	41
2.1. Растяжение .....	41
2.2. Сжатие .....	62
2.2.1. Устойчивость сжатого элемента С-образного сечения в соответствии с СП 260.1325800.2016.....	62
2.2.2. Устойчивость сжатых элементов в соответствии с ЕС3.....	77
2.2.2.1. Расчёт несущей способности по устойчивости сжатого элемента С-образного сечения.....	77
2.2.2.2. Проверка устойчивости сжатого элемента С-образного сечения .....	78
2.2.3. Устойчивость сжатых элементов в соответствии с AISI S100 Specification....	80
2.2.3.1. Определение несущей способности сжатого элемента из спаренных С-образных профилей .....	80
2.3. Сжатие с изгибом .....	82
2.3.1. Сжатый с изгибом элемент из С-образного профиля по СП 260.1325800.2016 .....	82
2.3.2. Сжатый с изгибом элемент из спаренных С-образных профилей по СП 260.1325800.2016 .....	98
2.3.3. Сжатый с изгибом элемент из спаренных С-образных профилей по ЕС3.....	131
ЛИТЕРАТУРА.....	162

# ВВЕДЕНИЕ

Программа CFSteel предназначена для расчёта конструктивных элементов из стальных тонкостенных холодногнутых профилей, вычисления геометрических характеристик сечений, а также расчёта ферм из холодногнутых профилей.

В данном документе приведены результаты расчётов в программе, которые сопоставляются с результатами расчётов, выполненных авторами программы ручным способом и/или данными расчётов из других источников, а также результатами испытаний, приведёнными в научно-технической литературе.

Том II «Верификационные расчёты» является составной частью документации к программе CFSteel.

В Разделе 1 приведены расчёты геометрических характеристик сечений тонкостенных холодногнутых профилей. Первая часть Раздела посвящена расчётам характеристик полных (нередуцированных) сечений. В табличной форме приводится сравнение результатов, полученных в программе, с данными, представленными в документах различных производителей холодногнутых профилей. Следует иметь в виду, что в последних, как правило, не оговаривается, какие допущения приняты при расчёте геометрических характеристик. Например, учитываются ли закругления в местахгиба, или приняты какие-либо упрощения. В некоторых источниках не приводятся радиусы закругления. В CFSteel геометрические характеристики сечений вычисляются с учётом закруглений в местахгиба без упрощений. Исключение составляют *момент инерции при свободном кручении, секторальный момент инерции и положение центра изгиба*, которые определяются в соответствии с Приложением С EN 1993-1-3 без учёта закругления.

Во второй части Раздела 1 приводятся расчёты геометрических характеристик эффективных сечений. Представлены пошаговые «ручные» вычисления параметров эффективных сечений в сравнении с аналогичными расчётами, приведёнными в различных литературных источниках и в программе.

В Разделе 2 представлены расчёты конструктивных элементов из холодногнутых профилей по различным нормам: СП 260.1325800.2016, Eurocode 3 и североамериканским нормам North American Specification (AISI S100). Приведено сравнение результатов, полученных ручным расчётом по различным методикам, с результатами CFSteel, а также с экспериментальными данными, приведёнными в научно-технической литературе.

Данный документ является общим *ознакомительным вариантом* Верификационных расчётов, которые здесь представлены в *сокращённом* виде. При поставке программного продукта CFSteel зарегистрированным пользователям передаётся полный вариант Верификационных расчётов, который в совокупности с материалами, изложенными в документах: CFSteel: Том I. Руководство пользователя и CFSteel: Том III. CFSTruss. Расчёт ферм из стальных тонкостенных холодногнутых профилей, представляет собой базу знаний.

*С уважением,  
коллектив разработчиков CFSteel*

[www.CFSteel.ru](http://www.CFSteel.ru)  
[deltaing@mail.ru](mailto:deltaing@mail.ru)



# 1. СЕЧЕНИЕ

## 1.1. Вычисление геометрических характеристик полного сечения

В Таблице 1.1.1 представлено сравнение геометрических характеристик С-образных сечений, приведённых в Техническом Руководстве компании Руукки [28], с результатами расчёта в программе CFSteel. В [28] не указан радиус закругления в местахгиба. В CFSteel принято: радиус закругления  $r = 3 \text{ мм}$ , расчётная толщина  $t = t_{nom} - t_{coat}$ ,  $t_{coat} = 0,04 \text{ мм}$  для класса цинкования  $275 \text{ г/м}^2$ . Геометрические характеристики в программе вычисляются с учётом закругления в местахгиба без упрощений. Количество знаков после запятой принято таким же, как в [28].

Таблица 1.1.1 - С-образные профили. Сопоставление результатов, полученных в CFSteel, с данными, приведёнными в Техническом Руководстве компании Руукки [28]

Cross-section	Height h	Thickness $t_{nom}$	Width of wide flange, A	Width of narrow flange, B	Fold C	Source	Properties of gross cross-section						
							Weight, g	Cross-section area, $A_g$	Centre of gravity, $Y_p$	Centre of gravity, $Z_p$	Moment of inertia, $I_y$	Section modulus, $W_y$	Radius of gyration, $i_y$
	mm	mm	mm	mm	mm		kg/m	cm <sup>2</sup>	mm	mm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm
C100	100	1	45	39	18	Ruukki	1,63	2,03	14,70	50,40	31,155	6,124	3,918
						CFSteel	1,69	2,02	14,77	51,39	31,23	6,077	3,936
						%	3,7	0,5	0,5	2,0	0,2	0,8	0,5
		1,2	45	39	18	Ruukki	1,96	2,45	14,70	50,40	37,607	7,378	3,918
						CFSteel	2,02	2,42	14,78	51,39	37,372	7,27	3,926
						%	3,1	1,2	0,5	2,0	0,6	1,5	0,2
	1,5	46	40	18	Ruukki	2,45	3,08	14,70	50,40	47,262	9,244	3,917	
					CFSteel	2,52	3,06	15,19	51,39	47,06	9,158	3,922	
					%	2,9	0,6	3,3	2,0	0,4	0,9	0,1	
	2	47	41	18	Ruukki	3,27	4,13	14,70	50,40	63,289	12,319	3,915	
					CFSteel	3,33	4,1	15,19	51,39	62,6	12,182	3,908	
					%	1,8	0,7	3,3	2,0	1,1	1,1	0,2	
C120	120	1	45	39	18	Ruukki	1,81	2,22	13,40	60,50	47,935	7,857	4,647
						CFSteel	1,86	2,21	13,53	61,53	47,956	7,794	4,660
						%	2,8	0,5	1,0	1,7	0,0	0,8	0,3
		1,2	45	39	18	Ruukki	2,17	2,68	13,40	60,50	57,866	9,469	4,647
						CFSteel	2,21	2,66	13,54	61,53	57,441	9,335	4,650
						%	1,8	0,7	1,0	1,7	0,7	1,4	0,1
	1,5	46	40	18	Ruukki	2,71	3,37	13,40	60,50	72,727	11,871	4,646	
					CFSteel	2,76	3,35	13,93	61,53	72,374	11,763	4,647	
					%	1,8	0,6	4,0	1,7	0,5	0,9	0,0	
	2	47	41	18	Ruukki	3,61	4,52	13,40	60,50	97,403	15,834	4,642	
					CFSteel	3,65	4,49	13,92	61,52	96,411	15,67	4,633	
					%	1,1	0,7	3,9	1,7	1,0	1,0	0,2	
C150	150	1	45	39	18	Ruukki	2,04	2,52	12,00	75,50	81,872	10,779	5,700
						CFSteel	2,1	2,5	12,00	76,70	81,442	10,618	5,712
						%	2,9	0,8	0,0	1,6	0,5	1,5	0,2
		1,2	45	39	18	Ruukki	2,45	3,04	12,00	75,50	98,841	12,995	5,702
						CFSteel	2,5	3	12,00	76,70	97,651	12,731	5,700
						%	2,0	1,3	0,0	1,6	1,2	2,0	0,0
	1,5	46	40	18	Ruukki	3,06	3,82	12,00	75,50	124,239	16,302	5,703	
					CFSteel	3,12	3,79	12,40	76,70	123,09	16,049	5,699	
					%	2,0	0,8	3,3	1,6	0,9	1,6	0,1	
	2	47	41	18	Ruukki	4,08	5,13	14,70	50,40	63,289	12,319	5,696	
					CFSteel	4,13	5,08	15,19	51,39	62,6	12,182	5,686	

Сечение

						%	1,2	1,0	3,3	2,0	1,1	1,1	0,2
C200	200	1,5	70	62	26	Ruukki	4,36	5,5	20,40	101,10	333,533	32,753	7,787
						CFSteel	4,46	5,42	20,18	102,12	326,785	32,001	7,761
						%	2,3	1,5	1,1	1,0	2,0	2,3	0,3
		2	71	63	26	Ruukki	5,81	7,38	20,40	101,10	447,103	43,798	7,784
						CFSteel	5,91	7,27	20,56	102,11	436,661	42,762	7,748
						%	1,7	1,5	0,8	1,0	2,3	2,4	0,5
		2,5	72	64	26	Ruukki	7,26	9,25	20,40	101,10	560,349	54,376	7,783
						CFSteel	7,36	9,12	20,95	102,11	545,501	53,422	7,734
						%	1,4	1,4	2,7	1,0	2,6	1,8	0,6
		3	73	65	26	Ruukki	8,71	11,13	20,40	101,10	673,275	65,63	7,778
						CFSteel	8,81	10,96	21,33	102,11	653,304	63,982	7,721
						%	1,1	1,5	4,6	1,0	3,0	2,5	0,7
C250	250	1,5	70	62	26	Ruukki	4,92	6,23	18,00	126,30	565,589	44,516	9,528
						CFSteel	5,06	6,15	17,87	127,34	554,73	43,563	9,494
						%	2,8	1,3	0,7	0,8	1,9	2,1	0,4
		2	71	63	26	Ruukki	6,56	8,36	18,00	126,30	758,256	59,562	9,524
						CFSteel	6,71	8,25	18,24	127,34	741,894	58,263	9,481
						%	2,3	1,3	1,3	0,8	2,2	2,2	0,5
		2,5	72	64	26	Ruukki	8,2	10,48	18,00	126,30	950,41	74,508	9,523
						CFSteel	8,36	10,35	18,60	127,33	927,625	72,85	9,467
						%	2,0	1,2	3,3	0,8	2,4	2,2	0,6
		3	73	65	26	Ruukki	9,84	12,61	18,00	126,30	1142,055	89,356	9,517
						CFSteel	9,99	12,44	18,97	127,33	1111,922	87,325	9,454
						%	1,5	1,3	5,4	0,8	2,6	2,3	0,7
C300	300	1,5	89	81	26	Ruukki	5,95	7,52	22,30	151,30	998,75	65,688	11,524
						CFSteel	6,12	7,44	22,19	152,32	983,224	64,549	11,496
						%	2,9	1,1	0,5	0,7	1,6	1,7	0,2
		2	90	82	26	Ruukki	7,93	10,08	22,30	151,30	1339,303	87,94	11,527
						CFSteel	8,11	9,98	22,55	152,32	1315,698	86,377	11,482
						%	2,3	1,0	1,1	0,7	1,8	1,8	0,4
		2,5	91	83	26	Ruukki	9,91	12,65	22,30	151,30	1679,111	110,071	11,521
						CFSteel	10,08	12,49	22,74	152,03	1640,721	107,92	11,469
						%	1,7	1,3	2,0	0,5	2,3	2,0	0,5
		3	92	84	26	Ruukki	11,89	15,21	22,30	151,30	2018,181	132,08	11,519
						CFSteel	12,09	15,04	23,17	152,31	1974,149	129,607	11,455
						%	1,7	1,1	3,9	0,7	2,2	1,9	0,6
C350	350	2,0	90	82	30	Ruukki	8,87	11,2	21,20	176,20	1956,978	110,463	13,219
						CFSteel	9,04	11,12	21,53	177,43	1933,567	108,974	13,189
						%	1,9	0,7	1,6	0,7	1,2	1,3	0,2
		2,5	91	83	30	Ruukki	11,09	14,05	21,20	176,20	2453,684	138,303	13,215
						CFSteel	11,26	13,94	21,89	177,43	2420,139	136,298	13,176
						%	1,5	0,8	3,3	0,7	1,4	1,4	0,3
		3,0	92	84	30	Ruukki	13,31	16,9	21,20	176,20	2949,382	166,008	13,211
						CFSteel	13,47	16,76	22,11	177,43	2903,995	163,689	13,163
						%	1,2	0,8	4,3	0,7	1,5	1,4	0,4

В Таблице 1.1.2 представлено сравнение значений геометрических характеристик С-образных сечений, полученных в CFSteel, со значениями, приведёнными в Техническом Руководстве ассоциации Steel Stud Manufactures Association [30]. Геометрические характеристики в программе вычисляются с учётом закругления в местахгиба без упрощений за исключением момента инерции при свободном кручении  $I_t$  (в Таблице 1.1.2 -  $J_t$ ), секториального момента инерции  $I_w$  (в Таблице 1.1.2 -  $C_w$ ) и расстояния между центром тяжести и центром изгиба сечения (в Таблице -  $X_0$ ). Данные характеристики вычисляются в предположении острых углов (без закруглений) в соответствии с Приложением С EN 1993-1-3 [4].

Сечение

Таблица 1.1.2 - С-образные профили. Сопоставление результатов, полученных в CFSteel, с данными, приведёнными в Техническом Руководстве SSMA [30]

Section	Height h	Flange width b <sub>f</sub>	Lip width c	Design thickness t		Corn er radii r	Source	Area A		Moment of inertia I <sub>x</sub>		Section modulus S <sub>x</sub>		Radius of guration R <sub>x</sub>		Moment of inertia I <sub>y</sub>		Radius of guration R <sub>y</sub>		St. Venant torsional constant J <sub>t</sub> (x1000)		Torsional warping constant C <sub>w</sub>		Distance from the shear center to the centroid X <sub>0</sub>	
				in	mm			in <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	in <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	in	cm	in <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	in	cm	in <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	in <sup>6</sup>	cm <sup>6</sup>	in	cm		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
400S137-33	101,6	34,8	9,5	0,0346	0,88	1,94	SSMA	0,249	1,606	0,603	25,097	0,301	4,932	1,556	3,952	0,061	2,539	0,496	1,260	0,099	4,120	0,204	54,876	0,965	2,451
							CFSteel		1,607		25,068		4,935		3,950		2,527		1,254		4,241		54,209		2,439
							%		0,1		0,1		0,1		0,1		0,5		0,5		2,9		1,2		0,5
400S137-43	101,6	34,8	9,5	0,0451	1,15	1,81	SSMA	0,323	2,083	0,776	32,297	0,388	6,358	1,551	3,940	0,078	3,246	0,491	1,247	0,219	9,115	0,257	69,133	0,954	2,423
							CFSteel		2,087		32,344		6,367		3,936		3,220		1,242		9,409		68,575		2,410
							%		0,2		0,1		0,1		0,1		0,8		0,4		3,2		0,8		0,5
400S137-54	101,6	34,8	9,5	0,0566	1,44	2,16	SSMA	0,401	2,586	0,953	39,664	0,477	7,817	1,542	3,917	0,094	3,912	0,484	1,229	0,428	17,813	0,311	83,659	0,94	2,388
							CFSteel		2,585		39,631		7,801		3,916		3,878		1,225		18,358		82,900		2,375
							%		0,1		0,1		0,2		0,0		0,9		0,4		3,1		0,9		0,5
400S137-68	101,6	34,8	9,5	0,0713	1,81	2,72	SSMA	0,497	3,206	1,165	48,487	0,582	9,537	1,531	3,889	0,112	4,661	0,475	1,207	0,842	35,044	0,375	100,875	0,922	2,342
							CFSteel		3,199		48,339		9,516		3,887		4,620		1,202		36,164		99,587		2,330
							%		0,2		0,3		0,2		0,0		0,9		0,4		3,2		1,3		0,5
400S137-97	101,6	34,8	9,5	0,1017	2,58	3,87	SSMA	0,686	4,425	1,557	64,802	0,779	12,765	1,507	3,828	0,142	5,910	0,454	1,153	2,365	98,431	0,486	130,734	0,885	2,248
							CFSteel		4,412		64,600		12,717		3,826		5,857		1,152		102,972		128,990		2,237
							%		0,3		0,3		0,4		0,0		0,9		0,1		4,6		1,3		0,5
400S162-33	101,6	41,1	12,7	0,0346	0,88	1,94	SSMA	0,275	1,774	0,692	28,801	0,346	5,670	1,586	4,028	0,103	4,287	0,611	1,552	0,11	4,578	0,363	97,647	1,263	3,208
							CFSteel		1,774		28,768		5,663		4,027		4,236		1,545		4,672		96,592		3,193
							%		0,0		0,1		0,1		0,0		1,2		0,4		2,0		1,1		0,5
400S162-43	101,6	41,1	12,7	0,0451	1,15	1,81	SSMA	0,357	2,303	0,892	37,125	0,446	7,309	1,581	4,016	0,131	5,452	0,606	1,539	0,242	10,072	0,46	123,740	1,252	3,180
							CFSteel		2,306		37,160		7,315		4,014		5,421		1,533		10,372		122,687		3,163
							%		0,1		0,1		0,1		0,0		0,6		0,4		3,0		0,9		0,5
400S162-54	101,6	41,1	12,7	0,0566	1,44	2,16	SSMA	0,443	2,857	1,098	45,699	0,549	8,996	1,574	3,998	0,159	6,618	0,6	1,524	0,473	19,686	0,56	150,640	1,238	3,145
							CFSteel		2,858		45,635		8,983		3,996		6,578		1,517		20,249		148,974		3,128
							%		0,0		0,1		0,1		0,0		0,6		0,5				1,1		0,5
400S162-68	101,6	41,1	12,7	0,0713	1,81	2,72	SSMA	0,55	3,548	1,346	56,021	0,673	11,028	1,564	3,973	0,192	7,991	0,591	1,501	0,933	38,831	0,67	180,230	1,22	3,099
							CFSteel		3,543		55,844		10,993		3,970		7,920		1,495		39,919		179,996		3,083
							%		0,1		0,3		0,3		0,1		0,9		0,4		2,8		0,1		0,5
400S162-97	101,6	41,1	12,7	0,1017	2,58	3,87	SSMA	0,762	4,915	1,812	75,415	0,906	14,847	1,542	3,917	0,249	10,363	0,572	1,453	2,628	109,377	0,89	239,410	1,18	2,997
							CFSteel		4,903		75,174		14,798		3,916		10,287		1,449		113,849		236,062		2,987
							%		0,2		0,3		0,3		0,0		0,7		0,3		4,1		1,4		0,3
400S200-33	101,6	50,8	15,8	0,0346	0,88	1,94	SSMA	0,31	2,000	0,812	33,795	0,406	6,653	1,619	4,112	0,183	7,616	0,769	1,953	0,124	5,161	0,69	185,610	1,68	4,267
							CFSteel		1,999		33,827		6,659		4,113		7,618		1,952		5,254		186,551		4,282
							%		0,0		0,1		0,1		0,0		0,0		0,1		1,8		0,5		0,3



Сечение

Таблица 1.1.2 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
400S200-43	101,6	50,8	15,8	0,0451	1,15	1,81	SSMA	0,402	2,593	1,047	43,576	0,524	8,587	1,615	4,102	0,235	9,781	0,764	1,941	0,272	11,321	0,88	236,720	1,67	4,242
							CFSSteel		2,600		43,741		8,610		4,101		9,789		1,940		11,670		237,855		4,251
							%		0,3		0,4		0,3		0,0		0,1		0,0		3,1		0,5		0,2
400S200-54	101,6	50,8	15,8	0,0566	1,44	2,16	SSMA	0,5	3,225	1,292	53,773	0,646	10,586	1,608	4,084	0,287	11,945	0,758	1,925	0,534	22,225	1,08	290,520	1,66	4,216
							CFSSteel		3,277		53,835		10,598		4,084		11,951		1,924		22,797		290,019		4,215
							%		1,6		0,1		0,1		0,0		0,1		0,1		2,6		0,2		0,0
400S200-68	101,6	50,8	15,8	0,0713	1,81	2,72	SSMA	0,622	4,012	1,589	66,134	0,795	13,028	1,599	4,061	0,349	14,525	0,75	1,905	1,054	43,867	1,31	352,390	1,64	4,166
							CFSSteel		4,006		66,087		13,009		4,062		14,512		1,903		44,979		352,303		4,169
							%		0,1		0,1		0,1		0,0		0,1		0,1		2,5		0,0		0,1
400S200-97	101,6	50,8	15,8	0,1017	2,58	3,87	SSMA	0,864	5,573	2,155	89,691	1,077	17,649	1,579	4,011	0,462	19,228	0,73	1,854	2,97	123,611	1,74	468,060	1,6	4,064
							CFSSteel		5,563		89,584		17,635		4,013		19,209		1,858		128,504		467,388		4,072
							%		0,2		0,1		0,1		0,1		0,1		0,2		4,0		0,1		0,2
400S250-43	101,6	63,5	15,8	0,0451	1,15	1,81	SSMA	0,447	2,883	1,224	50,943	0,612	10,029	1,655	4,204	0,399	16,606	0,945	2,400	0,303	12,611	1,48	398,120	2,13	5,410
							CFSSteel		2,892		51,109		10,061		4,204		16,631		2,398		12,958		399,001		5,426
							%		0,3		0,3		0,3		0,0		0,1		0,1		2,8		0,2		0,3
400S250-54	101,6	63,5	15,8	0,0566	1,44	2,16	SSMA	0,613	3,954	1,73	72,003	0,86	14,093	1,68	4,267	0,76	31,631	1,114	2,830	0,65	27,053	2,8	753,200	2,59	6,579
							CFSSteel		3,958		72,183		14,209		4,270		31,645		2,827		27,853		750,825		6,581
							%		0,1		0,3		0,8		0,1		0,0		0,1		3,0		0,3		0,0
400S250-68	101,6	63,5	15,8	0,0713	1,81	2,72	SSMA	0,764	4,928	2,13	88,651	1,07	17,534	1,67	4,242	0,93	38,707	1,1	2,794	1,29	53,690	3,43	922,670	2,57	6,528
							CFSSteel		4,926		88,980		17,516		4,250		38,755		2,805		55,020		917,965		6,533
							%		0,0		0,4		0,1		0,2		0,1		0,4		2,5		0,5		0,1
400S300-97	101,6	76,2	15,8	0,1017	2,58	3,87	SSMA	1,067	6,882	2,92	121,530	1,46	23,925	1,65	4,191	1,25	52,025	1,08	2,743	3,67	152,745	4,61	1240,090	2,53	6,426
							CFSSteel		6,874		121,718		23,960		4,208		52,265		2,757		157,584		1234,632		6,432
							%		0,1		0,2		0,1		0,4		0,5		0,5		3,2		0,4		0,1
600S137-33	152,4	34,8	9,5	0,0346	0,88	1,94	SSMA	0,318	2,051	1,582	65,843	0,52	8,521	2,22	5,639	0,069	2,872	0,46	1,168	0,12	4,994	0,5	134,500	0,8	2,032
							CFSSteel		2,054		65,791		8,634		5,660		2,829		1,174		5,395		133,087		2,038
							%		0,1		0,1		1,3		0,4		1,5		0,5		8,0		1,1		0,3
600S137-43	152,4	34,8	9,5	0,0451	1,15	1,81	SSMA	0,413	2,664	2,042	84,988	0,681	11,160	2,22	5,639	0,087	3,621	0,45	1,143	0,28	11,654	0,63	169,470	0,79	2,007
							CFSSteel		2,672		85,111		11,169		5,644		3,604		1,161		11,984		168,875		2,012
							%		0,3		0,1		0,1		0,1		0,5		1,6		2,8		0,4		0,3
600S137-54	152,4	34,8	9,5	0,0566	1,44	2,16	SSMA	0,514	3,315	2,518	104,799	0,839	13,749	2,21	5,613	0,1	4,162	0,45	1,143	0,54	22,475	0,76	204,440	0,78	1,981
							CFSSteel		3,316		104,710		13,741		5,619		4,341		1,144		23,414		204,827		1,981
							%		0,0		0,1		0,1		0,1		4,3		0,1		4,2		0,2		0,0
600S137-68	152,4	34,8	9,5	0,0713	1,81	2,72	SSMA	0,64	4,128	3,094	128,772	1,031	16,895	2,2	5,588	0,12	4,994	0,44	1,118	1,08	44,950	0,93	250,170	0,76	1,930
							CFSSteel		4,118		128,433		16,855		5,584		5,173		1,121		46,205		247,099		1,940
							%		0,2		0,3		0,2		0,1		3,6		0,3		2,8		1,2		0,5
600S137-97	152,4	34,8	9,5	0,1017	2,58	3,87	SSMA	0,88	5,676	4,188	174,305	1,396	22,876	2,17	5,512	0,15	6,243	0,42	1,067	3,06	127,357	1,21	325,490	0,73	1,854
							CFSSteel		5,723		173,752		22,802		5,510		6,565		1,071		132,053		322,903		1,855
							%		0,8		0,3		0,3		0,0		5,2		0,4		3,7		0,8		0,0

## Сечение

Таблица 1.1.2 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
600S137-118	152,4	34,8	9,5	0,1242	3,15	4,73	SSMA	1,06	6,837	4,913	204,479	1,638	26,842	2,14	5,436	0,17	7,075	0,4	1,016	5,47	227,661	1,39	373,910	0,7	1,778
							CFSSteel		6,854		203,770		26,741		5,453		7,313		1,033		237,961		369,194		1,792
							%		0,2		0,3		0,4		0,3		3,4		1,7		4,5		1,3		0,8
600S162-33	152,4	41,1	12,7	0,0346	0,88	1,94	SSMA	0,344	2,219	1,793	74,625	0,598	9,799	2,28	5,791	0,11	4,578	0,58	1,473	0,13	5,411	0,86	231,340	1,07	2,718
							CFSSteel		2,221		74,543		9,783		5,793		4,597		1,469		5,826		229,356		2,710
							%		0,1		0,1		0,2		0,0		0,4		0,3		7,7		0,9		0,3
600S162-43	152,4	41,1	12,7	0,0451	1,15	1,81	SSMA	0,447	2,883	2,316	96,392	0,772	12,651	2,27	5,766	0,14	5,827	0,57	1,448	0,3	12,486	1,09	293,210	1,06	2,692
							CFSSteel		2,890		96,518		12,666		5,779		5,869		1,457		12,948		292,229		2,682
							%		0,2		0,1		0,1		0,7		0,7		0,6		3,7		0,3		0,4
600S162-54	152,4	41,1	12,7	0,0566	1,44	2,16	SSMA	0,556	3,586	2,86	119,033	0,953	15,617	2,26	5,740	0,18	7,492	0,57	1,448	0,59	24,556	1,33	357,770	1,04	2,642
							CFSSteel		3,590		118,954		15,611		5,756		7,449		1,440		25,305		356,038		2,650
							%		0,1		0,1		0,0		0,3		0,6		0,5		3,1		0,5		0,3
600S162-68	152,4	41,1	12,7	0,0713	1,81	2,72	SSMA	0,693	4,470	3,525	146,711	1,175	19,255	2,25	5,715	0,21	8,740	0,56	1,422	1,17	48,695	1,62	435,780	1,03	2,616
							CFSSteel		4,462		146,274		19,196		5,725		8,973		1,418		49,960		432,040		2,607
							%		0,2		0,3		0,2		0,2		2,7		0,3		2,6		0,9		0,4
600S162-97	152,4	41,1	12,7	0,1017	2,58	3,87	SSMA	0,966	6,231	4,797	199,651	1,599	26,203	2,22	5,639	0,28	11,654	0,54	1,372	3,32	138,178	2,15	578,350	0,99	2,515
							CFSSteel		6,213		198,995		26,115		5,659		11,671		1,371		142,929		571,778		2,518
							%		0,3		0,3		0,3		0,4		0,1		0,0		3,4		1,1		0,1
600S162-118	152,4	41,1	12,7	0,1242	3,15	2,72	SSMA	1,158	7,469	5,652	235,236	1,884	30,873	2,2	5,588	0,32	13,318	0,52	1,321	5,95	247,639	2,48	667,120	0,97	2,464
							CFSSteel		7,452		234,422		30,764		5,609		13,269		1,334		257,757		660,196		2,453
							%		0,2		0,3		0,4		0,4		0,4		1,0		4,1		1,0		0,4
600S200-33	152,4	50,8	15,8	0,0346	0,88	1,94	SSMA	0,379	2,445	2,075	86,362	0,692	11,340	2,34	5,944	0,2	8,324	0,74	1,880	0,15	6,243	1,59	427,710	1,45	3,683
							CFSSteel		2,446		86,436		11,343		5,944		8,708		1,887		6,408		427,087		3,696
							%		0,1		0,1		0,0		0,0		4,6		0,4		2,6		0,1		0,4
600S200-43	152,4	50,8	15,8	0,0451	1,15	1,81	SSMA	0,482	3,109	2,683	111,666	0,894	14,650	2,33	5,918	0,26	10,821	0,73	1,854	0,33	13,735	2,03	546,070	1,44	3,658
							CFSSteel		3,184		112,015		14,700		5,931		11,191		1,875		14,246		546,213		3,668
							%		2,4		0,3		0,3		0,2		3,4		1,1		3,7		0,0		0,3
600S200-54	152,4	50,8	15,8	0,0566	1,44	2,16	SSMA	0,613	3,954	3,319	138,137	1,106	18,124	2,32	5,893	0,32	13,318	0,73	1,854	0,65	27,053	2,49	669,810	1,43	3,632
							CFSSteel		3,958		138,297		18,149		5,911		13,670		1,858		27,853		668,208		3,633
							%		0,1		0,1		0,1		0,3		2,6		0,2		3,0		0,2		0,0
600S200-68	152,4	50,8	15,8	0,0713	1,81	2,72	SSMA	0,764	4,928	4,101	170,684	1,367	22,401	2,31	5,867	0,4	16,648	0,72	1,829	1,29	53,690	3,04	817,760	1,41	3,581
							CFSSteel		4,926		170,490		22,374		5,883		16,612		1,836		55,020		815,167		3,589
							%		0,0		0,1		0,1		0,3		0,2		0,4		2,5		0,3		0,2
600S200-97	152,4	50,8	15,8	0,1017	2,58	3,87	SSMA	1,06	6,837	5,612	233,571	1,871	30,660	2,29	5,817	0,53	22,059	0,7	1,778	3,67	152,745	4,08	1097,520	1,37	3,480
							CFSSteel		6,874		233,224		30,607		5,825		22,029		1,790		157,584		1091,173		3,497
							%		0,5		0,1		0,2		0,1		0,1		0,7		3,2		0,6		0,5
600S200-118	152,4	50,8	15,8	0,1242	3,15	4,73	SSMA	1,283	8,275	6,641	276,398	2,214	36,281	2,27	5,766	0,61	25,388	0,69	1,753	6,59	274,276	4,75	1277,750	1,35	3,429
							CFSSteel		8,259		275,955		36,215		5,781		25,440		1,755		284,428		1270,954		3,428
							%		0,2		0,2		0,2		0,3		0,2		0,1		3,7		0,5		0,0

## Сечение

Таблица 1.1.2 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
600S250-43	152,4	63,5	15,8	0,0451	1,15	1,81	SSMA	0,537	3,464	3,082	128,273	1,027	16,829	2,39	6,071	0,45	18,729	0,92	2,337	0,36	14,983	3,41	917,290	1,87	4,750
							CFSSteel		3,477		128,721		16,892		6,085		19,091		2,324		15,533		916,560		4,754
							%		0,4		0,3		0,4		0,2		1,9		0,5		3,7		0,1		0,1
600S250-54	152,4	63,5	15,8	0,0566	1,44	2,16	SSMA	0,67	4,322	3,819	158,947	1,273	20,861	2,38	6,045	0,56	23,307	0,91	2,311	0,71	29,550	4,19	1127,110	1,86	4,724
							CFSSteel		4,324		159,136		20,884		6,066		23,409		2,327		30,381		1124,542		4,719
							%		0,1		0,1		0,1		0,3		0,4		0,7		2,8		0,2		0,1
600S250-68	152,4	63,5	15,8	0,0713	1,81	2,72	SSMA	0,836	5,392	4,727	196,738	1,576	25,826	2,37	6,020	0,68	28,302	0,9	2,286	1,41	58,684	5,14	1382,660	1,84	4,674
							CFSSteel		5,385		196,555		25,795		6,041		28,594		2,304		60,041		1377,038		4,672
							%		0,1		0,1		0,1		0,4		1,0		0,8		2,3		0,4		0,0
600S250-97	152,4	63,5	15,8	0,1017	2,58	3,87	SSMA	1,169	7,540	6,496	270,364	2,165	35,478	2,35	5,969	0,92	38,290	0,88	2,235	4,03	167,729	6,94	1866,860	1,8	4,572
							CFSSteel		7,529		270,001		35,433		5,988		38,346		2,257		172,124		1858,125		4,576
							%		0,1		0,1		0,1		0,3		0,1		1,0		2,6		0,5		0,1
600S250-118	152,4	63,5	15,8	0,1242	3,15	4,73	SSMA	1,407	9,075	7,713	321,015	2,571	42,131	2,34	5,944	1,07	44,533	0,87	2,210	7,23	300,913	8,14	2189,660	1,77	4,496
							CFSSteel		9,059		320,518		42,063		5,948		44,677		2,221		310,892		2177,513		4,504
							%		0,2		0,2		0,2		0,1		0,3		0,5		3,3		0,6		0,2
600S300-54	152,4	76,2	15,8	0,0566	1,44	2,16	SSMA	0,726	4,683	4,319	179,757	1,44	23,597	2,43	6,172	0,87	36,209	1,09	2,769	0,77	32,047	6,45	1735,050	2,29	5,817
							CFSSteel		4,690		179,975		23,619		6,195		36,439		2,787		32,910		1730,479		5,834
							%		0,2		0,1				0,4		0,6		0,7		2,7		0,3		0,3
600S300-68	152,4	76,2	15,8	0,0713	1,81	2,72	SSMA	0,907	5,850	5,354	222,833	1,785	29,251	2,43	6,172	1,07	44,533	1,08	2,743	1,53	63,679	7,93	2133,170	2,28	5,791
							CFSSteel		5,845		222,621		29,215		6,171		44,671		2,764		65,061		2124,579		5,786
							%		0,1		0,1		0,1		0,0		0,3		0,8		2,2		0,4		0,1
600S300-97	152,4	76,2	15,8	0,1017	2,58	3,87	SSMA	1,271	8,198	7,381	307,197	2,46	40,312	2,41	6,121	1,45	60,349	1,07	2,718	4,38	182,296	10,77	2897,130	2,24	5,690
							CFSSteel		8,184		306,778		40,260		6,122		60,379		2,716		186,665		2882,793		5,687
							%		0,2		0,1		0,1		0,0		0,0		0,1		2,4		0,5		0,0
600S300-118	152,4	76,2	15,8	0,1242	3,15	4,73	SSMA	1,531	9,875	8,785	365,632	2,928	47,981	2,39	6,071	1,704	70,920	1,05	2,667	7,87	327,549	12,68	3410,920	2,12	5,385
							CFSSteel		9,859		365,082		47,911		6,085		70,783		2,679		337,355		3392,551		5,613
							%		0,2		0,2		0,1		0,2		0,2		0,4		3,0		0,5		4,2
600S350-54	152,4	88,9	25,4	0,0566	1,44	2,16	SSMA	0,825	5,321	5,022	209,016	1,674	27,432	2,46	6,248	1,491	62,055	1,34	3,404	0,88	36,626	12,94	3480,860	3,03	7,696
							CFSSteel		5,332		209,382		27,478		6,266		62,155		3,414		37,349		3480,676		7,713
							%		0,2		0,2		0,2		0,3		0,2		0,3		2,0		0,0		0,2
600S350-68	152,4	88,9	25,4	0,0713	1,81	2,72	SSMA	1,032	6,656	6,237	259,584	2,079	34,069	2,45	6,223	1,841	76,622	1,33	3,378	1,74	72,419	15,96	4293,240	3,01	7,645
							CFSSteel		6,652		259,456		34,049		6,245		76,598		3,393		72,877		4285,746		7,666
							%		0,1		0,0		0,1		0,4		0,0		0,4		0,6		0,2		0,3
600S350-97	152,4	88,9	25,4	0,1017	2,58	3,87	SSMA	1,449	9,346	8,631	359,222	2,877	47,145	2,44	6,198	2,51	104,466	1,31	3,327	4,99	207,684	21,81	5866,890	2,97	7,544
							CFSSteel		9,335		358,907		47,101		6,201		104,722		3,349		212,196		5850,873		7,568
							%		0,1		0,1		0,1		0,1		0,2		0,6		2,2		0,3		0,3
600S350-118	152,4	88,9	25,4	0,1242	3,15	4,73	SSMA	1,748	11,275	10,304	428,852	3,435	56,289	2,42	6,147	2,97	123,611	1,3	3,302	8,99	374,164	25,79	6937,510	2,95	7,493
							CFSSteel		11,264		428,388		56,219		6,167		123,874		3,316		383,822		6917,245		7,495
							%		0,1		0,1		0,1		0,3		0,2		0,4		2,6		0,3		0,0

Сечение

В Таблицах 1.1.3 и 1.1.4 представлено сравнение геометрических характеристик С- и Сигма-образных сечений, полученных в CFSteel, с характеристиками, приведёнными в каталоге компании Прушиньски [29]. Расчётная толщина  $t = t_{nom} - t_{coat}$ ,  $t_{coat} = 0,04$  мм для класса цинкования 275 г/м<sup>2</sup>.

Таблица 1.1.3 - С-образные профили. Сопоставление результатов, полученных в CFSteel, с данными, приведёнными в каталоге компании Прушиньски [29]

Профиль	h, мм	b <sub>г</sub> , мм	c, мм	t <sub>ном</sub> , мм	r, мм	Источник	Вес, кг/м	Геометрические характеристики полного сечения							
								A, см <sup>2</sup>	I <sub>x</sub> , см <sup>4</sup>	I <sub>y</sub> , см <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> , см <sup>3</sup>	W <sub>y</sub> , см <sup>3</sup>	i <sub>x</sub> , см	i <sub>y</sub> , см	z <sub>0</sub> , см
С 100	100	60	20	1,0	1,5	Прушиньски	1,98	2,49	41,53	13,33	8,35	3,61	4,08	2,31	2,25
						CFSteel	2,04	2,43	40,74	13,33	8,15	3,6	4,1	2,35	2,3
						%	3,0	2,4	1,9	0,0	2,4	0,3	0,5	1,7	2,2
				1,5	2,25	Прушиньски	2,93	3,68	60,52	19,24	12,17	5,2	4,06	2,29	2,25
						CFSteel	2,99	3,63	60,2	19,52	12,05	5,27	4,07	2,32	2,3
						%	2,0	1,4	0,5	1,5	1,0	1,3	0,2	1,3	2,2
				2,0	3,0	Прушиньски	3,85	4,83	78,36	24,66	15,75	6,65	4,03	2,26	2,25
						CFSteel	3,91	4,81	78,5	25,19	15,71	6,8	4,04	2,29	2,29
						%	1,6	0,4	0,2	2,1	0,3	2,3	0,2	1,3	1,8
				2,5	3,75	Прушиньски	4,74	5,95	95,07	29,6	19,11	7,97	4	2,23	2,25
						CFSteel	4,79	5,94	95,63	30,38	19,13	8,18	4,01	2,26	2,29
						%	1,1	0,2	0,6	2,6	0,1	2,6	0,2	1,3	1,8
3,0	4,5	Прушиньски	5,6	7,03	110,66	34,08	22,24	9,17	3,97	2,2	2,25				
		CFSteel	5,65	7,04	111,63	35,09	22,34	9,44	3,98	2,23	2,28				
		%	0,9	0,1	0,9	3,0	0,4	2,9	0,3	1,4	1,3				
С 150	150	60	20	1,0	1,5	Прушиньски	2,38	2,99	105,63	15,35	14,13	3,78	5,94	2,27	1,88
						CFSteel	2,45	2,91	103,31	15,36	13,78	3,77	5,96	2,3	1,93
						%	2,9	2,7	2,2	0,1	2,5	0,3	0,3	1,3	2,7
				1,5	2,25	Прушиньски	3,52	4,43	154,73	22,18	20,7	5,45	5,91	2,24	1,88
						CFSteel	3,59	4,36	153,47	22,51	20,47	5,53	5,93	2,27	1,92
						%	2,0	1,6	0,8	1,5	1,1	1,5	0,3	1,3	2,1
				2,0	3,0	Прушиньски	4,63	5,83	201,41	28,47	26,94	6,99	5,88	2,21	1,88
						CFSteel	4,7	5,79	201,17	29,1	26,83	7,14	5,89	2,24	1,92
						%	1,5	0,7	0,1	2,2	0,4	2,1	0,2	1,4	2,1
				2,5	3,75	Прушиньски	5,72	7,2	245,68	34,22	32,87	8,39	5,84	2,18	1,88
						CFSteel	5,79	7,17	246,43	35,14	32,87	8,61	5,86	2,21	1,92
						%	1,2	0,4	0,3	2,7	0,0	2,6	0,3	1,4	2,1
3,0	4,5	Прушиньски	6,78	8,53	287,58	39,45	38,47	9,66	5,81	2,15	1,88				
		CFSteel	6,84	8,52	289,28	40,65	38,58	9,94	5,83	2,19	1,91				
		%	0,9	0,1	0,6	3,0	0,3	2,9	0,3	1,9	1,6				
С 200	200	60	20	1,5	2,25	Прушиньски	4,11	5,17	302,52	24,26	30,4	5,6	7,65	2,17	1,62
						CFSteel	4,19	5,09	301,27	24,65	30,13	5,68	7,69	2,2	1,66
						%	1,9	1,5	0,4	1,6	0,9	1,4	0,5	1,4	2,5
				2,0	3,0	Прушиньски	5,42	6,82	395	31,14	39,7	7,19	7,61	2,14	1,62
						CFSteel	5,5	6,76	396,15	31,88	39,62	7,34	7,65	2,17	1,66
						%	1,5	0,9	0,3	2,4	0,2	2,1	0,5	1,4	2,5
				2,5	3,75	Прушиньски	6,72	8,44	483,36	37,44	48,58	8,64	7,57	2,11	1,62
						CFSteel	6,78	8,4	486,84	38,51	48,69	8,86	7,61	2,14	1,65
						%	0,9	0,5	0,7	2,9	0,2	2,5	0,5	1,4	1,9
				3,0	4,5	Прушиньски	7,95	10,01	567,65	43,19	57,05	9,96	7,53	2,08	1,62
						CFSteel	8,03	10	573,38	44,57	57,35	10,25	7,57	2,11	1,65
						%	1,0	0,1	1,0	3,2	0,5	2,9	0,5	1,4	1,9
С 250	250	60	20	2,0	3,0	Прушиньски	6,2	7,82	675,45	33,15	54,25	7,32	9,29	2,06	1,42
						CFSteel	6,3	7,75	675,68	33,95	54,06	7,48	9,34	2,09	1,46
						%	1,6	0,9	0,0	2,4	0,4	2,2	0,5	1,5	2,8
				2,5	3,75	Прушиньски	7,68	9,69	828,41	39,87	66,54	8,81	9,25	2,03	1,42
						CFSteel	7,77	9,63	832,23	41,02	66,59	9,04	9,3	2,06	1,46
						%	1,2	0,6	0,5	2,9	0,1	2,6	0,5	1,5	2,8
				3,0	4,5	Прушиньски	9,13	11,51	975,12	45,99	78,32	10,16	9,2	2	1,42
						CFSteel	9,22	11,48	982,43	47,48	78,61	10,45	9,25	2,03	1,46
						%	1,0	0,3	0,7	3,2	0,4	2,9	0,5	1,5	2,8
С 300	300	60	20	2,0	3,0	Прушиньски	6,99	8,81	1049,37	34,69	70,31	7,42	10,91	1,98	1,28

Сечение

					CFSteel	7,09	8,73	1052,03	35,56	70,14	7,58	10,98	2,02	1,31
					%	1,4	0,9	0,3	2,5	0,2	2,2	0,6	2,0	2,3
			2,5	3,75	Прушиньски	8,66	10,92	1289,22	41,72	86,38	8,93	10,86	1,95	1,28
					CFSteel	8,77	10,86	1297,98	42,97	86,54	9,16	10,93	1,99	1,31
					%	1,3	0,5	0,7	3,0	0,2	2,6	0,6	2,1	2,3
			3,0	4,5	Прушиньски	10,3	13	1520,19	48,13	101,85	10,3	10,82	1,92	1,28
					CFSteel	10,4	12,96	1534,92	49,73	102,34	10,6	10,89	1,96	1,31
					%	1,0	0,3	1,0	3,3	0,5	2,9	0,6	2,1	2,3

Таблица 1.1.4 - Сигма-образные профили. Сопоставление результатов, полученных в CFSteel, с данными, приведёнными в каталоге компании Прушиньски [29]

Профиль	$t_{\text{ном}}$ , мм	Источник	Характеристики полного сечения						
			A, см <sup>2</sup>	$I_x$ , см <sup>4</sup>	$W_x$ , см <sup>3</sup>	$i_x$ , см	$I_y$ , см <sup>4</sup>	$W_y$ , см <sup>3</sup>	$i_y$ , см
Σ 140	2,0	Прушиньски	6,29	181,09	26,06	5,37	31,88	12,23	2,25
		CFSteel	6,2	185,11	26,45	5,47	31,43	12,19	2,25
		%	1,4	2,2	1,5	1,9	1,4	0,3	0,0
	2,5	Прушиньски	7,81	223	32,09	5,34	38,8	14,85	2,23
		CFSteel	7,72	228,41	32,64	5,44	38,29	14,83	2,23
		%	1,2	2,4	1,7	1,9	1,3	0,1	0,0
	3,0	Прушиньски	9,31	263,6	37,93	5,32	45,31	17,3	2,21
		CFSteel	9,21	270,15	38,6	5,42	44,7	17,28	2,2
		%	1,1	2,5	1,8	1,9	1,3	0,1	0,5
	3,2	Прушиньски	9,9	279,48	40,21	5,31	47,81	18,23	2,2
		CFSteel	9,8	286,42	40,93	5,41	47,14	18,22	2,19
		%	1,0	2,5	1,8	1,9	1,4	0,1	0,5
Σ 170	2,0	Прушиньски	6,89	288,47	34,14	6,47	32,13	12,33	2,16
		CFSteel	6,79	292,58	34,43	6,57	31,43	12,18	2,15
		%	1,5	1,4	0,8	1,5	2,2	1,2	0,5
	2,5	Прушиньски	8,56	355,89	42,12	6,45	39,11	14,96	2,14
		CFSteel	8,45	361,67	42,56	6,54	38,29	14,81	2,13
		%	1,3	1,6	1,0	1,4	2,1	1,0	0,5
	3,0	Прушиньски	10,21	421,47	49,88	6,42	45,69	17,42	2,11
		CFSteel	10,1	428,56	50,43	6,51	44,71	17,25	2,1
		%	1,1	1,7	1,1	1,4	2,1	1,0	0,5
	3,2	Прушиньски	10,87	447,2	52,92	6,41	48,21	18,36	2,11
		CFSteel	10,75	454,7	53,51	6,5	47,16	18,18	2,09
		%	1,1	1,7	1,1	1,4	2,2	1,0	0,9
Σ 200	2,0	Прушиньски	7,49	426,98	42,91	7,55	32,33	12,41	2,08
		CFSteel	7,37	430,58	43,07	7,64	31,44	12,17	2,07
		%	1,6	0,8	0,4	1,2	2,8	1,9	0,5
	2,5	Прушиньски	9,32	527,46	53,01	7,52	39,35	15,05	2,06
		CFSteel	9,19	532,98	53,31	7,61	38,3	14,79	2,04
		%	1,4	1,0	0,6	1,2	2,7	1,7	1,0
	3,0	Прушиньски	11,12	625,49	62,86	7,5	45,98	17,52	2,03
		CFSteel	10,99	632,41	63,25	7,59	44,72	17,22	2,02
		%	1,2	1,1	0,6	1,2	2,7	1,7	0,5
	3,2	Прушиньски	11,83	664,02	66,74	7,49	48,52	18,46	2,02
		CFSteel	11,7	671,36	67,15	7,58	47,17	18,15	2,01
		%	1,1	1,1	0,6	1,2	2,8	1,7	0,5
Σ 230	2,0	Прушиньски	8,06	592,03	51,93	8,57	32,14	12,36	2
		CFSteel	7,96	601,76	52,34	8,69	31,44	12,17	1,99
		%	1,2	1,6	0,8	1,4	2,2	1,5	0,5
	2,5	Прушиньски	10,03	732,06	64,22	8,54	39,12	14,98	1,97

Сечение

		CFSteel	9,93	745,65	64,85	8,67	38,3	14,78	1,96	
		%	1,0	1,9	1,0	1,5	2,1	1,3	0,5	
		Прушиньски	11,98	868,94	76,22	8,52	45,71	17,43	1,95	
	3,0	CFSteel	11,88	885,7	77,03	8,64	44,73	17,2	1,94	
		%	0,8	1,9	1,1	1,4	2,1	1,3	0,5	
		Прушиньски	12,75	922,82	80,95	8,51	48,23	18,36	1,95	
	3,2	CFSteel	12,65	940,65	81,81	8,63	47,18	18,12	1,93	
		%	0,8	1,9	1,1	1,4	2,2	1,3	1,0	
		Прушиньски	8,67	799,61	61,99	9,61	32,28	12,41	1,93	
Σ 260	2,0	CFSteel	8,55	808,76	62,22	9,73	31,44	12,17	1,92	
		%	1,4	1,1	0,4	1,2	2,6	1,9	0,5	
		Прушиньски	10,78	989,52	76,71	9,58	39,3	15,04	1,91	
	2,5	CFSteel	10,67	1003	77,17	9,7	38,31	14,77	1,9	
		%	1,0	1,4	0,6	1,3	2,5	1,8	0,5	
		Прушиньски	12,88	1175,49	91,12	9,55	45,91	17,5	1,89	
	3,0	CFSteel	12,76	1192,43	91,74	9,67	44,74	17,18	1,87	
		%	0,9	1,4	0,7	1,3	2,5	1,8	1,1	
		Прушиньски	13,71	1248,79	96,81	9,54	48,45	18,43	1,88	
	3,2	CFSteel	13,59	1266,85	97,47	9,65	47,18	18,1	1,86	
		%	0,9	1,4	0,7	1,2	2,6	1,8	1,1	
		Прушиньски	9,47	1137,96	76,37	10,96	32,44	12,47	1,85	
	Σ 300	2,0	CFSteel	9,33	1145,06	76,35	11,08	31,44	12,16	1,84
			%	1,5	0,6	0,0	1,1	3,1	2,5	0,5
			Прушиньски	11,78	1409,44	94,59	10,94	39,5	15,11	1,83
		2,5	CFSteel	11,65	1421,4	94,77	11,05	38,31	14,76	1,81
			%	1,1	0,8	0,2	1,0	3,0	2,3	1,1
			Прушиньски	14,08	1675,78	112,47	10,91	46,15	17,57	1,81
3,0		CFSteel	13,95	1691,43	112,78	11,01	44,75	17,16	1,79	
		%	0,9	0,9	0,3	0,9	3,0	2,3	1,1	
		Прушиньски	14,99	1780,88	119,52	10,9	48,7	18,51	1,8	
3,2		CFSteel	14,86	1797,68	119,86	11	47,2	18,07	1,78	
		%	0,9	0,9	0,3	0,9	3,1	2,4	1,1	
		Прушиньски	10,47	1668,95	95,92	12,63	32,61	12,54	1,76	
Σ 350	2,0	CFSteel	10,31	1671,17	95,51	12,73	31,45	12,16	1,75	
		%	1,5	0,1	0,4	0,8	3,6	3,0	0,6	
		Прушиньски	13,04	2068,84	118,9	12,6	39,7	15,18	1,75	
	2,5	CFSteel	12,88	2076,41	118,67	12,7	38,32	14,75	1,73	
		%	1,2	0,4	0,2	0,8	3,5	2,8	1,1	
		Прушиньски	15,58	2461,86	141,49	12,57	46,39	17,65	1,73	
	3,0	CFSteel	15,43	2473,19	141,34	12,66	44,76	17,14	1,7	
		%	1,0	0,5	0,1	0,7	3,5	2,9	1,7	
		Прушиньски	16,6	2517,16	150,41	12,56	48,95	18,58	1,72	
	3,2	CFSteel	16,44	2629,54	150,28	12,65	47,23	18,05	1,7	
		%	1,0	4,5	0,1	0,7	3,5	2,9	1,2	

В Таблице 1.1.5 представлено сравнение геометрических характеристик С-образных сечений, приведённых в Руководстве по проектированию и монтажу компании BlueScore Steel Limited: LYSAGHT Zeds and Ceels [27], с результатами расчёта в программе CFSteel. Расчётная толщина  $t = t_{ном}$ .

Сечение

Таблица 1.1.5 - С-образные профили. Сопоставление результатов, полученных в CFSteel, с данными, приведёнными в Руководстве по проектированию и монтажу компании BlueScore Steel Limited: LYSAGHT Zeds and Cees [27]

Профиль	t, мм	Источник, расхождение в %	Характеристики полного сечения								
			A, см <sup>2</sup>	I <sub>x</sub> , см <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> , см <sup>3</sup>	i <sub>x</sub> , см	I <sub>y</sub> , см <sup>4</sup>	W <sub>y</sub> , см <sup>3</sup>	i <sub>y</sub> , см	z <sub>0</sub> , см	Центр изгиба x <sub>c</sub> , см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
C10010	1	Lysaght	2,16	36,4	7,13	4,11	7,55	2,19	1,87	1,66	-3,99
		CFSteel	2,16	36,4	7,13	4,11	7,55	2,19	1,87	1,66	-4,02
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C10012	1,2	Lysaght	2,58	43,2	8,48	4,1	8,92	2,59	1,86	1,66	-3,97
		CFSteel	2,58	43,2	8,48	4,1	8,92	2,59	1,86	1,66	-4,00
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
C10015	1,5	Lysaght	3,23	53,7	10,5	4,08	11,2	3,29	1,87	1,69	-4,01
		CFSteel	3,23	53,7	10,5	4,08	11,2	3,29	1,87	1,69	-4,04
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
C10019	1,9	Lysaght	4,09	67,3	13,2	4,06	14,2	4,21	1,87	1,72	-4,04
		CFSteel	4,09	67,3	13,2	4,06	14,2	4,21	1,87	1,72	-4,06
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
C15012	1,2	Lysaght	3,54	129	17	6,04	18,8	4,17	2,31	1,89	-4,65
		CFSteel	3,54	129	17	6,04	18,8	4,17	2,31	1,89	-4,68
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C15015	1,5	Lysaght	4,43	161	21,1	6,02	23,7	5,29	2,31	1,92	-4,69
		CFSteel	4,43	161	21,1	6,02	23,7	5,28	2,31	1,92	-4,72
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
C15019	1,9	Lysaght	5,61	202	26,6	6	30	6,74	2,31	1,95	-4,71
		CFSteel	5,61	202	26,6	6	30	6,74	2,31	1,95	-4,74
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C15024	2,4	Lysaght	7,12	254	33,5	5,98	38,6	8,79	2,33	2,01	-4,8
		CFSteel	7,12	254	33,5	5,98	38,6	8,78	2,33	2,01	-4,8
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
C20015	1,5	Lysaght	5,55	353	34,7	7,97	39,6	7,17	2,67	2,07	-5,16
		CFSteel	5,55	352	34,7	7,97	39,6	7,17	2,67	2,07	-5,20
		%	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C20019	1,9	Lysaght	7,13	451	44,4	7,96	53,1	9,77	2,73	2,18	-5,36
		CFSteel	7,13	451	44,4	7,96	53	9,77	2,73	2,17	-5,39
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,5
C20024	2,4	Lysaght	9,04	569	56	7,93	68,1	12,7	2,74	2,24	-5,44
		CFSteel	9,04	569	56	7,93	68	12,7	2,74	2,23	-5,47
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,4
C25019	1,9	Lysaght	8,08	762	60	9,71	56,1	9,86	2,64	1,91	-4,85
		CFSteel	8,08	762	60	9,71	56,1	9,86	2,64	1,91	-4,89
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C25024	2,4	Lysaght	10,2	962	75,7	9,69	72,1	12,8	2,65	1,96	-4,93
		CFSteel	10,2	962	75,7	9,69	72,1	12,8	2,65	1,97	-4,96
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5
C30024	2,4	Lysaght	12,6	1700	113	11,6	151	21,7	3,46	2,62	-6,6
		CFSteel	12,6	1698	113	11,6	151	21,7	3,46	2,63	-6,6
		%	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
C30030	3	Lysaght	16	2130	142	11,6	196	28,5	3,5	2,63	-6,79
		CFSteel	16	2133	142	11,6	196	28,5	3,5	2,73	-6,82
		%	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,8

## 1.2. Вычисление геометрических характеристик эффективного сечения

### 1.2.1. Вычисление геометрических характеристик эффективного сечения С-образного профиля в соответствии с СП 260.1325800.2016

**Задание:** В программе CFSteel выполнить расчёт геометрических характеристик полного и эффективного сечения С-образного профиля из Example N Worked Examples According to EN 1993-1-3 Eurocode 3, Part 1.3 / ECCS TC 7, № 123, 2008.- 235 p. [10]. В данном Примере характеристики эффективного сечения вычислены для двух случаев напряжённо-деформированного состояния сечения: а) равномерное сжатие; б) изгиб относительно центральной оси, параллельной стенке. Расчёт выполнить в соответствии с СП 260.1325800.2016 [1].

Размеры сечения:  $h = 102 \text{ мм}$ ,  $t = 2 \text{ мм}$ ,  $b = 120 \text{ мм}$ ,  $c = 26 \text{ мм}$ ,  $r = 10 \text{ мм}$  (внутренний).

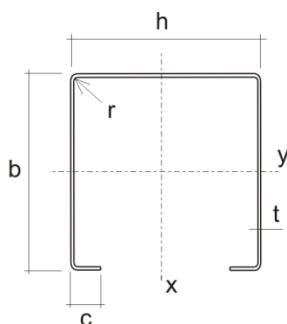


Рисунок 1.2.1 – Поперечное сечение

В Примере N сталь в соответствии с EC3:  $E = 210000 \text{ Н/мм}^2$ ,  $f_y = 355 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\gamma_{M0} = 1,0$ . Сталь без покрытия.

В соответствии с СП 260:  $E = 206000 \text{ Н/мм}^2$ ,  $R_{yk} = 355 \text{ Н/мм}^2$ , коэффициент надёжности по материалу  $\gamma_m = 1,05$  (п. 6.1 [1]). Тогда  $R_y = 355/1,05 = 338,1 \text{ Н/мм}^2$ .

Площадь эффективного сечения  $A_{ef}$  при равномерном сжатии  $\sigma_{com} = R_y = const$

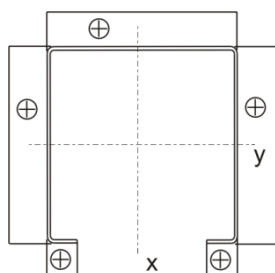


Рисунок 1.2.2 - Распределение напряжений (+ сжатие)

Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel



Сечение

Таблица 1.2.1 – Геометрические характеристики полного сечения (с учётом радиусов закругления)

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Значение [10]	Значение CFSteel	Расхождение, %
Площадь сечения	$A_g$	см <sup>2</sup>	7,34	7,34	0
Расстояние от срединной линии стенки до центра тяжести	$x_S$	мм	50,96	50,96	0
Расстояние от отгибов до центра тяжести	$x_{S'}$	мм	67,04	67,04	0
Момент инерции	$I_x$	см <sup>4</sup>	139,10	139,16	0,04
Момент инерции	$I_y$	см <sup>4</sup>	140,45	140,53	0,06
Момент сопротивления сечения	$W_{y lip}$	см <sup>3</sup>	20,64	20,66	0,01
Радиус инерции	$i_x$	мм	43,53	43,54	0,02
	$i_y$	мм	43,74	43,75	0,02
Расстояние от центра тяжести до центра изгиба	$x_0$	мм	-115,31	-115,73	0,4
Момент инерции при кручении (без учёта радиусов закругления)	$I_t$	см <sup>4</sup>	0,103	0,103	0
Секториальный момент инерции (без учёта радиусов закругления)	$I_w$	см <sup>6</sup>	4728,07	4728,07	0

Таблица 1.2.2 – Параметры стенки

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) СП 260	Значение	Значение CFSteel	Расхождение, %
Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_p$		(7.18)	0,997	0,997	0
Коэффициент редуцирования	$\rho$		(7.13)	0,782	0,782	0
Эффективная часть	$h_{ef}$	мм	Таблица 7.2	73,16	73,15	0,01
	$h_{e1}$	мм		36,58	36,57	0,03
	$h_{e2}$	мм		36,58	36,57	0,03

В таблице 1.2.3 приведено сравнение значений параметров эффективности стенки, полученных по СП 260, с соответствующими значениями Примера Н [10], полученными по ЕС3. В Примере Н в соответствии с нормами ЕС3 принималось:  $E=210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ , частный коэффициент  $\gamma_{M0}=1,0$ . Результаты сравнения приведены в столбце 6 Таблицы. Расхождение составляет 1,2...1,5%. Также были выполнены расчёты по методике СП 260, но исходные данные принимались как в Примере Н [10]:  $E=210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{ym} = f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ ,  $\gamma_m = \gamma_{M0}=1,0$ . Расчёт выполнен в программе CFSteel. Сравнение результатов, полученных таким образом, с данными Примера Н [10] приведено в столбцах 7 и 8. Отмечается практическое совпадение результатов. Это говорит о том, что методика определения эффективных ширин пластинки в СП 260 в целом совпадает с методикой, заложенной в нормах ЕС3. Различие заключается в разных значениях модуля упругости  $E$  и коэффициентов: частного коэффициента  $\gamma_{M0}$  и коэффициента надёжности по материалу  $\gamma_m$ .

Таблица 1.2.3 – Параметры стенки. Сравнение результатов по СП 260 и ЕС3

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Значение по [10] (ЕС3)	Значение по СП 260 (CFSteel)	Расхождение, %	Значение по СП 260* (CFSteel)	Расхождение, %
1	2	3	4	5	6	7	8
Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_p$		1,012	0,997	1,5	1,012	0
Коэффициент редуцирования	$\rho$		0,773	0,782	1,2	0,774	0,1
Эффективная часть	$h_{ef}$	мм	72,3	73,16	1,2	72,37	0,1
	$h_{e1}$	мм	36,15	36,58	1,2	36,19	0,1
	$h_{e2}$	мм	36,15	36,58	1,2	36,19	0,1

Сечение

\* - Результаты получены по СП 260 но с  $E=210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{yn} = f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ ,  $\gamma_m = \gamma_{M0} = 1,0$

Таблица 1.2.4 – Параметры пояса и отгиба ( $K = \infty$ ,  $\sigma_{com} = R_y$ )

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) СП 260	Значение	Значение CFSteel	Расхождение, %
<b>Пояс</b>						
Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_p$		(7.18)	1,189	1,188	0
Коэффициент редуцирования	$\rho$		(7.13)	0,686	0,685	0
Эффективная ширина	$b_{ef}$	мм	Табл. 7.2	76,41	76,49	0,1
	$b_{e1}$	мм		38,21	38,25	0,1
	$b_{e2}$	мм		38,21	38,25	0,1
<b>Отгиб</b>						
Коэффициент потери устойчивости	$k\sigma$		7.3.2.6	0,5	0,5	0
Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_p$		(7.18)	0,656	0,656	0
Коэффициент редуцирования	$\rho$		(7.15)	1	1	0
Эффективная ширина	$c_{ef}$	мм	Табл. 7.2	21,78	21,78	0

В таблице 1.2.5 приведено сравнение значений параметров эффективности пояса и отгиба, полученных по СП 260, с соответствующими значениями Примера Н [10], полученными по ЕС3. В Примере Н в соответствии с нормам ЕС3 принималось:  $E=210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ , частный коэффициент  $\gamma_{M0} = 1,0$ . Результаты сравнения приведены в столбце 6. Расхождение составляет 1,2...1,5%. В столбцах 7 и 8 приведены результаты вычислений по методике СП 260, но исходные данные принимались как в Примере Н [10], т.е.:  $E=210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{yn} = f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ ,  $\gamma_m = \gamma_{M0} = 1,0$ . Расчёт выполнен в CFSteel. Отмечается совпадение результатов.

Таблица 1.2.5 – Параметры пояса и отгиба . Сравнение результатов по СП 260 и ЕС3

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Значение по [9] (ЕС3)	Значение по СП 260 (CFSteel)	Расхождение, %	Значение по СП 260* (CFSteel)	Расхождение*, %
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Пояс</b>							
Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_p$		1,206	1,188	1,5	1,206	0
Коэффициент редуцирования	$\rho$		0,678	0,685	1,0	0,678	0
Эффективная ширина	$b_{ef}$	мм	75,6	76,49	1,2	75,6	0
	$b_{e1}$	мм	37,8	38,25	1,2	37,8	0
	$b_{e2}$	мм	37,8	38,25	1,2	37,8	0
<b>Отгиб</b>							
Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_p$		0,666	0,656	1,5	0,666	0
Коэффициент редуцирования	$\rho$		1	1	0	1	0
Эффективная ширина	$c_{ef}$	мм	21,78	21,78	0	21,78	0

\* - Результаты получены по СП 260 но с  $E=210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{yn} = f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ ,  $\gamma_m = \gamma_{M0} = 1,0$

Таблица 1.2.6 – Эффективные характеристики краевого элемента жёсткости

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) СП 260	Значение	Значение CFSteel	Расхождение, %
<b>Эффективные характеристики краевого элемента жёсткости</b>						
Площадь	$A_S$	мм <sup>2</sup>		123,4	123,5	0,1
Расстояние между срединной линией пояса и осью	$e_S$	мм		5,20	5,20	0

*Сечение*

элемента жёсткости						
Расстояние между срединной линией стенки и осью элемента жёсткости	$b_I$	мм		104,04	103,94	0,1
Эффективный момент инерции	$I_S$	мм <sup>4</sup>		7157	7159	0,03
<b>Жёсткость связи</b>						
Жёсткость связи	$K$	Н/мм <sup>2</sup>	(7.29)	0,165	0,165	0
Критическое напряжение потери устойчивости краевого отгиба	$\sigma_{cr,s}$	Н/мм <sup>2</sup>	(7.28)	252,5	252,7	0,08
Гибкость	$\bar{\lambda}_d$		7.3.2.9	1,157	1,157	0
Коэффициент снижения несущей способности	$\chi_d$		7.3.2.9	0,633	0,634	0,15

Поскольку результаты, полученные с помощью программы на предыдущем шаге, практически совпадают с результатами ручного расчёта, приводим итерационное уточнение, выполненное по программе (Таблица 1.2.7). Итерации заканчиваются при разнице в значениях  $\chi_{di}$  и  $\chi_{d(i-1)}$ , не превышающей 0,1%.

Таблица 1.2.7 – Итерационный процесс уточнения эффективных параметров элемента жёсткости

Параметр		Ед. изм.	Нач. расчёт	Первая итерация			Вторая итерация			Третья итерация			
				CFSteel	[9]	CFSteel *	CFSteel	[9]	CFSteel *	CFSteel	CFSteel *	CFSteel (EC3)	
Элемент	Коэффициент снижения несущей способности	$\chi_{d,n-1}$	1,0	0,634	0,617	0,623	0,612	0,596	0,600	0,612	0,598	0,598	
Пояс $\psi=1$ $k_\sigma=4$	Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_{pi}$	1,188	0,946	0,947	0,952	0,930	0,931	0,934	0,934	0,933	0,933	
	Коэффициент редуцирования	$\rho$	0,685	0,811	0,811	0,808	0,821	0,820	0,818	0,822	0,819	0,819	
	Эффективная ширина	$b_{e2c}$	мм	41,47	48,47	48,46	49,28	49,01	48,96	48,86	49,04	48,90	48,90
Отгиб $\psi=1$ $k_\sigma=0,5$	Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_{pi}$	0,656	0,522	0,523	0,525	0,514	0,514	0,516	0,513	0,515	0,515	
	Коэффициент редуцирования	$\rho$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
	Эффективная ширина	$c_{efc}$	мм	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Элемент жёсткости	Эффективная площадь	$A_s$	мм <sup>2</sup>	123,5	137,50	137,48	137,12	138,57	138,48	138,28	138,65	138,37	138,36
	Расстояние	$b_I$	мм	103,94	100,79	100,80	100,87	100,54	100,57	100,61	100,52	100,59	100,59
	Момент инерции	$I_S$	мм <sup>4</sup>	7159	7503,7	7330,0	7495,4	7527,3	7352,0	7520,9	7528,98	7522,80	7522,80
	Жёсткость связи	$K_I$	Н/мм <sup>2</sup>	0,165	0,177	0,181	0,180	0,178	0,182	0,181	0,178	0,181	0,181
	Критическое напряжение потери устойчивости краевого отгиба	$\sigma_{cr,s}$	Н/мм <sup>2</sup>	252,7	240,33	242,82	245,26	239,48	242,17	244,32	239,42	244,25	244,25
	Коэффициент снижения	$\chi_{d,n}$		0,634	0,612	0,596	0,600	0,611	0,595	0,598	0,611	0,598	0,598
	Редуцированная площадь	$A_{s,red}$	мм <sup>2</sup>								84,69	82,79	82,79

\* - Результаты получены по СП 260 но с  $E=210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{ym} = f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ ,  $\gamma_m = \gamma_{M0} = 1,0$

Эффективные размеры элемента жёсткости (результат итерационного процесса) представлены в Таблице 1.2.8.

Сечение

Таблица 1.2.8 - Эффективные размеры сечения

Элемент	Параметр	Ед. изм.	СП 260	Значение [10]	CFSteel*	CFSteel** (EC3)
Пояс	$b_{e1,c}$	мм	41,47	41,02	41,03	41,03
	$b_{e2,c}$	мм	49,04	48,96	48,90	48,90
Стенка	$h_{e1,c} = h_{e2,c}$	мм	39,79	39,37	39,41	39,41
Отгиб	$c_{eff,c}$	мм	25,00	25,00	25,00	25,00
Редуцированная толщина элемента жёсткости	$t_{red}$	мм	1,222	1,190	1,197	1,197

\* - Результаты получены по CFSteel (СП 260) но с  $E=210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{yn} = f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ ,  $\gamma_m = \gamma_{M0} = 1,0$

\*\* -В последнем столбце Таблицы 1.2.8 приведены данные, полученные в CFSteel для норм EC3

Размеры и геометрические характеристики эффективного сечения представлены на Рисунке 1.2.3 и в Таблице 1.2.9.

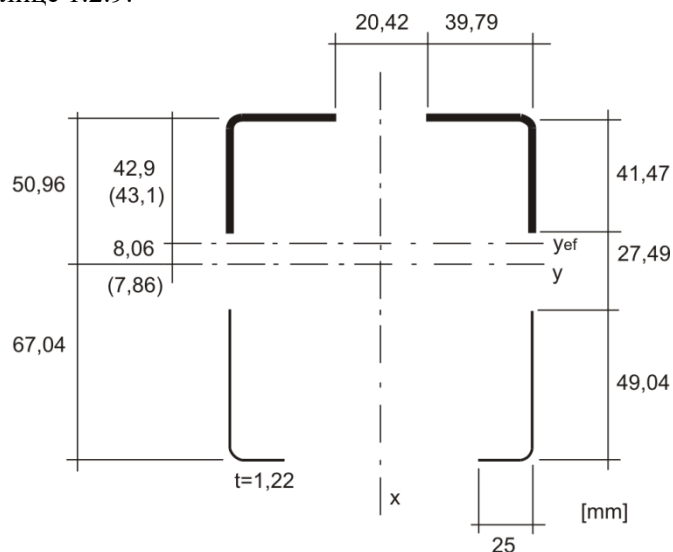


Рисунок 1.2.3 – Размеры эффективного сечения (сжатие); значения в скобках – результат CFSteel

Таблица 1.2.9 – Геометрические характеристики эффективного сечения

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Значение	Значение CFSteel (СП 260)	Расхождение, %	Значение по [10] (EC3)	Значение CFSteel*
Площадь	$A_{ef}$	см <sup>2</sup>	4,752	4,756	0,08	4,67	4,68
Расстояние от срединной линии стенки до центра тяжести эффективного сечения	$x_{Sef}$	см	4,29	4,311	0,5	-	
Момент инерции относительно оси X	$I_{xef}$	см <sup>4</sup>	88,693	88,73	0,05	87,24	87,46
Момент сопротивления сечения относительно оси X	$W_{xef}$	см <sup>3</sup>	17,39	17,40	0,06	-	17,15
Радиус инерции относительно оси X	$i_x$	см	4,32	4,320	0	-	4,32
Момент инерции относительно оси Y	$I_{yef}$	см <sup>4</sup>	96,704	96,765	0,06	94,80	95,22
Момент сопротивления сечения относительно оси Y (стенка)	$W_{ywef}$	см <sup>3</sup>	22,028	21,94	0,4	-	21,73
Момент сопротивления сечения относительно оси Y (отгиб)	$W_{ylef}$	см <sup>3</sup>	12,775	12,82	0,4	-	12,56
Радиус инерции относительно оси Y	$i_y$	см	4,51	4,511	0	-	4,51
Расстояние от наружной грани стенки до центра тяжести	$z_{0ef}$	мм	43,9	44,1	0,5	43,72	43,82

\* - Результаты получены по СП 260 но с  $E=210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{yn} = f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ ,  $\gamma_m = \gamma_{M0} = 1,0$

## Сечение

Определение геометрических характеристик эффективного сечения при изгибе относительно оси  $y$  -  $y$  (отгибы сжаты)

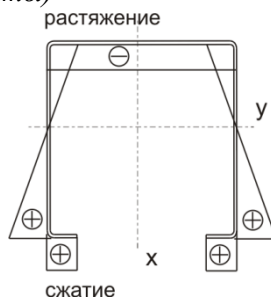


Рисунок 1.2 4 - Распределение напряжений (изгиб)

Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel

(Обозначение эффективных участков пояса  $b_{e1}$  и  $b_{e2}$  соответствует принятому в Таблице 7.2 [1])

Таблица 1.2.10 – Эффективные размеры

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула а) СП 260	Значение	Значение CFSteel	Расхождение, %
<b>Пояс</b>						
Отношение напряжений	$\psi$		Таб.7.2	-0,748	-0,748	0
Коэффициент устойчивости	$k_\sigma$		Таб.7.2	17,98	17,99	0
Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_p$		(7.18)	0,561	0,560	0,2
Эффективная ширина	$b_{ef}$	мм	Таб.7.2	63,82	63,81	0
	$b_{e1}$	мм		25,53	25,53	0
	$b_{e2}$	мм		38,29	38,29	0

Таблица 1.2.11 – Эффективные характеристики краевого элемента жёсткости

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) СП 260	Значение	Значение CFSteel	Расхождение, %
<b>Эффективные характеристики краевого элемента жёсткости</b>						
Площадь	$A_s$	мм <sup>2</sup>		98,04	98,05	0
Расстояние между срединной линией пояса и осью элемента жёсткости	$e_s$	мм		6,55	6,55	0
Расстояние между срединной линией стенки и осью элемента жёсткости	$b_l$	мм		109,39	109,40	0
Эффективный момент инерции	$I_s$	мм <sup>4</sup>		6286	6284	0,03
<b>Жёсткость связи и характеристики редуцирования краевого элемента жёсткости</b>						
Жёсткость связи	$K$	Н/мм <sup>2</sup>	(7.29)	0,146	0,146	0
Критическое напряжение потери устойчивости краевого отгиба	$\sigma_{cr,s}$	Н/мм <sup>2</sup>	(7.28)	280,49	280,26	0,08
Гибкость	$\bar{\lambda}_d$		7.3.2.9	1,098	1,098	0
Коэффициент снижения несущей способности	$\chi_d$		7.3.2.9	0,676	0,676	0

Уточнение производится итерационным расчётом в соответствии с Приложением Б [1] повторяя предыдущий этап. Итерации заканчиваются при разнице в значениях  $\chi_{di}$  и  $\chi_{d(i-1)}$ , не превышающей 0,1%. Результаты вычислений и результаты, полученные в CFSteel, приведены в Таблице 1.2.12

Таблица 1.2.12 – Итерационный процесс уточнения эффективных параметров элемента жёсткости

Параметр		Ед. изм.	Нач. расчёт	Первая итерация		
				Ручной расчёт	CFSteel	
Элемент	Коэффициент снижения несущей способности	$\chi_{d,n-1}$		1,0	0,676	0,617
Пояс	Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_{pl}$		0,561		0,461
	Коэффициент редуцирования	$\rho$		1	1	1
	Эффективная ширина	$b_{e2c}$ (Рис.Б.2 [1])	мм	28,75	28,75	28,75
Отгиб	Эффективная ширина	$c_{efc}$	мм	25,00	25,00	25,00
Элемент жёсткости	Эффективная площадь	$A_s$	мм <sup>2</sup>	98,04	98,04	98,05
	Расстояние	$b_I$	мм	109,39	109,39	109,40
	Момент инерции	$I_s$	мм <sup>4</sup>	6286	6286	6284
	Жёсткость связи	$K_I$	Н/ мм <sup>2</sup>	0,146	0,146	0,146
	Критическое напряжение потери устойчивости	$\sigma_{cr,s}$	Н/ мм <sup>2</sup>	280,49	280,49	280,26
	Коэффициент снижения	$\chi_{d,n}$		0,676	0,676	0,676
	Редуцированная площадь	$A_{s,red}$	мм <sup>2</sup>		80,0	81,0

Геометрические характеристики эффективного сечения приведены в Таблице 1.2.13.

Таблица 1.2.13 – Геометрические характеристики эффективного сечения

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Значение	Значение CFSteel	Расхождение, %	Значение [10]	Значение CFSteel*	Расхождение, %
Площадь сечения	$A_{ef}$	см <sup>2</sup>	6,978	6,964	0,2	6,86	6,86	0
Расстояние между срединной линией стенки и центром тяжести сечения	$X_{Sef}$	см	4,791	4,78	0,2	-	-	-
Момент инерции относительно оси X	$I_{xef}$	см <sup>4</sup>	132,081	131,776	0,2	129,73	129,777	0,04
Момент инерции относительно оси Y	$I_{yef}$	см <sup>4</sup>	127,167	126,579	0,5	122,49	122,544	0,04
Момент сопротивления сечения относительно оси Y (стенка)	$W_{ywef}$	см <sup>3</sup>	26,006	25,994	0,04	25,59	25,599	0,04
Момент сопротивления сечения относительно оси Y (отгибы)	$W_{ylef}$	см <sup>3</sup>	17,929	17,824	0,6	17,04	17,047	0,04

\* - Результаты получены по CFSteel (методика СП 260) но с  $E=210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_y = f_y = 355 \text{ N/mm}^2$  и  $\gamma_m = \gamma_{m0} = 1,0$

*Определение геометрических характеристик эффективного сечения при изгибе относительно оси y - y (стенка сжата)*

*Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel*

Сечение

Таблица 1.2.14 – Параметры стенки

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) СП 260	Значение	Значение CFSteel	Расхождение, %
Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_p$		(7.18)	0,997	0,997	0
Коэффициент редуцирования	$\rho$		(7.13)	0,782	0,782	0
Эффективная часть	$h_{ef}$	мм	Таблица 7.2	73,16	73,15	0,01
	$h_{e1}$	мм		36,58	36,57	0,03
	$h_{e2}$	мм		36,58	39,57	0,03

Геометрические характеристики эффективного сечения приведены в Таблице 1.2.15.

Таблица 1.2.15 – Геометрические характеристики эффективного сечения

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Значение	Значение CFSteel	Расхождение, %
Площадь сечения	$A_{ef}$	см <sup>2</sup>	6,934	6,934	0
Расстояние между срединной линией стенки и центром тяжести сечения	$X_{Sef}$	см	5,396	5,396	0
Момент инерции относительно оси Y	$I_{yef}$	см <sup>4</sup>	129,296	129,306	0
Радиус инерции относительно оси Y	$i_{yef}$	см	4,318	4,318	0
Момент сопротивления сечения относительно оси Y (стенка)	$W_{ywef}$	см <sup>3</sup>	23,525	23,526	0
Момент сопротивления сечения относительно оси Y (отгибы)	$W_{ylef}$	см <sup>3</sup>	19,879	19,882	0,02

На Рисунках 1.2.5 – 1.2.8 представлены результаты вычислений в программе CFSteel.

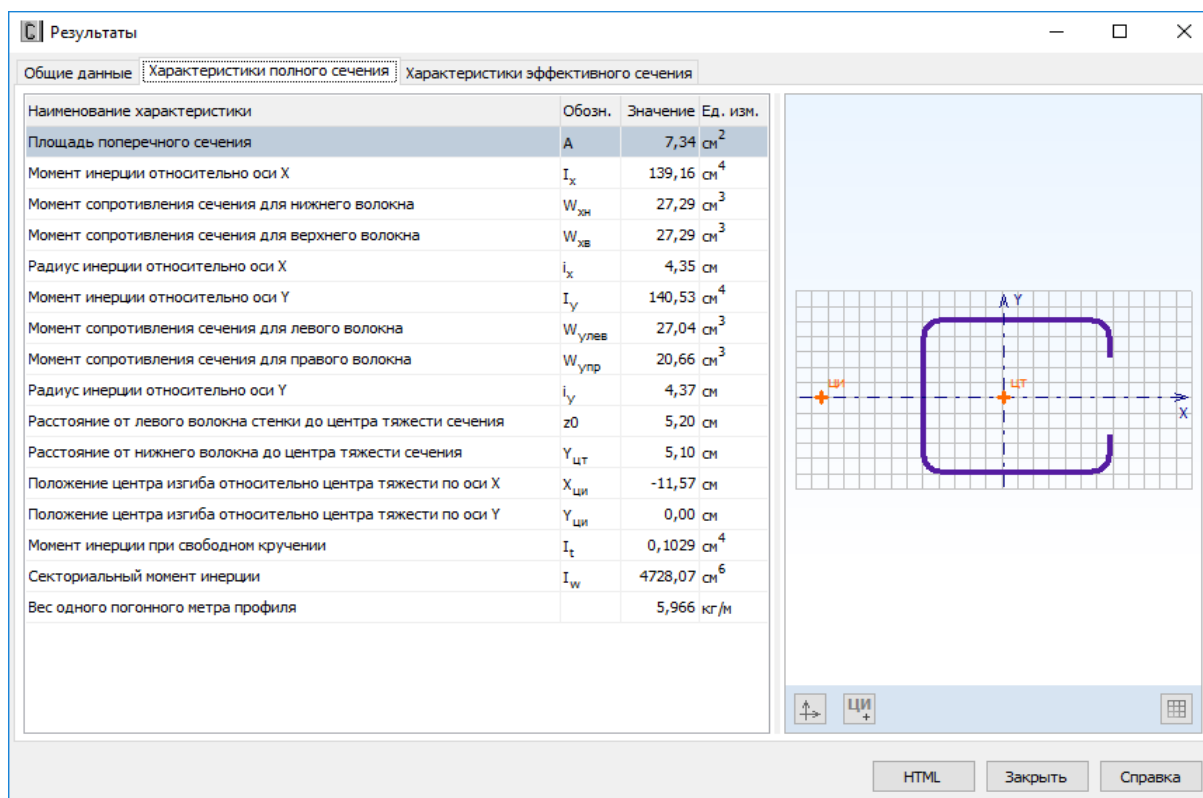


Рисунок 1.2.5 – Результаты расчёта. Характеристики полного сечения

## Сечение

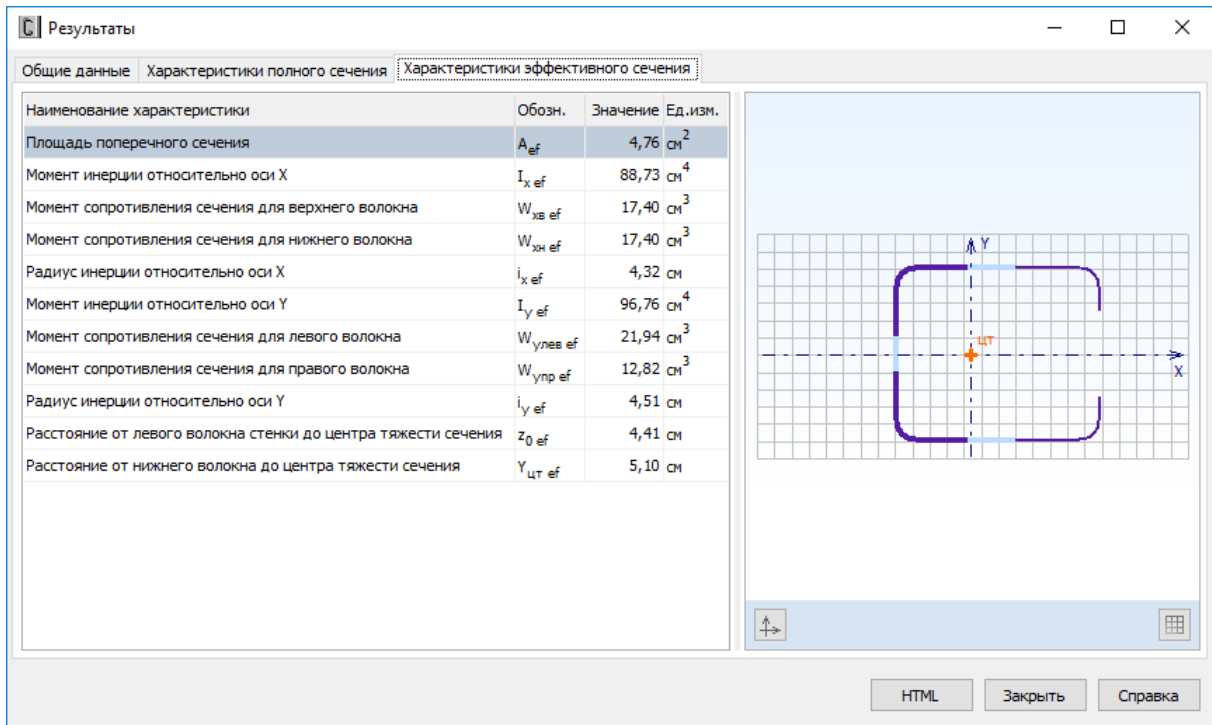


Рисунок 1.2.6 – Результаты расчёта. *Характеристики эффективного сечения (сжатие)*

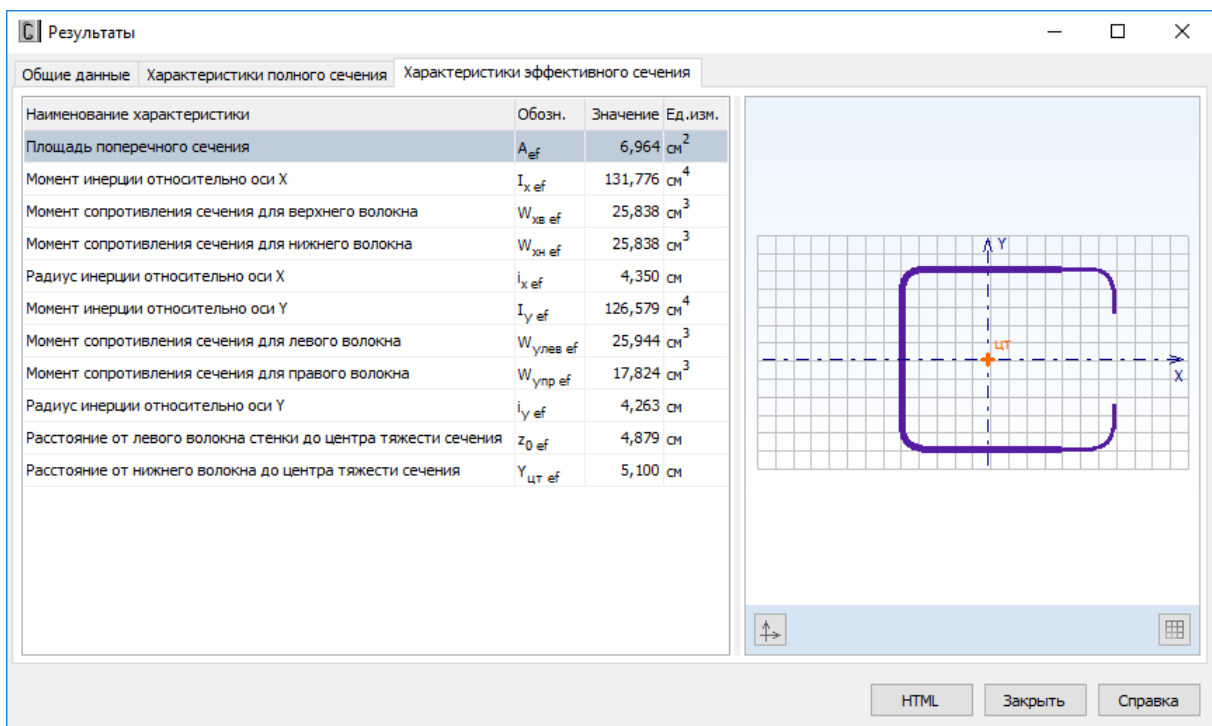


Рисунок 1.2.7 – Результаты расчёта. *Характеристики эффективного сечения при изгибе (отгибы сжаты)*



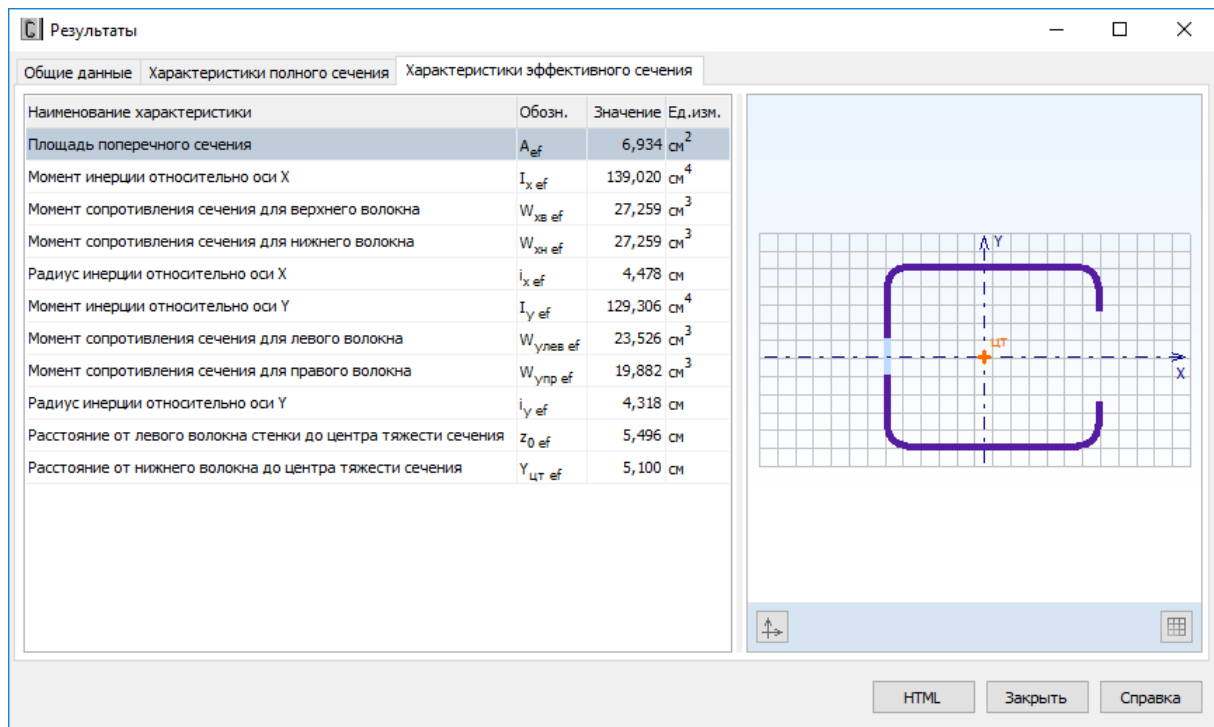


Рисунок 1.2.8 – Результаты расчёта. Характеристики эффективного сечения при изгибе (стенка сжата)

### 1.2.2. Вычисление геометрических характеристик эффективного сечения С-образного профиля при сжатии в соответствии с ЕС3

**Задание:** В программе CFSteel выполнить расчёт геометрических характеристик полного и эффективного сечения С-образного профиля из Примера Н [10]. Расчёт геометрических характеристик эффективного сечения выполнить в соответствии с ЕС3 [3,4].

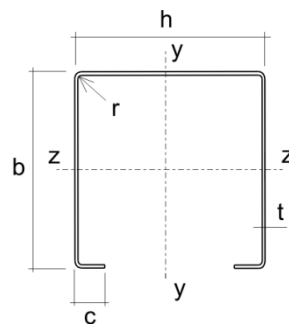


Figure 1.2.9 - Cross section

Section dimensions (overall) Figure 1.2.9:  $h = 102\text{ mm}$ ,  $t = 2\text{ mm}$ ,  $b = 120\text{ mm}$ ,  $c = 26\text{ mm}$ ,  $r = 10\text{ mm}$  (internal).

Material:  $E = 210000\text{ N/mm}^2$ ,  $G = 80769\text{ N/mm}^2$ ,  $\nu = 0,3$ ,  $f_y = 355\text{ N/mm}^2$ , partial factor  $\gamma_{M0} = 1,0$ .

Thickness and tolerances (clause 3.2.4(1) [4]):

$$0,45\text{ mm} \leq t_{cor} \leq 15\text{ mm}$$

$$t = t_{cor} = 2\text{ mm} - \text{conditions are complied.}$$

Influence of rounded corners (clause 5.1 [4]):

$$r/t = 10/2 = 5 \leq 5$$

$$r/\min(b_p, h_w) = 10/100 = 0,1 \leq 0,1$$

The influence of rounded corners on cross-section resistance may be neglected. For cross section properties the influence of rounded corners should always be taken into account.

Geometrical proportions (clause 5.2 [4]):

$$b/t = 120/2 = 60 \leq 60 \quad c/t = 26/2 = 13 \leq 50$$

$$h/t = 102/2 = 51 \leq 500 - \text{conditions are complied.}$$

$$0,2 \leq c/b \leq 0,6 \quad c/b = 26/120 = 0,22$$

The lips should be taken into account.

Table 1.2.16 – Gross-section properties (round corners)

Description	Symbol	Unit	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Area of section	$A_g$	cm <sup>2</sup>	7,34	7,34	0
Distance from center line of the web to centroid	$y_S$	mm	50,96	50,96	0
Distance from lip to centroid	$y_S'$	mm	67,04	67,04	0
Moment of inertia	$I_y$	cm <sup>4</sup>	139,10	139,16	0,04
Moment of inertia	$I_z$	cm <sup>4</sup>	140,45	140,53	0,06
Section modulus	$W_{z\ lip}$	cm <sup>3</sup>	20,64	20,66	0,01
Radius of gyration	$i_y$	mm	43,53	43,54	0,02
	$i_z$	mm	43,74	43,75	0,02
Distance from shear centre to centroid	$y_0$	mm	115,31	115,73	0,4
Torsional constant (sharp corners)	$I_t$	cm <sup>4</sup>	0,103	0,103	0
Warping constant (sharp corners)	$I_w$	cm <sup>6</sup>	4728,07	4728,07	0

Effective area  $A_{eff}$  of the cross-section due to uniform compression  $\sigma_{comEd} = f_y/\gamma_{M0} = f_{yb} = const.$

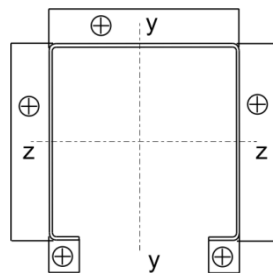


Figure 1.2.10 - Stress distribution (+ compression)

Table 1.2.17 - Effective area of the compression web

Description	Symbol	Unit	Clause	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Plate slenderness	$\bar{\lambda}_p$		4.4(2) [22]	1,012	1,012	0
Reduction factor	$\rho$		4.4(2) [22]	0,773	0,773	0
Effective height	$h_{eff}$	mm	tab. 4.1[22]	72,3	72,3	0
	$h_{e1}$	mm		36,15	36,19	0,1
	$h_{e2c}$	mm		39,37	39,41	0,1

Effective area of the compression flange with an edge stiffener

Step 1: Effective cross-section for spring stiffness of the stiffener  $K=\infty$  based on the maximum compressive stress  $\sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M0} = f_{yb} = const$

Description	Symbol	Unit	Clause	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Flange (internal compression element)						
Plate slenderness	$\bar{\lambda}_p$		4.4(2) [22]	1,206	1,206	0

*Сечение*

Reduction factor	$\rho$		4.4(2) [22]	0,678	0,678	0
Effective widths	$b_{eff}$	mm	tab. 4.1[22]	75,6	75,6	0
	$b_{e1}$	mm		37,8	37,8	0
	$b_{e2c}$	mm		41,02	41,02	0
	Lip (Outstand compression element)					
Buckling factor	$k\sigma$			0,5	0,5	0
Plate slenderness	$\bar{\lambda}_p$		4.4(2) [22]	0,666	0,666	0
Reduction factor	$\rho$		4.4(2) [22]	1	1	0
Effective width	$c_{eff}$	mm	tab. 4.1[22]	21,78	21,78	0

*Step 2:* Reduced strength for effective area of stiffener from *Step 1* due to distortional buckling

Description	Symbol	Unit	Clause	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Effective cross-sectional properties of the edge stiffener (clause 5.5.3.2 [4])						
Effective area	$A_S$	mm <sup>2</sup>		122,6	122,6	0
Distance between the midline of the flange and axis of stiffener	$e_S$	mm		5,23	5,24	0,2
Distance between the midline of the web and axis of stiffener	$b_l$	mm		104,14	104,13	0,01
Effective moment of inertia	$I_S$	mm <sup>4</sup>		6962	7134	2,4
Spring stiffness of the effective edge stiffener (clause 5.5.3.1(5) [4])						
Spring stiffness	$K$	N/mm <sup>2</sup>		0,167	0,167	0
Elastic critical buckling stress of the effective edge stiffener	$\sigma_{cr,s}$	N/mm <sup>2</sup>	5.5.3.2(7)	254,90	258,39	1,4
Slenderness ratio	$\bar{\lambda}_d$		5.5.3.2(11)	1,180	1,172	0,7
Reduction factor	$\chi_d$			0,617	0,622	0,9

*Step3:* Iteration to refine the value of the reduction factor for buckling of the stiffener (clause 5.5.3.2). Repeat *Step1* by calculating the effective widths with a reduced compressive stress due to distortional buckling of the edge stiffener from previous iteration based on the reduced slenderness ratio of the edge stiffener

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda} p \sqrt{\chi_d} .$$

Next, repeat *Step 2* to calculate a new reduction factor for the stiffener, continuing until  $\chi_{dn} \approx \chi_{dn-1}$ . The iteration is summarized in Table 1.2.18. There are 2 iterations in [10]. CFSteel has 3 iterations. It depends on precession of calculations.

Table 1.2.18 – Iteration to calculate the reduced effective area of the edge stiffener

Parameter			Unit	Initial calculation	first iteration			second iteration			third iteration (CFSteel only)
					[10]	CFSteel	Discrepancy, %	[10]	CFSteel	Discrepancy, %	
Edge stiffener	Reduction factor	$\chi_{d,n-1}$		1,0	0,617	0,623	1,0	0,595	0,600	0,8	0,598
Flange Strain ratio $\psi=1$ Buckling value $k_\sigma=4$	Plate slenderness	$\bar{\lambda}_p$		1,206	1,206	1,206	0	1,206	1,206	0	1,206
	Reduced plate slenderness	$\bar{\lambda}_{p,red}$			0,947	0,952	0,5	0,931	0,934	0,3	0,933
	Reduction factor	$\rho$		0,678	0,811	0,808	0,4	0,820	0,818	0,2	0,819
	Effective width	$b_{e2c}$	mm	41,02	48,46	48,28	0,4	48,96	48,85	0,2	48,90
Lip Strain ratio $\psi=1$ Buckling	Plate slenderness	$\bar{\lambda}_p$		0,666	0,666	0,666	0	0,666	0,666	0	0,666
	Reduced	$\bar{\lambda}_{p,red}$			0,523	0,525	0,4	0,514	0,516	0,4	0,515

Сечение

value $k_{\sigma}=0,5$	plate slenderness										
	Reduction factor	$\rho$		1,0	1,0	1,0	0	1,0	1,0	0	1,0
	Effective width	$c_{eff}$	mm	25,00	25,00	25,00	0	25,00	25,00	0	25,00
Edge stiffener	Effective area	$A_s$	mm <sup>2</sup>	122,60	137,48	137,12	0,3	138,48	138,28	0,1	138,36
	Distance	$b_l$	mm	104,14	100,80	100,87	0,07	100,57	100,61	0,04	100,59
	Moment of inertia	$I_s$	mm <sup>4</sup>	6962,00	7330,00	7495,37	2,2	7352,0	7520,93	2,3	7522,80
	Spring stiffness	$K_l$	N/mm <sup>2</sup>	0,167	0,181	0,179	1,1	0,182	0,181	0,6	0,181
	Critical buckling stress	$\sigma_{cr,s}$	N/mm <sup>2</sup>	254,90	242,82	245,26	1,0	242,17	244,32	0,9	244,25
	Reduction factor	$X_{d,n}$		0,617	0,596	0,600	0,7	0,595	0,598	0,5	0,598
	Reduced effective area	$A_{s,red}$	mm <sup>2</sup>	75,60	81,912	-	-	82,345	-	-	82,795

Section dimensions of the reduced effective edge stiffener (Result of iteration) presented in Table 1.2.19.

Table 1.2.19 - Section dimensions

Element	Parameter	Unit	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Flange	$b_{e1,c}$	mm	41,02	41,03	0,02
	$b_{e2,c}$	mm	48,96	48,90	0,1
Web	$h_{e1,c} = h_{e2,c}$	mm	39,37	39,41	0,1
Lip	$c_{eff,c}$	mm	25,00	25,00	0
Edge stiffener	$t_{red}$	mm	1,190	1,197	0,6

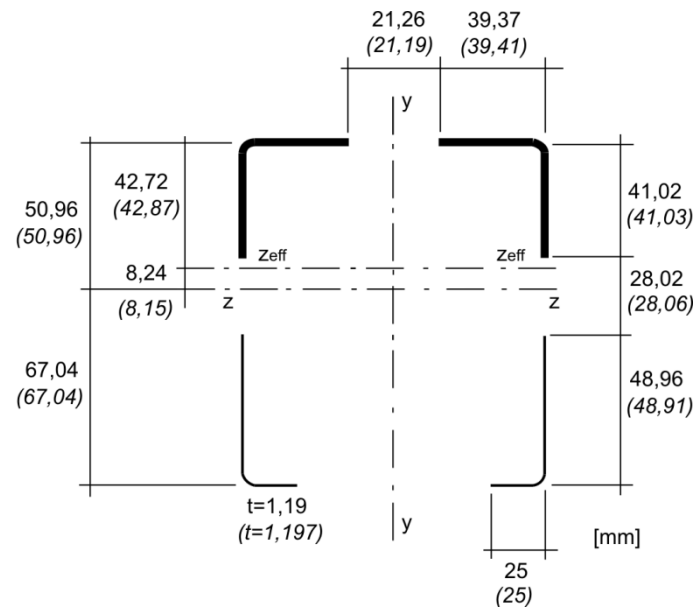


Figure 1.2.11 – Effective cross-section – compression  
(the values in parentheses in accordance with CFSteel)

Table 1.2.20 – Effective cross-section properties

Description	Symbol	Unit	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Area of section	$A_{eff}$	cm <sup>2</sup>	4,67	4,68	0,2
Distance from web to centroid	$y_{Seff}$	mm	42,72	42,82	0,2
Moment of inertia	$I_{yeff}$	cm <sup>4</sup>	87,24	87,46	0,2
Moment of inertia	$I_{zeff}$	cm <sup>4</sup>	94,80	95,21	0,4
Distance of centroids (gross section – effective cross-section)	$e_N$	mm	8,24	8,15	1,1

Effective section modulus  $W_{eff}$  of the cross-section in bending about the z-z axis

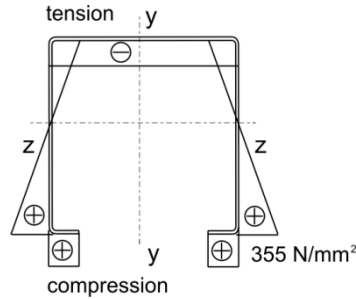


Figure 1.2 12 - Stress distribution (bending)

The web is in tension, so fully effective.

Effective area of the flange in bending with an edge stiffener in compression

Step 1: Effective cross-section for spring stiffness of the stiffener  $K=\infty$  based on the maximum compressive stress  $\sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M0} = f_{yb} = const$

Description	Symbol	Unit	Clause	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Flange (internal compression element)						
Stress ratio	$\psi$			-0,748	-0,748	0
Buckling factor	$k_{\sigma}$		tab.4.1 [21]	18	18	0
Plate slenderness	$\bar{\lambda}_p$		4.4(2) [21]	0,569	0,566	0,5
Effective widths	$b_{eff}$	mm	tab. 4.1[21]	63,82	63,81	0
	$b_{e1}$	mm		25,53	25,52	0
	$b_{e2c}$	mm		38,29	38,29	0

Step 2: Reduced strength for effective area of stiffener from Step 1 due to distortional buckling

Description	Symbol	Unit	Clause	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Effective cross-sectional properties of the edge stiffener (clause 5.5.3.2 [4])						
Effective area	$A_S$	mm <sup>2</sup>		98,06	98,05	0,01
Distance between the midline of the web and axis of stiffener	$b_l$	mm		109,40	109,40	0
Effective moment of inertia	$I_S$	mm <sup>4</sup>		6113	6284	2,8
Spring stiffness of the effective edge stiffener (clause 5.5.3.1(5) [4])						
Spring stiffness	$K$	N/mm <sup>2</sup>		0,149	0,149	0
Elastic critical buckling stress of the effective edge stiffener	$\sigma_{cr,s}$	N/mm <sup>2</sup>	5.5.3.2(7)	282,08	285,71	1,3
Slenderness ratio	$\bar{\lambda}_d$		5.5.3.2(1)	1,122	1,107	1,4
Reduction factor	$\chi_d$			0,659	0,670	1,7

*Step3:* Iteration to refine the value of the reduction factor for buckling of the stiffener (clause 5.5.3.2). Repeat *Step1* by calculating the effective widths with a reduced compressive stress due to distortional buckling of the edge stiffener from previous iteration based on the reduced slenderness ratio of the edge stiffener

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda} p \sqrt{\chi_d}.$$

Next, repeat *Step 2* to calculate a new reduction factor for the stiffener, continuing until  $\chi_{dn} \approx \chi_{dn-1}$ . Because flanges and lips are already fully effective, the iteration is redundant.

Edge stiffener:  $A_{s,red} = 74,1 \text{ mm}^2$  [10]

Edge stiffener:  $A_{s,red} = 75,3 \text{ mm}^2$  [CFSteel] (1,6%).

$t_{red} = 1,51 \text{ mm}$  [10]

$t_{red} = 1,54 \text{ mm}$  [CFSteel] (2%).

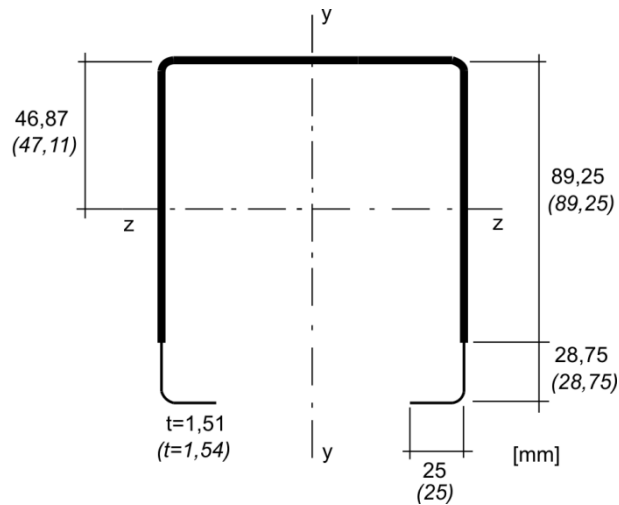


Figure 1.2.13 – Effective cross-section – bending  
(the values in parentheses in accordance with CFSteel)

Table 1.2.21 – Section properties of effective cross-section

Description	Symbol	Unit	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Area of section	$A_{eff}$	cm <sup>2</sup>	6,86	6,90	0,6
Distance from the web to centroid	$y_{seff}$	mm	46,87	48,20	2,8
Moment of inertia	$I_{yeff}$	cm <sup>4</sup>	129,73	130,48	0,6
Moment of inertia	$I_{zeff}$	cm <sup>4</sup>	122,49	123,98	1,2
Section modulus	$W_{zefflip}$	cm <sup>3</sup>	17,04	17,32	1,6
Section modulus	$W_{zeffweb}$	cm <sup>3</sup>	25,59	25,72	0,5

### 1.2.3. Вычисление геометрических характеристик эффективного сечения С-образного профиля

**Задание:** В программе CFSteel выполнить расчёт геометрических характеристик эффективного сечения из документа: Heinisuo, M., Kukkonen, J. Design of Cold-Formed Members Following New EN 1993-1-3 / Tampere University of Technology, - 2005,- 21 p [23].

Сечение

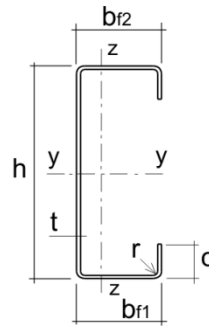


Figure 1.2.14 - Cross section

Section dimensions (overall):  $h = 97,3 \text{ mm}$ ,  $t = 1,48 \text{ mm}$ ,  $b_{f1} = b_{f2} = 37 \text{ mm}$ ,  $c = 12,5 \text{ mm}$ ,  $r = 0,85 \text{ mm}$  (internal).

Material:  $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $G = 80769 \text{ N/mm}^2$ ,  $\nu = 0,3$ ,  $f_y = 505 \text{ N/mm}^2$ , partial factor  $\gamma_{M0} = 1,0$ .

Table 1.2.22 – Gross-section properties (round corners)

Description	Symbol	Unit	Value [23]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Area of section	$A_g$	$\text{cm}^2$	2,7771	2,7772	0
Distance from center line of the web to centroid	$y_s$	mm	-	10,917	-
Moment of inertia	$I_y$	$\text{cm}^4$	40,283	40,237	0,1
Moment of inertia	$I_z$	$\text{cm}^4$	5,257	5,247	0,2
Section modulus	$W_{z lip}$	$\text{cm}^3$	-	2,071	-
Radius of gyration	$i_y$	cm	-	3,806	-
	$i_z$	cm	-	1,375	-
Distance from shear centre to centroid	$y_0$	mm	-	28,08	-
Torsional constant (sharp corners)	$I_t$	$\text{cm}^4$	0,0202	0,0206	2,0
Warping constant (sharp corners)	$I_w$	$\text{cm}^6$	104,77	107,77	2,9

$$\sigma_{comEd} = f_y / \gamma_{M0} = f_{yb} = \text{const.}$$

Table 1.2.23 – Parameters of effective cross-section

Description	Symbol	Unit	Clause EN 1993-1-3 EN 1993-1-5	Value [23]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Relative slenderness: Lip	$\bar{\lambda}_p$		4.4(2)	0,562	0,557	0,9
Relative slenderness: Flange	$\bar{\lambda}_p$		4.4(2)	0,609	0,603	1,0
Relative slenderness: Web	$\bar{\lambda}_p$		4.4(2)	1,671	1,653	1,1
Reduction factor: Lip	$\rho$		4.4(2)	1	1	0
Reduction factor: Flange	$\rho$		4.4(2)	1	1	0
Reduction factor: Web	$\rho$		4.4(2)	0,52	0,52	0

Table 1.2.24 - Reduced parameters for effective area of stiffener from due to distortional buckling\*

Description	Symbol	Unit	Clause	Value [23]	Value CFSteel (Initial calculation)	Discrepancy, %	Value CFSteel (1 iteration)
Effective cross-sectional properties of the edge stiffener (clause 5.5.3.2 [4])							
Effective area	$A_S$	$\text{mm}^2$		42,66	42,68	0,05	42,68
Distance between the midline of the web and axis of stiffener	$b_I$	mm		30,04	30,04	0	30,04
Effective moment of inertia	$I_S$	$\text{mm}^4$		560,24	560,18	0,01	560,18
Spring stiffness of the effective edge stiffener (clause 5.5.3.1(5) [4])							
Spring stiffness	$K$	$\text{N/mm}^2$		1,193	1,192	0	1,192
Elastic critical buckling stress of	$\sigma_{cr,s}$	$\text{N/mm}^2$	5.5.3.2(7)	555	555	0	555

*Сечение*

the effective edge stiffener							
Slenderness ratio	$\bar{\lambda}_d$		5.5.3.2(11)	0,963	0,954	0,9	0,954
Reduction factor	$\chi_d$			0,774	0,780	0,8	0,780
Reduced thickness	$t_{red}$	mm		1,15	1,15	0	1,15

\* It is no iterations in [23] to refine effective parameters of edge stiffener

Table 1.2.25 – Section properties of effective cross-section

Description	Symbol	Unit	Value [23]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Area of section	$A_{eff}$	cm <sup>2</sup>	1,9024	1,9216	1,0
Distance from center line of the web to centroid	$y_{Seff}$	mm	-	12,846	-
Moment of inertia	$I_{yeff}$	cm <sup>4</sup>	-	35,20	-
Moment of inertia	$I_{zef}$	cm <sup>4</sup>	-	3,63	-
Section modulus	$W_{zefflip}$	cm <sup>3</sup>	-	1,56	-
Section modulus	$W_{zeffweb}$	cm <sup>3</sup>	25,59	2,67	-
Radius of gyration	$i_{yeff}$	cm	-	4,28	-
	$i_{zef}$	cm	-	1,37	-
Distance of centroids (gross section – effective cross-section)	$e_N$	mm	-	1,929	-

**1.2.4. Вычисление геометрических характеристик эффективного сечения С-образного профиля при изгибе относительно оси наибольшей жёсткости в соответствии с ЕС3**

**Задание:** В программе CFSteel выполнить расчёт геометрических характеристик эффективного сечения из документа: SX022a-EN-EU Calculation of effective section properties for a cold-formed lipped channel section in bending: Calculation sheet / Access steel, 2005, 8 p. [24]

Section dimensions (overall):  $h = 200 \text{ mm}$ ,  $t_{nom} = 2 \text{ mm}$ ,  $b_{f1} = 66 \text{ mm}$ ,  $b_{f2} = 74 \text{ mm}$ ,  $c = 20,8 \text{ mm}$ ,  $r = 3 \text{ mm}$  (internal).

Material:  $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $G = 80769 \text{ N/mm}^2$ ,  $\nu = 0,3$ ,  $f_y = 350 \text{ N/mm}^2$ , partial factor  $\gamma_{M0} = 1,0$ .

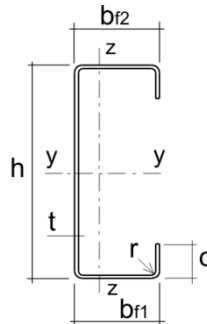


Figure 1.2.15 - Cross section

Gross cross-sectional area [24]  $A = 7,32 \text{ cm}^2$ . Gross cross-sectional area according to CFSteel  $A = 7,20 \text{ cm}^2$ . Discrepancy 1,7%. It should be noted, that in [24] properties of gross and effective sections are calculated with sharp corners. While in CFSteel properties are calculated using rounded corners 'as is' without simplifications.

The general (iterative) procedure is applied to calculate the effective properties of the compressed flange and the lip (plane element with edge stiffener). The calculation should be carried out in three steps:

*Step1:* Obtain an initial cross-section for the stiffener using effective widths of the flange determined by assuming that the compressed flange is doubly supported, the stiffener gives full



restraint ( $K=\infty$ ) and that design strength is not reduced ( $\sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M0}$ ). The calculations are summarized in Table 1.2.26.

Table 1.2.26 - Calculations of stiffener parameters

Description	Symbol	Unit	Clause	Value [24]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Effective width of the compressed flange						
Relative slenderness	$\bar{\lambda}_p$		4.4 [22]	0,789*	0,763*	3,4
Width reduction factor	$\rho$			0,914	0,933	2,0
Effective widths	$b_{eff}$	mm		65,8	65,0	1,2
	$b_{e1}$	mm		32,9	32,5	1,2
	$b_{e2}$	mm		32,9	32,5	1,2
Effective width of the edge fold						
Buckling factor	$k\sigma$			0,5	0,5	0
Relative slenderness	$\bar{\lambda}_p$		4.4 [22]	0,614*	0,577*	6,4
Reduction factor	$\rho$			1	1	0
Effective width	$c_{eff}$	mm		19,8	18,6	6,3

\* Dimensions of flat parts of a section in [24] is taken as the distance between midline intersection points. While in CFSteel  $b_p$ ,  $c_p$  and  $h_p$  are taken as notional widths of plane elements allowin for radii according to Figure 5.3 [4]

*Step2:* Use the initial effective cross-section of the stiffener to determine the reduction factor, allowing for the effects of the continuous spring restraint. The calculations are summarized in Table 1.2.27.

Table 1.2.27 - Calculation of reduction factor

Description	Symbol	Unit	Clause	Value [24]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Effective cross-sectional properties of the edge stiffener (clause 5.5.3.2 [4])						
Effective area	$A_S$	mm <sup>2</sup>		103,3	101,4	1,9
Distance between the midline of the web and axis of stiffener	$b_I$	mm		61,73	61,03	1,1
Spring stiffness of the effective edge stiffener (clause 5.5.3.1(5) [4])						
Spring stiffness	$K$	N/mm <sup>2</sup>		0,439	0,450	2,5
Elastic critical buckling stress of the effective edge stiffener	$\sigma_{cr,s}$	N/mm <sup>2</sup>	5.5.3.2(7)	355,78	364,89	2,5
Slenderness ratio	$\bar{\lambda}_d$		5.5.3.2(11)	0,992	0,979	1,3
Reduction factor	$\chi_d$			0,753	0,762	1,2

*Step3:* As the reduction factor for buckling of the stiffener is  $\chi_d < 1$ , iterative to refine the value of the reduction factor for buckling of the stiffener. The iterations are carried out based on modified values of  $\rho$  obtained using  $\sigma_{com,Ed,I} = \chi_d f_{yb} / \gamma_{M0}$  and

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d} .$$

The iterations stops when the reduction factor  $\chi$  converges. Final values of last iteration are shown in Table 1.2.28.

Table 1.2.28 - Final values

Description	Symbol	Unit	Clause	Value [24]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Effective widths	$b_I$	mm		32,9	32,5	1,2
	$b_{e2}$	mm		35,9	34,8	3,1
	$c_{eff}$	mm		19,8*	18,6*	6,4
Reduction factor	$\chi_d$			0,737	0,756	2,6
Reduced thickness	$t_{red}$	mm	5.5.3.2(12)	1,44	1,48	2,8

*Effective section properties of the web (Table 1.2.29)*

Table 1.2.29 - Effective section properties of the web

Description	Symbol	Unit	Clause	Value [24]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Position of the neutral axis with regard to the flange (centerline) in compression	$h_c$	mm		101,6	101,1	0,5
Stress ratio	$\psi$		4.4 [22]	-0,949	-0,959	1,0
Buckling factor	$k_\sigma$			22,58	22,84	1,2
Relative slenderness	$\bar{\lambda}_d$			0,914	0,897	1,9
Reduction factor	$\rho$			0,959	0,975	1,7
Effective width of the zone in compression of the web	$h_{eff}$			97,5	97,4	0,1
near the flange in compression	$h_{e1}$			39,0	39,0	0
near the neutral axis	$h_{e2}$			58,5	58,5	0

Properties of the effective section (Table 1.2.30)

Table 1.2.30 - Effective section properties

Description	Symbol	Unit	Value [24]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Cross-section area	$A_{eff}$	cm <sup>2</sup>	6,892	6,835	0,8
Position of the neutral axis with regard to the flange in compression	$z_{c\,eff}$	mm	102,3	102,4	0,1
Position of the neutral axis with regard to the flange in tension	$z_{t\,eff}$	mm	95,7	97,6	2,0
Second moment of area	$I_{y\,eff}$	cm <sup>4</sup>	414,0	406,5	1,8
Section modulus	$W_{y\,eff\,c}$	cm <sup>3</sup>	40,46	39,70	1,9
	$W_{y\,eff\,t}$	cm <sup>3</sup>	43,26	41,66	3,8

### 1.2.5. Вычисление геометрических характеристик эффективного сечения Швеллера при сжатии в соответствии с ЕС3

**Задание:** В программе CFSteel выполнить расчёт геометрических характеристик полного и эффективного сечения Швеллера из Примера G Worked Examples According to EN 1993-1-3 Eurocode 3, Part 1.3 / ECCS TC 7, № 123, 2008.- 235 p [10].

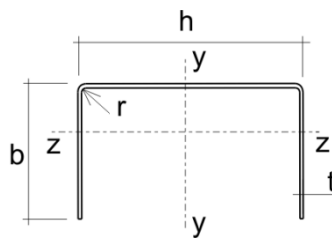


Figure 1.2.16 - Cross section

Section dimensions (overall):  $h = 104 \text{ mm}$ ,  $t = 4 \text{ mm}$ ,  $b = 77 \text{ mm}$ ,  $r = 4 \text{ mm}$  (internal).

Material:  $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $G = 80769 \text{ N/mm}^2$ ,  $\nu = 0,3$ ,  $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ , partial factor  $\gamma_{M0} = 1,0$ .

Thickness and tolerances (clause 3.2.4(1) [4]):

$$0,45 \text{ mm} \leq t_{cor} \leq 15 \text{ mm}; \quad t = t_{cor} = 4 \text{ mm} - \text{conditions are complied.}$$

Influence of rounded corners (clause 5.1 [4]):

$$r/t = 4/4 = 1 \leq 5$$

$$r/\min(b_p, h_w) = 4/75 = 0,053 \leq 0,1$$

## Сечение

The influence of rounded corners on cross-section resistance may be neglected. For cross section properties the influence of rounded corners should always be taken into account.

Geometrical proportions (clause 5.2 [4]):

$$b/t = 77/4 = 19,25 \leq 60; \quad h/t = 104/4 = 26 \leq 500 - \text{conditions are complied.}$$

Table 1.2.31 - Gross-section properties (round corners)

Description	Symbol	Unit	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Area of section	$A_g$	cm <sup>2</sup>	9,79	9,79	0
Distance from center line of the web to centroid	$y_s$	mm	23	22,99	0
Moment of inertia	$I_y$	cm <sup>4</sup>	177,97	178,06	0,09
Moment of inertia	$I_z$	cm <sup>4</sup>	60,75	60,77	0,03
Section modulus	$W_{z,free}$	cm <sup>3</sup>	11,68	11,68	0
	$W_{z,web}$	cm <sup>3</sup>	24,30	24,31	0,04
Radius of gyration	$i_y$	mm	4,46	4,26	0
	$i_z$	mm	2,49	2,49	0
Distance from shear centre to centroid	$y_0$	mm	54,36	53,68	1,3
Torsional constant (sharp corners)	$I_t$	cm <sup>4</sup>	0,533	0,533	0
Warping constant (sharp corners)	$I_w$	cm <sup>6</sup>	1086,65	1086,65	0

Effective area  $A_{eff}$  of the cross-section due to uniform compression (according to clause 5.5 [4])

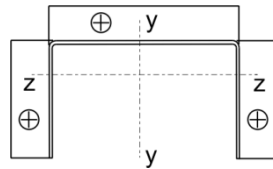


Figure 1.2.17 - Stress distribution (+ compression)

$$\sigma_{comEd} = f_y / \gamma_{M0} = f_{yb} = \text{const.}$$

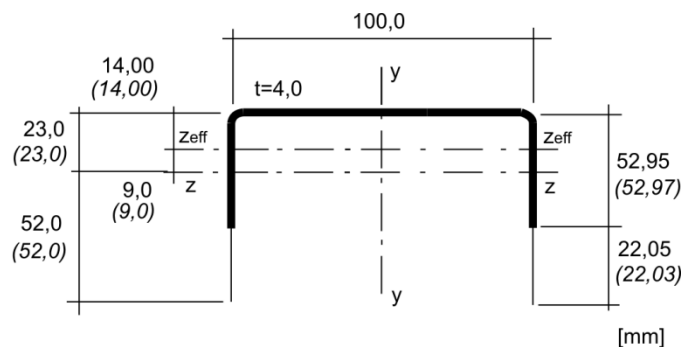
Plate slenderness of the web

$$\bar{\lambda}_p = 0,522 < 0,673 - \text{the web is fully effective.}$$

Effective area of the compression flange

Table 1.2.32 - Effective parameters of compression flange

Description	Symbol	Unit	Clause	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Buckling factor	$k_\sigma$		Tab.4.2 [22]	0,43	0,43	0
Plate slenderness	$\bar{\lambda}_p$		4.4(2) [22]	1,208	1,208	0
Reduction factor	$\rho$			0,699	0,699	0
Effective width	$b_{eff}$	mm	Tab.4.2 [22]	51,19	51,21	0,04



Сечение

Figure 1.2.18 – Effective cross-section (compression)  
(the values in parentheses in accordance with CFSteel)

Table 1.2.33 – Section properties of effective cross-section

Description	Symbol	Unit	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Area of section	$A_{eff}$	cm <sup>2</sup>	8,03	8,03	0
Distance from web to centroid	$y_{Seff}$	mm	14,00	14,00	0
Moment of inertia	$I_{yeff}$	cm <sup>4</sup>	133,84	133,96	0,09
Moment of inertia	$I_{zeff}$	cm <sup>4</sup>	23,91	23,94	0,1
Distance of centroids (gross section – effective cross-section)	$e_N$	mm	9,00	9,00	0

Effective section modulus  $W_{eff}$  of the cross-section in bending about the z-z axis with maximum compressive stress at the free edge (clause 5.5 [4])

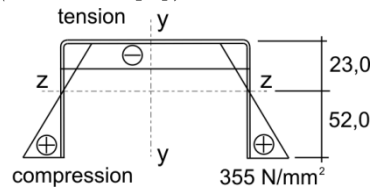


Figure 1.2.19 - Stress distribution (bending)

The web is fully effective (tension).

Table 1.2.34 - Effective parameters of the flanges

Description	Symbol	Unit	Clause	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Buckling factor	$k_\sigma$		Tab.4.2 [22]	0,668	0,667	0,1
Relative slenderness	$\bar{\lambda}_p$		4.4 [22]	0,969	0,969	0
Reduction factor	$\rho$			0,832	0,832	0
Effective width	$b_{eff}$	mm	Tab.4.2 [22]	43,25	43,25	0

Table 1.2.35 – Iteration to calculate the effective cross-section in bending\*

Parameter			Unit	Initial calculation	first iteration			fourth iteration			fifth iteration (CFSteel only)
					[10]	CFSteel	Discrepancy, %	[10]	CFSteel	Discrepancy, %	
Strain ratio	based on the effective cross-section	$\psi$		-0,409	-0,375	-0,380	1,3	-0,342	-0,307	11	-0,304
Flange	Buckling factor	$k$		0,668	0,659	0,660	0,15	0,650	0,643	1	0,640
	Plate slenderness	$\bar{\lambda}_p$		0,969	0,858	0,858	0	0,764	0,755	1,2	0,752
	Reduction factor	$\rho$		0,832	0,910	0,910	0	0,987	0,994	0,7	0,998
	Effective width	$b_{eff}$	mm	43,25	42,65	42,51	0,2	41,9	42,56	1,6	42,56

\* In [10] calculations cancelled after 5 steps. In CFSteel target accuracy (0,5%) was reached after 6 steps.

Сечение

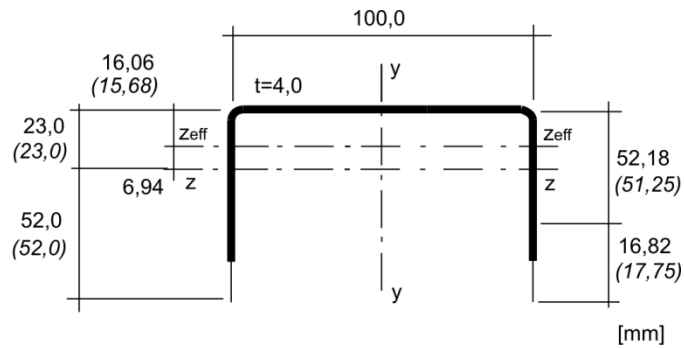


Figure 1.2.20 – Effective cross-section (bending)  
(the values in parentheses in accordance with CFSteel)

Table 1.2.21 – Section properties of effective cross-section (bending)

Description	Symbol	Unit	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Area of section	$A_{eff}$	cm <sup>2</sup>	8,45	8,37	1,0
Distance from web to centroid	$y_{Seff}$	mm	16,06	15,68	2,4
Moment of inertia	$I_{veff}$	cm <sup>4</sup>	144,31	142,55	1,2
Moment of inertia	$I_{zeff}$	cm <sup>4</sup>	30,79	29,50	4,3
Section modulus	$W_{effz,free}$	cm <sup>3</sup>	7,31	7,10	3,0
Section modulus	$W_{effz,web}$	cm <sup>3</sup>	17,05	16,69	2,2

*Effective area  $A_{eff}$  of the cross-section due to uniform compression (according to Annex D [4])*

*Effective area of the compression flange*

Table 1.2.36 - Effective parameters of compression flange

Description	Symbol	Unit	Clause	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Buckling factor	$k_\sigma$		Tab.4.2 [22]	0,43	0,425	1,2
Plate slenderness	$\bar{\lambda}_p$		4.4(2) [22]	1,208	1,215	0,6
Reduction factor	$\rho$			0,699	0,696	0,4
Effective width	$b_{e0}$	mm	Tab.D.1	30,76	30,76	0
Effective thickness	$t_{eff}$	mm		1,893	1,871	1,1

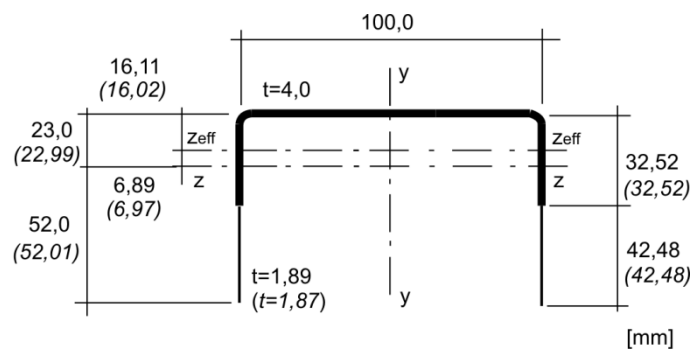


Figure 1.2.21 – Effective cross-section – compression  
(the values in parentheses in accordance with CFSteel)

Table 1.2.37 – Section properties of effective cross-section (compression)

Description	Symbol	Unit	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Area of section	$A_{eff}$	cm <sup>2</sup>	8,00	7,89	0,3
Distance from web to centroid	$y_{Seff}$	mm	16,11	16,02	0,6

*Сечение*

Moment of inertia	$I_{y_{eff}}$	cm <sup>4</sup>	133,11	132,79	0,2
Moment of inertia	$I_{z_{eff}}$	cm <sup>4</sup>	37,29	37,05	0,6
Distance of centroids (gross section – effective cross-section)	$e_N$	mm	6,89	6,97	1,2

*Effective section modulus  $W_{eff}$  of the cross-section in bending about the z-z axis with maximum compressive stress at the free edge (to Annex D [4])*

The web is fully effective (tension).

Table 1.2.38 – Section properties of effective cross-section (bending)

Description	Symbol	Unit	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Area of section	$A_{eff}$	cm <sup>2</sup>	9,13	9,20	0,8
Distance from web to centroid	$y_{Seff}$	mm	20,40	20,64	3,2
Moment of inertia	$I_{y_{eff}}$	cm <sup>4</sup>	161,48	163,37	1,2
Moment of inertia	$I_{z_{eff}}$	cm <sup>4</sup>	50,96	51,82	1,7
Section modulus	$W_{effz, free}$	cm <sup>3</sup>	9,33	9,53	2,1
Section modulus	$W_{effz, web}$	cm <sup>3</sup>	22,76	22,89	0,6

В Таблице 1.2.39 представлено сравнение эффективных геометрических характеристик С-образных сечений, приведённых в Техническом Руководстве компании Руукки [28], с результатами расчёта в программе CFSteel. В [28] не указан радиус закругления в местахгиба. В CFSteel принято: радиус закругления  $r = 3$  мм, расчётная толщина  $t = t_{nom} - t_{coat}$ ,  $t_{coat} = 0,04$  мм для класса цинкования 275 г/м<sup>2</sup>. Геометрические характеристики в программе вычисляются с учётом закругления без упрощений.

Таблица 1.2.39 - С-образные профили. Сопоставление результатов, полученных в CFSteel, с данными, приведёнными в Техническом Руководстве компании Руукки [28]

Cross-section	Height h	Thickness $t_{nom}$	Width of wide flange, A	Width of narrow flange, B	Fold C	Source	Properties of effective cross-section				
							Cross-section area, $A_{eff}$	Moment of inertia (Top flange compressed), $I_{yeff}$	Section modulus (Top flange compressed), $W_{yeff}$	Moment of inertia (Bottom flange compressed), $I_{yeff}$	Section modulus (Bottom flange compressed), $W_{yeff}$
	mm	mm	mm	mm	mm		cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>
C100	100	1	45	39	18	Ruukki	1,22	28,624	5,62	29,432	5,567
						CFSteel	1,23	28,954	5,54	29,731	5,519
						%	0,8	1,2	1,4	1,0	0,9
		1,2	45	39	18	Ruukki	1,72	36,812	7,321	37,566	7,365
						CFSteel	1,71	36,439	7,271	37,372	7,271
						%	0,6	1,0	0,7	0,5	1,3
	1,5	46	40	18	Ruukki	2,42	47,262	9,244	47,262	9,244	
					CFSteel	2,41	46,882	9,215	47,031	9,138	
					%	0,4	0,8	0,3	0,5	1,1	
	2	47	41	18	Ruukki	3,64	63,289	12,319	63,289	12,319	
					CFSteel	3,62	62,6	12,182	62,6	12,182	
					%	0,5	1,1	1,1	1,1	1,1	
C120	120	1	45	39	18	Ruukki	1,22	42,646	6,768	43,793	6,725
						CFSteel	1,23	43,402	6,751	44,484	6,738
						%	0,8	1,8	0,3	1,6	0,2
		1,2	45	39	18	Ruukki	1,71	56,346	9,374	57,392	9,327
						CFSteel	1,71	55,88	9,251	56,671	9,039
						%	0,0	0,8	1,3	1,3	3,1
	1,5	46	40	18	Ruukki	2,43	72,727	11,871	72,727	11,871	
					CFSteel	2,41	71,997	11,844	72,244	11,696	
					%	0,8	1,0	0,2	0,7	1,5	
	2	47	41	18	Ruukki	3,67	97,403	15,834	97,403	15,834	
					CFSteel	3,66	96,411	15,67	96,411	15,67	
					%	0,3	1,0	1,0	1,0	1,0	
C150	150	1	45	39	18	Ruukki	1,22	69,499	8,471	71,579	8,546
						CFSteel	1,22	71,138	8,583	72,734	8,578
						%	0,0	2,4	1,3	1,6	0,4
		1,2	45	39	18	Ruukki	1,72	92,084	11,923	94,238	11,891
						CFSteel	1,7	91,898	11,753	92,86	11,49
						%	1,2	0,2	1,4	1,5	3,4
	1,5	46	40	18	Ruukki	2,44	123,851	16,283	123,716	16,168	
					CFSteel	2,41	122,234	16,168	121,875	15,691	
					%	1,2	1,3	0,7	1,5	3,0	
	2	47	41	18	Ruukki	3,74	166,423	21,756	166,423	21,756	
					CFSteel	3,69	163,917	21,469	164,211	21,411	
					%	1,3	1,5	1,3	1,3	1,6	
C200	200	1,5	70	62	26	Ruukki	2,77	284,286	26,036	291,22	26,021
						CFSteel	2,8	284,516	25,876	291,741	26,006
						%	1,1	0,1	0,6	0,2	0,1
		2	71	63	26	Ruukki	4,67	435,933	43,388	440,601	42,697
						CFSteel	4,63	425,604	42,298	428,793	41,163
						%	0,9	2,4	2,5	2,7	3,6
	2,5	72	64	26	Ruukki	6,56	560,349	54,756	560,349	54,756	
					CFSteel	6,47	540,266	53,596	543,031	52,875	
					%	1,4	3,6	2,1	3,1	3,4	
	3	73	65	26	Ruukki	8,56	673,275	65,63	673,275	65,63	

Сечение

						CFSteel	8,43	650,427	64,105	653,234	63,953
						%	1,5	3,4	2,3	3,0	2,6
C250	250	1,5	70	62	26	Ruukki	2,75	460,126	32,61	470,892	32,688
						CFSteel	2,78	464,151	32,774	475,047	32,977
						%	1,1	0,9	0,5	0,9	0,9
		2	71	63	26	Ruukki	4,63	708,138	54,727	714,3	53,474
						CFSteel	4,59	696,837	53,422	703,017	52,163
						%	0,9	1,6	2,4	1,6	2,5
	2,5	72	64	26	Ruukki	6,55	943,088	74,282	942,613	73,423	
					CFSteel	6,46	916,497	73,054	916,218	71,01	
					%	1,4	2,8	1,7	2,8	3,3	
	3	73	65	26	Ruukki	8,59	1142,055	89,356	1142,055	89,356	
					CFSteel	8,48	1111,92	87,325	1111,92	87,325	
					%	1,3	2,6	2,3	2,6	2,3	
C300	300	1,5	89	81	26	Ruukki	2,63	704,848	38,607	718,788	38,779
						CFSteel	2,65	730,032	40,017	743,485	40,206
						%	0,8	3,6	3,7	3,4	3,7
		2	90	82	26	Ruukki	4,57	1105,971	65,738	1127,403	65,861
						CFSteel	4,6	1118,979	66,427	1139,234	66,598
						%	0,7	1,2	1,0	1,0	1,1
	2,5	91	83	26	Ruukki	6,85	1533,544	97,143	1550,836	95,957	
					CFSteel	6,81	1526,882	96,396	1542,642	95,34	
					%	0,6	0,4	0,8	0,5	0,6	
	3	92	84	26	Ruukki	9,19	1956,934	129,561	1956,195	125,446	
					CFSteel	9,08	1924,439	126,773	1926,201	123,348	
					%	1,2	1,7	2,2	1,5	1,7	
C350	350	2,0	90	82	30	Ruukki	4,75	1587,383	79,851	1614,608	79,941
						CFSteel	4,77	1604,815	80,419	1631,677	80,643
						%	0,4	1,1	0,7	1,1	0,9
		2,5	91	83	30	Ruukki	7,09	2200,985	117,588	2221,387	116,154
						CFSteel	7,07	2214,245	115,399	2214,245	115,399
						%	0,3	0,6	1,9	0,3	0,6
	3,0	92	84	30	Ruukki	9,51	2807,307	156,384	2802,178	151,617	
					CFSteel	9,42	2768,952	153,187	2767,652	149,204	
					%	0,9	1,4	2,0	1,2	1,6	



## 2. ЭЛЕМЕНТЫ

### 2.1. Растяжение

**Задание 2.1.1.** Выполнить расчёты несущей способности растянутых элементов, результаты испытаний которых представлены в работе [15], ручным способом и в программе CFSteel. Сравнить результаты, полученные ручным способом и полученные в программе по разным методикам, между собой, а также с экспериментальными данными.

Элементы выполнены из холодногнутых профилей с поперечным сечением в виде швеллера с номинальными размерами:  $80 \times 40 \times 2,4$  мм,  $80 \times 50 \times 2,4$  мм,  $80 \times 60 \times 2,4$  мм,  $100 \times 40 \times 2,4$  мм и  $120 \times 40 \times 2,4$  мм. Прикрепление элемента осуществляется к относительно толстой пластине с помощью болтов номинальным диаметром  $d = 12,7$  мм, расположенных на стенке элемента в два ряда по её ширине. Рассмотрено три варианта расположения болтов вдоль усилия (Рисунок 2.1.1): два поперечных ряда болтов с шагом  $40$  мм (4 болта в соединении), два поперечных ряда болтов с шагом  $80$  мм (4 болта в соединении) и три ряда болтов с шагом  $40$  мм (6 болтов в соединении). Диаметр отверстий под болты  $d_0 = 14,3$  мм. Элементы выполнены из листовой оцинкованной стали с пределом текучести  $f_y = 328$  МПа и пределом прочности  $f_u = 447,77$  МПа ( $f_u/f_y = 1,365$ ). Механические характеристики получены по результатам испытаний стандартных образцов. В [15] указывается, что разрушение всех испытанных образцов происходило от разрыва по ослабленному отверстиями сечению в месте прикрепления. Характерный вид разрушения [15] представлен на Рисунке 2.1.2.

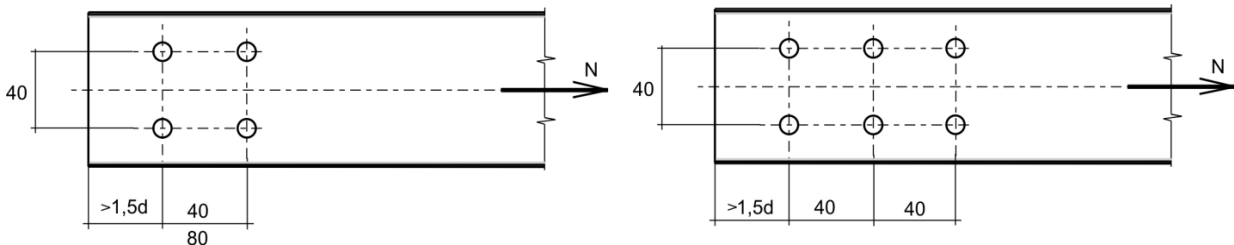


Рисунок 2.1.1 – Размеры испытанных в [15] образцов



Рисунок 2.1.2 – Характерный вид разрушения испытанных в [15] образцов

*Расчёт:* Ручным способом и в программе CFSteel произведён расчёт по нормам СП 260 [1], СП 16 [2], EC3 [4,5], AISI S100 [7], а также методикам, предложенным G.L. Kulak и E.Y. Wu (Кулак и Ву) [14], С.L. Pan (Пан) [15], Л. Н. Тех, В.Р. Gilbert (Тех и Джильберт) [16].

Определялось нормативное значение несущей способности элементов по ослабленному отверстиями для болтов сечению в месте прикрепления, а также соответствующее расчётное значение. Для вычислений по СП 260 учтён коэффициент надёжности по материалу  $\gamma_m=1,025$  (п.6.3 [1]), по СП 16  $\gamma_m=1,05$ , по ЕС3 частный коэффициент  $\gamma_{M2}=1,25$ , а по AISI S100 коэффициент сопротивления  $\phi_t=0,65$ , также как и по методикам Пана, Теха и Джилберта. В методике Кулака и Ву для определения расчётного значения ослабленная часть сечения домножается на коэффициент 0,9 и делится на частный коэффициент надёжности  $\gamma_{M1}=1,25$ ; неослабленная часть сечения делится на  $\gamma_{M0}=1,1$  как это делается, например, в индийских нормах IS:800-2007. Коэффициент условий работы элемента  $\gamma_c$  для норм СП принят 1,0.

Ниже приведён расчёт на разрушение по сечению нетто в месте присоединения для образца А40-ВА-2 [15] сечением 120,82x40,26 мм. Количество болтов в соединении  $n_b = 4$ . Расстояние между поперечными рядами болтов 40 мм. В [15] не указано значение радиуса закругления. Примем  $r = 3$  мм. В расчёт принята толщина стали  $t = t_{nom} - t_{coat} = 2,4 - 0,04 = 2,36$  мм.

Радиус центральной линии закругления в местегиба  $r_{centerline} = r + t_{nom}/2 = 3 + 2,4/2 = 4,2$  мм.

Длина дуги закругления  $l_{centerline} = 1,57 r_{centerline} = 6,594$  мм.

Площадь дуги  $A_{round} = l_{centerline} r = 6,594 \cdot 2,36 = 15,56$  мм<sup>2</sup>.

Плоская часть стенки  $h_{flat} = h - 2(r + t_{nom}) = 120,82 - 2(3 + 2,4) = 110,02$  мм.

Плоская часть пояса  $b_{flat} = b - (r + t_{nom}) = 40,26 - (3 + 2,4) = 34,86$  мм.

Площадь полного сечения  $A = (h_{flat} + 2 b_{flat}) t + 2 A_{round} = (110,02 + 2 \cdot 34,86) \cdot 2,36 + 2 \cdot 15,56 = 455,306$  мм<sup>2</sup>.

Площадь сечения нетто  $A_n = A - 2 \cdot t \cdot d_0 = 455,306 - 2 \cdot 2,36 \cdot 14,3 = 387,81$  мм<sup>2</sup>.

Расчёт по СП 260:

Нормативное значение несущей способности элемента по неослабленному сечению

$$N_{gn} = A \cdot R_{ym} \cdot \gamma_c = 4,553 \cdot 32,8 \cdot 1 = 149,338 \text{ кН}$$

Расчётное значение несущей способности элемента по неослабленному сечению

$$N_g = A \cdot R_y \cdot \gamma_c = 4,553 \cdot 32 \cdot 1 = 145,695 \text{ кН}$$

Нормативное значение несущей способности по ослабленному отверстиями сечению в месте прикрепления

$$N_n = A_n \cdot R_{ym} \cdot \gamma_c \cdot \gamma_{ct} = 3,878 \cdot 32,8 \cdot 1 \cdot 1,1 = 139,918 \text{ кН},$$

где  $\gamma_{ct}$  – коэффициент условий работы при расчёте по сечению, ослабленному отверстиями для болтов (п.6 Табл.1 СП 16).

Расчётное значение несущей способности по ослабленному отверстиями сечению в месте прикрепления

$$N = A_n \cdot R_y \cdot \gamma_c \cdot \gamma_{ct} = 3,878 \cdot 32 \cdot 1 \cdot 1,1 = 136,506 \text{ кН}.$$

Расчётное значение несущей способности элемента по смятию в контакте с болтом (п.10.1.1 [1])

$$N_{bp} = R_{bp} \cdot d_b \cdot \Sigma t \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c \cdot n_b = 43,684 \cdot 1,12 \cdot 0,236 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 4 = 41,568 \text{ кН}$$

где  $R_{bp} = f_u / \gamma_m = 43,684$  кН/см<sup>2</sup> (п.10.1.1 [1]);  $d_b = 11,2$  мм (внутренний диаметр резьбы (п.10.1.1 [1]));  $\gamma_b$  по Таблице 41 СП 16:  $a$  принято  $2d_0$ ; тогда  $\gamma_b = 0,5 a/d_b = 1,0$ .  $\gamma_b = 1,0 \cdot 0,9 = 0,9$  (см. Примечание 1 к Таблице 41). В [15] указывается, что исчерпание несущей способности в экспериментальных образцах происходило от разрыва элемента в месте прикрепления по ослабленному отверстиями сечению. Поэтому в Таблице 2.1.2 также приведена несущая способность по ослабленному сечению в месте прикрепления  $N$ , вычисленная в программе.

Расчёт по СП 16:

$$\text{Нормативное значение несущей способности } N_n = A_n \cdot R_{ym} \cdot \gamma_c \cdot \gamma_{ct} = 3,878 \cdot 32,8 \cdot 1 \cdot 1,1 = 139,918 \text{ кН},$$

где  $\gamma_{ct}$  – коэффициент условий работы при расчёте по сечению, ослабленному отверстиями для болтов (п.6 Табл.1 СП16).

$$\text{Расчётное значение несущей способности } N = A_n \cdot R_y \cdot \gamma_c \cdot \gamma_{ct} = 3,878 \cdot 32,8/1,05 \cdot 1 \cdot 1,1 = 133,255 \text{ кН}.$$

Расчёт по EC3:

Коэффициент  $\beta_2$  определяется по Табл. 3.8 [5]. Из интерполяционного расчёта  $\beta_2 = 0,436$ .

Нормативное значение несущей способности  $N_{uR} = \beta_2 \cdot A_n \cdot f_u = 0,436 \cdot 3,878 \cdot 44,777 = 75,709$  кН.

Расчётное значение несущей способности  $N_{uRd} = \beta_2 \cdot A_n \cdot f_u / \gamma_{M2} = 0,436 \cdot 3,878 \cdot 44,777 / 1,25 = 60,567$  кН.

Расчёт по AISI S100:

Положение центра тяжести швеллера вдоль оси симметрии относительно центральной линии стенки

$$x_{cg} = \frac{2(c_1 A_{round} + (0,5b_{flat} + r_{centerline})b_{flat} t)}{t(h_{flat} + 2b_{flat}) + 2A_{round}} = 7,82 \text{ мм},$$

где  $c_1$  – расстояние от центральной линии стенки до центра тяжести дуги закругления:  $c_1 = r_{centerline} - c = 1,525$  мм,  $c = 0,637$  мм,  $r_{centerline} = 2,675$  мм.

Расстояние от плоскости соприкосновения элемента с фасонкой до центра тяжести сечения  $x = x_{cg} + t_{nom}/2 = 9,02$  мм.

Редукционный коэффициент (Таб. J6.2-1 [7])

$$U_{sl} = \frac{1}{1,1 + \frac{b_f}{b_w + 2b_f} + \frac{x}{L}} = \frac{1}{1,1 + \frac{40,26}{120,82 + 2 \cdot 40,26} + \frac{9,02}{40}} = 0,655$$

Эффективная площадь сечения нетто  $A_e = A_n \cdot U = 387,81 \cdot 0,655 = 254,016$  мм<sup>2</sup>.

Номинальная несущая способность  $P_m = A_e \cdot F_u = 2,54016 \cdot 44,777 = 113,734$  кН (Eq.J6.2-1) [7].

Расчётная несущая способность

ASD:  $P_r = A_e \cdot F_u / \Omega = 51,231$  кН;

LRFD:  $P_r = \phi \cdot A_e \cdot F_u = 73,927$  кН.

Расчёт по Кулаку и Ву:

Площадь поясов с учётом половины дуги закругления  $A_0 = 2 \cdot t(b_{flat} + \pi/4 \cdot r_{centerline}) = 2 \cdot 2,36(34,86 + 3,14/4 \cdot 4,2) = 180,1$  мм<sup>2</sup>.

Площадь нетто стенки с учётом половины дуги закругления с каждой стороны

$A_{cn} = A_n - A_0 = 387,81 - 180,1 = 207,71$  мм<sup>2</sup>.

Значение  $\beta$  при двух рядах болтов  $\beta = 0,5$ .

Расчётная несущая способность

$N_{tr} = 0,9 \cdot f_u \cdot A_{cn} / \gamma_{M1} + \beta \cdot f_y \cdot A_0 / \gamma_{M0} = 0,9 \cdot 44,777 \cdot 2,077 / 1,25 + 0,5 \cdot 32,8 \cdot 1,801 / 1,1 = 93,812$  кН.

Расчёт по Пану:

Редукционный коэффициент

$U = (1,15 - 0,86(x/L) - 0,14(W_u/W_c)) = 1,15 - 0,86(9,02/40) - 0,14(2(40,26 - 2,4)/120,82) = 0,868$ .

Расчётная несущая способность

$P_r = \phi \cdot U \cdot A_n \cdot f_u = 0,65 \cdot 0,868 \cdot 3,878 \cdot 44,777 = 97,971$  кН.

Расчёт по Теху и Джильберту:

$$P_{tr} = \phi A_n f_u \left[ \frac{1}{1,1 + \frac{W_f}{W_c + 2W_f} + \frac{x}{L}} \right] =$$

$= 0,65 \cdot 3,878 \cdot 44,777 (1 / (1,1 + (40,26 - 2,4) / (120,82 + 2(40,26 - 2,4)) + 9,02/40)) = 74,325$  кН.

Сопоставление результатов, полученных выше, с результатами по CFSSteel приведено в Таблице 2.1.1.

Таблица 2.1.1 – Сопоставление результатов

Наименование показателя	Обозн.	Ед. изм.	Ручной расчет	CFSteel	Расхождение, %
Площадь полного сечения	$A$	см <sup>2</sup>	4,553	4,553	0
Площадь сечения нетто	$A_n$	см <sup>2</sup>	3,878	3,878	0
Расстояние между плоскостью соприкосновения элемента с фасонкой и центром тяжести сечения швеллера	$x$	мм	9,02	9,12	1,1
СП 260					
Расчётное значение несущей способности элемента по неослабленному сечению	$N_g$	кН	145,695	145,696	0
Расчётное значение несущей способности по ослабленному отверстиями сечению в месте прикрепления	$N$	кН	136,506	136,516	0,01
Расчётное значение несущей способности элемента по смятию в контакте с болтом	$N_{bp}$	кН	41,568	41,692	0,3
СП16					
Расчётное значение несущей способности	$N$	кН	133,255	133,256	0
ЕС3					
Расчётное значение несущей способности	$N_{urd}$	кН	60,567	60,525	0,07
AISI S100					
Редукционный коэффициент	$U$	-	0,9	0,9	0
Расчётная несущая способность ASD	$P_r$	кН	51,231	51,26	0,06
Расчётная несущая способность LRFD	$P_r$	кН	73,927	73,898	0,04
Кулак и Ву					
Площадь поясов с учётом половины дуги закругления	$A_o$	см <sup>2</sup>	1,801	1,801	0
Площадь нетто стенки с учётом половины дуги закругления с каждой стороны	$A_{cn}$	см <sup>2</sup>	2,077	2,077	0
Расчётная несущая способность	$N_{tr}$	кН	93,812	93,821	0,01
Пан					
Редукционный коэффициент	$U$	-	0,868	0,866	0,2
Расчётная несущая способность	$P_{tr}$	кН	97,971	97,771	0,2
Тех и Джилберт					
Расчётная несущая способность	$P_{tr}$	кН	74,325	74,230	0,1

Результаты расчёта по CFSteel экспериментальных образцов [15] приведены в таблицах 2.1.2, 2.1.3 и 2.1.4.

Таблица 2.1.2 - Результаты расчёта по CFSteel экспериментальных образцов [15] (к-во болтов 4, шаг 40 мм)

Образец	Размеры, мм	t <sub>ном</sub> , мм	К-во болто в в соед.	Расст. м/у болта ми, мм	N <sub>exp</sub> , кН	Нормативное значение несущей способности								Расчётное значение несущей способности										
						N <sub>n</sub> , кН СП260	N <sub>exp</sub> /N <sub>n</sub>	N <sub>n</sub> , кН СП16	N <sub>exp</sub> /N <sub>n</sub>	N <sub>uR</sub> , кН EC3	N <sub>exp</sub> /N <sub>uR</sub>	P <sub>trn</sub> , кН AISI	N <sub>exp</sub> /P <sub>trn</sub>	N, кН СП260	N <sub>exp</sub> /N	N, кН СП16	N <sub>exp</sub> /N	N <sub>uRd</sub> , кН EC3	N <sub>exp</sub> /N <sub>uRd</sub>	P <sub>r</sub> , кН AISI	N <sub>exp</sub> /P <sub>r</sub>			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22			
A40-BA-2	120,82x40,26	2,4	4	40	99,05	139,929	0,71	139,93	0,71	75,66	1,31	113,69	0,87	136,516	0,73	133,27	0,74	60,53	1,64	73,898	1,34			
A40-BA-3	120,82x40,38				98,00	140,133	0,70	140,13	0,70	75,77	1,29	113,76	0,86	136,715	0,72	133,46	0,73	60,61	1,62	73,942	1,33			
B40-BA-1	100,22x40,30				96,62	122,456	0,79	122,46	0,79	66,21	1,46	96,53	1,00	119,47	0,81	116,63	0,83	52,97	1,82	62,743	1,54			
B40-BA-2	100,52x40,28				95,70	122,678	0,78	122,68	0,78	66,33	1,44	96,76	0,99	119,686	0,80	116,84	0,82	53,06	1,80	62,896	1,52			
B40-BA-3	100,72x40,35				95,70	122,967	0,78	122,97	0,78	66,49	1,44	96,97	0,99	119,968	0,80	117,11	0,82	53,19	1,80	63,032	1,52			
C60-BA-1	80,33x60,32				101,68	139,614	0,73	139,61	0,73	75,49	1,35	91,98	1,11	136,209	0,75	132,97	0,76	60,39	1,68	59,788	1,70			
C60-BA-2	80,67x60,48				99,15	140,176	0,71	140,18	0,71	75,79	1,31	92,32	1,07	136,757	0,72	133,50	0,74	60,63	1,64	60,006	1,65			
C60-BA-3	80,77x60,38				98,23	140,091	0,70	140,09	0,70	75,74	1,30	92,34	1,06	136,674	0,72	133,42	0,74	60,60	1,62	60,022	1,64			
C50-BA-1	80,45x50,33				93,63	122,703	0,76	122,70	0,76	66,34	1,41	86,66	1,08	119,71	0,78	116,86	0,80	53,07	1,76	56,331	1,66			
C50-BA-2	80,28x50,33				95,70	122,559	0,78	122,56	0,78	66,27	1,44	86,53	1,11	119,569	0,80	116,72	0,82	53,01	1,81	56,245	1,70			
C50-BA-3	80,38x50,19				97,31	122,405	0,79	122,41	0,79	66,18	1,47	86,53	1,12	119,42	0,81	116,58	0,83	52,95	1,84	56,243	1,73			
C40-BA-2	80,55x40,35				94,78	105,793	0,90	105,79	0,90	57,2	1,66	80,51	1,18	103,213	0,92	100,756	0,94	45,76	2,07	52,330	1,81			
C40-BA-3	80,38x40,34				93,63	105,631	0,89	105,63	0,89	57,11	1,64	80,36	1,17	103,055	0,91	100,60	0,93	45,69	2,05	52,236	1,79			
Среднее значение							0,77		0,77		1,42		1,047		0,79		0,81		1,78		1,61			
Среднеквадратическое отклонение							0,06		0,065		0,119		0,100		0,07		0,068		0,149		0,154			
Коэффициент вариаций							0,084		0,084		0,084		0,096		0,084		0,084		0,084		0,096			

Таблица 2.1.2 (продолжение)

Образец	Размеры, мм	t <sub>ном</sub> , мм	К-во болтов в соед.	Расст. м/у болтами, мм	N <sub>exp</sub> , кН	Нормативное значение несущей способности						Расчётное значение несущей способности								
						N <sub>trn</sub> , кН [K&W]	N <sub>exp</sub> /N <sub>trn</sub>	P <sub>trn</sub> , кН [Pan]	N <sub>exp</sub> /P <sub>trn</sub>	P <sub>trn</sub> , кН [T&G]	N <sub>exp</sub> /P <sub>trn</sub>	N <sub>tr</sub> , кН [K&W]	N <sub>exp</sub> /N <sub>tr</sub>	P <sub>tr</sub> , кН [Pan]	N <sub>exp</sub> /P <sub>tr</sub>	P <sub>tr</sub> , кН [T&G]	N <sub>exp</sub> /P <sub>tr</sub>			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
A40-BA-2	120,82x40,26	2,4	4	40	99,05	130,43	0,76	151,70	0,65	114,97	0,86	100,28	0,99	98,60	1,00	74,73	1,33			
A40-BA-3	120,82x40,38				98,00	130,52	0,75	151,73	0,65	115,03	0,85	115,03	0,85	100,37	0,98	98,62	0,99	74,77	1,31	
B40-BA-1	100,22x40,30				96,62	108,69	0,89	127,08	0,76	97,62	0,99	84,64	1,14	82,60	1,17	63,45	1,52			
B40-BA-2	100,52x40,28				95,70	108,99	0,88	127,43	0,75	97,86	0,98	84,85	1,13	82,83	1,16	63,61	1,50			
B40-BA-3	100,72x40,35				95,70	109,26	0,88	127,68	0,75	98,07	0,98	85,05	1,13	83,00	1,15	63,74	1,50			
C60-BA-1	80,33x60,32				101,68	103,17	0,99	94,03	1,08	92,54	1,10	83,59	1,22	61,12	1,66	60,15	1,69			
C60-BA-2	80,67x60,48				99,15	103,65	0,96	94,32	1,05	92,87	1,07	83,96	1,18	61,31	1,62	60,37	1,64			
C60-BA-3	80,77x60,38				98,23	103,68	0,95	94,56	1,04	92,90	1,06	83,97	1,17	61,46	1,60	60,39	1,63			
C50-BA-1	80,45x50,33				93,63	95,56	0,98	101,64	0,92	87,36	1,07	76,65	1,22	66,07	1,42	56,79	1,65			
C50-BA-2	80,28x50,33				95,70	95,38	1,00	101,43	0,94	87,23	1,10	76,53	1,25	65,93	1,45	56,70	1,69			
C50-BA-3	80,38x50,19				97,31	95,38	1,02	101,62	0,96	87,23	1,12	76,5	1,27	66,05	1,47	56,70	1,72			
C40-BA-2	80,55x40,35				94,78	87,94	1,08	103,35	0,92	81,40	1,16	69,73	1,36	67,18	1,41	52,91	1,79			
C40-BA-3	80,38x40,34				93,63	87,75	1,07	103,15	0,91	81,26	1,15	69,57	1,35	67,04	1,40	52,82	1,77			
Среднее значение							0,94		0,88		1,04		1,18		1,35		1,60			
Среднеквадратическое отклонение							0,103		0,148		0,100		0,116		0,228		0,154			
Коэффициент вариаций							0,110		0,169		0,096		0,098		0,169		0,096			

Таблица 2.1.3 - Результаты расчёта по CFSteel экспериментальных образцов [15] (к-во болтов 4, шаг 80 мм)

Образец	Размеры, мм	t <sub>ном</sub> , мм	К-во болтов в соед.	Расст. м/у болтами, мм	N <sub>exp</sub> , кН	Нормативное значение несущей способности						Расчётное значение несущей способности					
						N <sub>n</sub> , кН СП260	N <sub>exp</sub> /N <sub>n</sub>	N <sub>uR</sub> , кН EC3	N <sub>exp</sub> /N <sub>uR</sub>	P <sub>tr</sub> , кН AISI	N <sub>exp</sub> /P <sub>tr</sub>	N, кН СП260	N <sub>exp</sub> /N	N <sub>uRd</sub> , кН EC3	N <sub>exp</sub> /N <sub>uRd</sub>	P <sub>r</sub> , кН AISI	N <sub>exp</sub> /P <sub>r</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
C50-CA-1	79,85x50,37	2,4	4	80	121,00	111,61	1,08	106,21	1,14	96,683	1,25	119,78	1,01	84,97	1,42	62,844	1,93
C50-CA-2	79,85x50,34				119,85	111,56	1,07	106,17	1,13	96,657	1,24	119,73	1,00	84,93	1,41	62,827	1,91
C50-CA-3	79,78x50,33				118,93	111,49	1,07	106,10	1,12	96,589	1,23	119,65	0,99	84,88	1,40	62,783	1,89
C40-CA-2	79,87x40,28				115,71	96,01	1,21	91,30	1,27	87,442	1,32	103,03	1,12	73,04	1,58	56,837	2,04
C40-CA-3	79,90x40,34				116,40	96,12	1,21	91,41	1,27	87,523	1,33	103,15	1,13	73,13	1,59	56,890	2,05
Среднее значение						1,03			1,19		1,275		1,051		1,48		1,962
Среднеквадратическое отклонение							0,067		0,077		0,048		0,068		0,097		0,073
Коэффициент вариаций							0,065		0,065		0,037		0,065		0,065		0,037

Таблица 2.1.3 (окончание)

Образец	Размеры, мм	t <sub>ном</sub> , мм	К-во болтов в соед.	Расст. м/у болтами, мм	N <sub>exp</sub> , кН	Нормативное значение несущей способности						Расчётное значение несущей способности					
						N <sub>trn</sub> , кН [K&W]	N <sub>exp</sub> /N <sub>trn</sub>	P <sub>trn</sub> , кН [Pan]	N <sub>exp</sub> /P <sub>trn</sub>	P <sub>trn</sub> , кН [T&G]	N <sub>exp</sub> /P <sub>trn</sub>	N <sub>tr</sub> , кН [K&W]	N <sub>exp</sub> /N <sub>tr</sub>	P <sub>tr</sub> , кН [Pan]	N <sub>exp</sub> /P <sub>tr</sub>	P <sub>tr</sub> , кН [T&G]	N <sub>exp</sub> /P <sub>tr</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
C50-CA-1	79,85x50,37	2,4	4	80	121,00	94,96	1,27	125,71	0,96	97,56	1,24	76,23	1,59	81,71	1,48	63,41	1,91
C50-CA-2	79,85x50,34				119,85	94,94	1,26	125,70	0,95	97,53	1,23	76,21	1,57	81,70	1,47	63,40	1,89
C50-CA-3	79,78x50,33				118,93	94,85	1,25	125,6	0,95	97,46	1,22	76,14	1,56	81,64	1,46	63,35	1,88
C40-CA-2	79,87x40,28				115,71	87,17	1,33	118,28	0,98	88,51	1,31	69,14	1,67	76,88	1,51	57,53	2,01
C40-CA-3	79,90x40,34				116,40	87,25	1,33	118,37	0,98	88,59	1,31	69,21	1,68	76,94	1,51	57,58	2,02
Среднее значение						1,29			0,97		1,26		1,62		1,48		1,94
Среднеквадратическое отклонение							0,038		0,016		0,045		0,058		0,024		0,069
Коэффициент вариаций							0,029		0,016		0,036		0,036		0,016		0,036

Таблица 2.1.4 - Результаты расчёта по CFSteel экспериментальных образцов [15] (к-во болтов 6, шаг 40 мм)

Образец	Размеры, мм	t <sub>ном</sub> , мм	К-во болтов в соед.	Расст. м/у болтами, мм	N <sub>exp</sub> , кН	Нормативное значение несущей способности						Расчётное значение несущей способности					
						N <sub>n</sub> , кН С1260	N <sub>exp</sub> /N <sub>n</sub>	N <sub>uR</sub> , кН EC3	N <sub>exp</sub> /N <sub>uR</sub>	P <sub>m</sub> , кН AISI	N <sub>exp</sub> /P <sub>m</sub>	N, кН С1260	N <sub>exp</sub> /N	N <sub>uRd</sub> , кН EC3	N <sub>exp</sub> /N <sub>uRd</sub>	P <sub>r</sub> , кН AISI	N <sub>exp</sub> /P <sub>r</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
C60-DA-2	80,35x60,43	2,4	6	40	124,91	127,572	0,98	73,53	1,70	105,63	1,18	136,907	0,91	58,83	2,12	68,66	1,82
C60-DA-3	80,42x60,35				126,06	127,502	0,99	73,49	1,72	105,62	1,19	136,832	0,92	58,80	2,14	68,66	1,84
C50-DA-1	80,02x50,28				117,32	111,603	1,05	64,30	1,82	96,74	1,21	119,969	0,98	51,44	2,28	62,88	1,87
C50-DA-2	79,87x50,47				121,12	111,781	1,08	64,40	1,88	96,79	1,25	119,96	1,01	51,52	2,35	62,91	1,93
C50-DA-3	79,87x50,40				121,23	111,672	1,09	64,34	1,88	96,73	1,25	119,844	1,01	51,47	2,36	62,87	1,93
C40-DA-1	80,00x40,29				112,49	96,121	1,17	55,34	2,03	87,56	1,28	111,462	1,01	44,27	2,54	56,92	1,98
C40-DA-2	79,93x40,33				117,32	96,129	1,22	55,34	2,12	87,54	1,34	103,163	1,14	44,28	2,65	56,90	2,06
C40-DA-3	79,92x40,33				114,79	96,121	1,19	55,34	2,07	87,53	1,31	103,154	1,11	44,27	2,59	56,90	2,02
Среднее значение							1,097		1,90		1,25		1,012		2,38		1,93
Среднеквадратическое отклонение							0,091		0,159		0,056		0,080		0,199		0,087
Коэффициент вариаций							0,083		0,084		0,045		0,079		0,084		0,045

Таблица 2.1.4 (окончание)

Образец	Размеры, мм	t <sub>ном</sub> , мм	К-во болтов в соед.	Расст. м/у болтами, мм	N <sub>exp</sub> , кН	Нормативное значение несущей способности						Расчётное значение несущей способности					
						N <sub>trn</sub> , кН [K&W]	N <sub>exp</sub> /N <sub>trn</sub>	P <sub>trn</sub> , кН [Pan]	N <sub>exp</sub> /N <sub>trn</sub>	P <sub>trn</sub> , кН [T&G]	N <sub>exp</sub> /P <sub>trn</sub>	N <sub>tr</sub> , кН [K&W]	N <sub>exp</sub> /N <sub>tr</sub>	P <sub>tr</sub> , кН [Pan]	N <sub>exp</sub> /P <sub>tr</sub>	P <sub>tr</sub> , кН [T&G]	N <sub>exp</sub> /P <sub>tr</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
C60-DA-2	80,35x60,43	2,4	6	40	124,91	127,94	0,98	130,11	0,96	106,37	1,17	106,11	1,18	84,57	1,48	69,14	1,81
C60-DA-3	80,42x60,35				126,06	127,92	0,99	130,19	0,97	106,36	1,19	106,08	1,19	84,62	1,49	69,13	1,82
C50-DA-1	80,02x50,28				117,32	115,81	1,01	125,89	0,93	97,62	1,20	95,14	1,23	81,83	1,43	63,46	1,85
C50-DA-2	79,87x50,47				121,12	115,87	1,05	125,80	0,96	97,66	1,24	95,23	1,27	81,77	1,48	63,48	1,91
C50-DA-3	79,87x50,40				121,23	115,79	1,05	125,76	0,96	97,6	1,24	95,16	1,27	81,74	1,48	63,44	1,91
C40-DA-1	80,00x40,29				112,49	104,19	1,08	118,45	0,95	88,63	1,27	84,58	1,33	76,99	1,46	57,61	1,95
C40-DA-2	79,93x40,33				117,32	104,16	1,13	118,40	0,99	88,61	1,32	84,57	1,39	76,96	1,52	57,59	2,04
C40-DA-3	79,92x40,33				114,79	104,15	1,10	118,39	0,97	88,60	1,30	84,57	1,36	76,95	1,49	57,59	1,99
Среднее значение							1,05		0,96		1,24		1,28		1,48		1,91
Среднеквадратическое отклонение							0,054		0,017		0,053		0,077		0,026		0,082
Коэффициент вариаций							0,051		0,018		0,043		0,060		0,018		0,043

**Задание 2.1.2.** В программе CFSteel выполнить расчёты растянутых элементов, испытанных в работе Teh, L. H., Gilbert, B.P. Net section capacity of cold-reduced sheet steel channel braces bolted at the web / L. H. Teh, B.P. Gilbert // Journal of Structural Engineering, ASCE, 2013, pp. 740-747 [16]. Сравнить результаты, полученные в программе по разным методикам между собой, а также с экспериментальными данными.

Элементы выполнены из холодногнутых профилей с поперечным сечением в виде швеллера высотой  $W_c=80, 100$  и  $120$  мм с шириной поясов  $W_f$  от  $20$  до  $50$  мм и номинальной толщиной  $1,5$  и  $3$  мм. По данным [16]  $t_{base}$  составляет  $1,48$  мм и  $2,95$  мм соответственно. Радиусы закругления  $r=2$  мм при  $t_{nom}=1,5$  мм и  $r=3$  мм при  $t_{nom}=3$  мм. Прикрепление элемента осуществляется к пластине толщиной  $6$  мм с помощью четырёх болтов, расположенных в два ряда в поперечном и продольном направлении (Рисунок 2.1.3). Расстояние между продольными рядами для швеллера высотой  $h=80$  мм составляет  $40$  мм, для швеллеров  $h=100$  и  $120$  мм –  $50$  мм. Диаметр отверстия  $d_0=17$  мм. Расстояние между поперечными рядами  $L$  варьируется и составляет  $50, 75$  и  $100$  мм. Элементы выполнены из листовой оцинкованной стали с прочностными характеристиками: для  $t_{nom}=1,5$  мм предел текучести  $f_y=605$  МПа, предел прочности  $f_u=630$  МПа ( $f_u / f_y=1,04$ ); для  $t_{nom}=3$  мм  $f_y=530$  МПа,  $f_u=580$  МПа ( $f_u / f_y=1,09$ ). Данные значения получены по результатам испытаний стандартных образцов. В [16] указывается, что разрушение всех испытанных образцов происходило от разрыва по ослабленному отверстиями сечению в месте прикрепления. Характерный вид разрушения представлен на Рисунке 2.1.4.

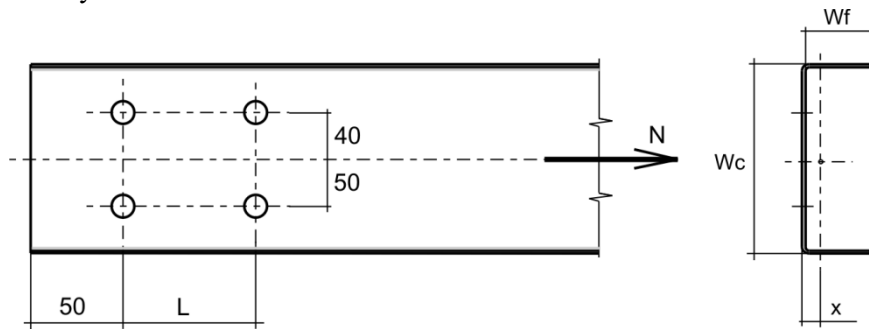


Рисунок 2.1.3 – Размеры испытанных в [16] образцов

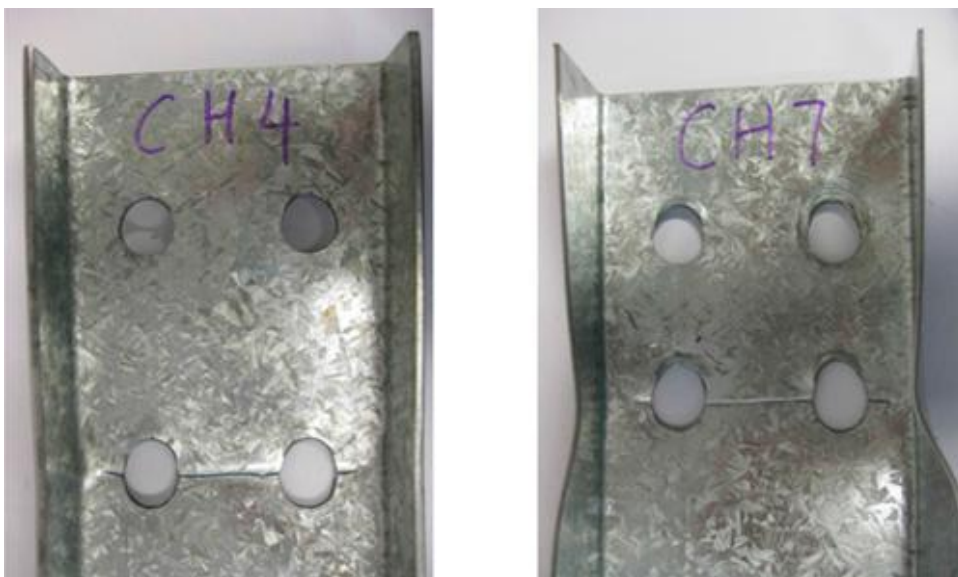


Рисунок 2.1.4 – Характерный вид разрушения испытанных в [16] образцов  $t_{nom}=3$  мм и  $t_{nom}=1,5$  мм



*Расчёт:* В программе CFSteel выполнен расчёт по нормам СП 260 [1], EC3 [4,5], AISI S100 [7], а также методикам, предложенным Кулаком и Ву [14], Паном [15], Техом и Джильбертом [16]. Определялось нормативное значение несущей способности элементов по ослабленному отверстиями для болтов сечению в месте прикрепления, а также соответствующее расчётное значение. Для вычисления расчётного значения по СП 260 учтён коэффициент надёжности по материалу  $\gamma_m=1,05$ , по EC3 частный коэффициент  $\gamma_{M2}=1,25$ , а по AISI S100 коэффициент сопротивления  $\phi_t=0,65$ , также как и по методикам Пана, Теха и Джильберта. В методике Кулака и Ву для определения расчётного значения ослабленная часть сечения домножается на коэффициент  $0,9$  и делится на частный коэффициент  $\gamma_{M1}=1,25$ ; неослабленная часть делится на  $\gamma_{M0}=1,1$  как это делается, например, в индийских нормах IS:800-2007.

В [16] экспериментальные значения несущей способности в явном виде не приведены. Представлены лишь коэффициенты, равные отношению экспериментального значения к полученному расчётным путём по различным методикам  $k = N_{\text{экс}} / N_{\text{расч}}$ . Также приведены размеры и геометрические характеристики испытанных образцов ( $W_c, W_f, x, A_n, L$ ). По этим данным без применения CFSteel вычислена несущая способность  $P_{nr}$  по рассматриваемым в [16] методикам: AISI, Пан, Тех и Джильберт (Таблицы 2.1.5, 2.1.8). Далее, перемножением  $P_{nr}$  на коэффициент  $k$  получена предполагаемая экспериментальная несущая способность  $P_{\text{exp}}$ . Среднее значение  $P_{\text{exp}}$  по трём методикам принято далее за экспериментальную несущую способность (таблицы 2.1.6 и 2.1.9).

Кроме того, значения  $P_{nr}$  рассчитаны также по CFSteel и приведены в таблицах 2.1.5 и 2.1.8. Расхождение между значениями по CFSteel и значениями, вычисленными по данным [16] для  $t_{\text{nom}}=1,5$  мм в среднем составляют 3%; для  $t_{\text{nom}}=3$  мм – 8%. Расхождение носит систематический характер. Анализ показывает, что в [16] расчёт геометрических характеристик ( $x, A_n$ ) проводился с некоторым упрощением. В то время, как в программе в явном виде без упрощений учитываются закругления в местахгиба. В дальнейшем будут приниматься значения несущей способности, определённые по CFSteel.

Таблица 2.1.5,а – Несущая способность испытанных в [16] образцов  $t_{\text{nom}}=1,5$  мм, вычисленная по методике AISI

Образец	Размеры сечения, мм	$W_c$ , мм	$W_f$ , мм	$x$ , мм	$L$ , мм	$A_n$ , мм <sup>2</sup>	$P_{nr}$ AISI, кН	$P_{\text{exp}} / P_{nr}$ AISI	$P_{\text{exp}}$ AISI, кН	$P_{nr}$ AISI / CFSteel, кН	$P_{\text{exp}} / P_{nr}$ AISI / CFSteel	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
CH1	100x30x1,5	100	30	6,28*	50	190*	109,73	0,75*	80,80	103,80	1,04	
CH3					75	185*	104,90	0,80*	83,92	103,80	1,01	
CH5					100	188*	106,60	0,83*	88,47	103,80	1,03	
CH7	100x40x1,5	100	40	9,56*	50	219*	124,74	0,68*	84,82	120,54	1,03	
CH11					100	217*	123,04	0,75*	92,28	120,54	1,02	
CH13	100x50x1,5	100	50	13,2*	50	248*	141,39	0,65*	91,90	137,33	1,03	
CH15					75	248*	140,62	0,68*	95,62	137,33	1,02	
CH17					100	246*	139,48	0,7*	97,64	137,33	1,02	
Среднее значение								0,73*			1,025	
Среднеквадратическое отклонение												0,009
Коэффициент вариаций								0,084*				0,009

\* По данным [16]

Элементы

Таблица 2.1.5,б – Несущая способность испытанных в [16] образцов  $t_{nom}=1,5$  мм, вычисленная по методике Пана

Образец	Размеры сечения, мм	$W_c$ , мм	$W_f$ , мм	$x$ , мм	$L$ , мм	$A_n$ , мм <sup>2</sup>	$P_{trn Pan}$ , кН	$P_{exp}/P_{trn Pan}$	$P_{exp Pan}$ , кН	$P_{trn Pan}$ CFSteel, кН	$P_{trn Pan} / P_{trn Pan}$ CFSteel
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CH1	100x30x1,5	100	30	6,28*	50	190*	114,67	0,70*	80,27	109,55	1,05
CH3					75	185*	115,85	0,73*	84,57	114	1,02
CH5					100	188*	119,86	0,74*	88,70	115,33	1,04
CH7	100x40x1,5	100	40	9,56*	50	219*	121,08	0,7*	84,75	115,79	1,05
CH11					100	217*	130,67	0,7*	91,47	127,41	1,03
CH13	100x50x1,5	100	50	13,2*	50	248*	122,33	0,75*	91,75	117,97	1,04
CH15					75	248*	134,15	0,72*	96,59	130,02	1,03
CH17					100	246*	138,94	0,73*	101,42	136,04	1,02
Среднее значение								0,72*	1,033		
Среднеквадратическое отклонение								0,011			
Коэффициент вариаций								0,024*	0,011		

\*По данным [16]

Таблица 2.1.5,в – Несущая способность испытанных в [16] образцов  $t_{nom}=1,5$  мм, вычисленная по методике Теха и Джилберта

Образец	Размеры сечения, мм	$W_c$ , мм	$W_f$ , мм	$x$ , мм	$L$ , мм	$A_n$ , мм <sup>2</sup>	$P_{trn T\&G}$ , кН	$P_{exp}/P_{trn T\&G}$	$P_{exp T\&G}$ , кН	$P_{trn T\&G}$ CFSteel, кН	$P_{trn T\&G} / P_{trn T\&G}$ CFSteel
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CH1	100x30x1,5	100	30	6,28*	50	190*	84,71	0,95*	80,47	81,07	1,04
CH3					75	185*	85,0	0,99*	84,15	83,72	1,02
CH5					100	188*	87,71	1*	87,71	85,11	1,03
CH7	100x40x1,5	100	40	9,56*	50	219*	91,58	0,93*	85,17	87,89	1,04
CH11					100	217*	96,42	0,95*	91,60	94,12	1,02
CH13	100x50x1,5	100	50	13,2*	50	248*	96,80	0,95*	91,96	93,87	1,03
CH15					75	248*	102,39	0,94*	96,24	99,49	1,03
CH17					100	246*	104,57	0,94*	98,30	102,56	1,02
Среднее значение								0,96*	1,030		
Среднеквадратическое отклонение								0,010			
Коэффициент вариаций								0,028*	0,010		

\*По данным [16]

Таблица 2.1.6 - Экспериментальные значения несущей способности

Образец	$P_{exp AISI}$ , кН	$P_{exp Pan}$ , кН	$P_{exp T\&G}$ , кН	Мах. разность, кН	Среднее значение $P_{exp}$ , кН
CH1	80,80	80,27	80,47	0,53	80,51
CH3	83,92	84,57	84,15	0,65	84,21
CH5	88,47	88,7	87,71	0,99	88,29
CH7	84,82	84,75	85,17	0,42	84,91
CH11	92,28	91,47	91,60	0,81	91,78
CH13	91,90	91,75	91,96	0,56	91,87
CH15	95,62	96,59	96,24	0,97	96,15
CH17	97,64	101,4	98,30	3,36	99,12
Среднее значение				1,04	

Элементы

Таблица 2.1.7,а – Сравнение экспериментальных значений несущей способности с результатами CFSteel по нормам СП 260, EC3 и AISI для  $t_{nom}=1,5$  мм

Обра зец	Размеры сечения, мм	N <sub>exp</sub> , кН	Нормативное значение несущей способности						Расчётное значение несущей способности					
			N <sub>n</sub> , кН СП 260	N <sub>exp</sub> / N <sub>n</sub>	N <sub>uR</sub> , кН EC3	N <sub>exp</sub> / N <sub>uR</sub>	P <sub>tn</sub> , кН AISI	N <sub>exp</sub> / P <sub>tn</sub>	N, кН СП260	N <sub>exp</sub> / N	N <sub>uRd</sub> , кН EC3	N <sub>exp</sub> / N <sub>uRd</sub>	P <sub>r</sub> , кН AISI	N <sub>exp</sub> / P <sub>r</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
СН1	100х30х1,5	80,51	108,06	0,75	52,24	1,54	79,63	1,01	113,21	0,71	41,79	1,93	51,76	1,56
СН3		84,21	108,06	0,78	72,59	1,16	82,06	1,03	113,21	0,74	58,07	1,45	53,34	1,58
СН5		88,29	108,06	0,82	80,73	1,09	83,34	1,06	113,21	0,78	64,58	1,37	54,17	1,63
СН7	100х40х1,5	84,91	125,97	0,67	60,67	1,40	86,66	0,98	131,97	0,64	48,54	1,75	56,33	1,51
СН11		91,78	125,97	0,73	93,76	0,98	92,51	0,99	131,97	0,70	75,01	1,22	60,13	1,53
СН13	100х50х1,5	91,87	143,88	0,64	69,11	1,33	92,82	0,99	150,73	0,61	55,29	1,66	60,33	1,52
СН15		96,15	143,88	0,67	96,04	1,00	98,17	0,98	150,73	0,64	76,83	1,25	63,81	1,51
СН17		99,12	143,88	0,69	106,81	0,93	101,09	0,98	150,73	0,66	85,45	1,16	65,71	1,51
Среднее значение					0,72		1,18		1,002		0,69		1,47	
Среднеквадратическое отклонение				0,061		0,222		0,028		0,058		0,277		0,044
Коэффициент вариаций				0,085		0,188		0,028		0,085		0,188		0,028

Таблица 2.1.7,б – Сравнение экспериментальных значений несущей способности с результатами CFSteel по методикам Кулака и Ву, Пана, Теха и Джилберта для  $t_{nom}=1,5$  мм

Обра зец	Размеры сечения, мм	N <sub>exp</sub> , кН	Нормативное значение несущей способности						Расчётное значение несущей способности					
			N <sub>trn</sub> , кН K&W	N <sub>exp</sub> / N <sub>trn</sub>	P <sub>trn</sub> , кН Pan	N <sub>exp</sub> / P <sub>trn</sub>	P <sub>trn</sub> , кН T&G	N <sub>exp</sub> / P <sub>trn</sub>	N <sub>tr</sub> , кН K&W	N <sub>exp</sub> / N <sub>tr</sub>	P <sub>tr</sub> , кН Pan	N <sub>exp</sub> / P <sub>tr</sub>	P <sub>tr</sub> , кН T&G	N <sub>exp</sub> / P <sub>tr</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
СН1	100х30х1,5	80,51	98,56	0,82	109,55	0,73	81,07	0,99	76,66	1,05	71,21	1,13	52,70	1,53
СН3		84,21	98,56	0,85	114	0,74	83,72	1,01	76,66	1,10	74,10	1,14	54,42	1,55
СН5		88,29	98,56	0,90	115,33	0,77	85,11	1,04	76,66	1,15	74,96	1,18	55,32	1,60
СН7	100х40х1,5	84,91	107,49	0,79	115,79	0,73	87,89	0,97	84,78	1,00	75,26	1,13	57,13	1,49
СН11		91,78	107,49	0,85	127,41	0,72	94,12	0,98	84,78	1,08	82,82	1,11	61,18	1,50
СН13	100х50х1,5	91,87	116,45	0,79	117,97	0,78	93,87	0,98	92,92	0,99	76,68	1,20	61,02	1,51
СН15		96,15	116,45	0,83	130,02	0,74	99,49	0,97	92,92	1,03	84,51	1,14	64,67	1,49
СН17		99,12	116,45	0,85	136,04	0,73	102,56	0,97	92,92	1,07	88,43	1,12	66,66	1,49
Среднее значение					0,84		0,74		0,99		1,06		1,14	
Среднеквадратическое отклонение				0,036		0,020		0,025		0,053		0,030		0,039
Коэффициент вариаций				0,044		0,026		0,025		0,050		0,026		0,025

Элементы

Таблица 2.1.8,а – Несущая способность испытанных в [16] образцов  $t_{nom}=3$  мм, вычисленная по методике AISI

Образец	Размеры сечения, мм	$W_c$ , мм	$W_f$ , мм	$x$ , мм	$L$ , мм	$A_n$ , мм <sup>2</sup>	$P_{rn AISI}$ , кН	$P_{exp}/P_{rn AISI}$	$P_{exp AISI}$ , кН	$P_{rn AISI}$ CFSteel, кН	$P_{rn AISI}/P_{rn AISI}$ CFSteel	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
CH2	100x30x3	100	30	6,9	50	381	198,88	0,81	161,09	188,11	1,06	
CH4					75	386	201,49	0,86	173,28	188,11	1,07	
CH6					100	389	203,06	0,88	178,69	188,11	1,08	
CH8	100x40x3	100	40	10,2	50	449	234,38	0,71	166,41	218,91	1,07	
CH10					75	450	234,90	0,76	178,52	218,91	1,07	
CH12					100	450	234,90	0,83	194,97	218,91	1,07	
CH14	100x50x3	100	50	13,9	50	502	262,04	0,67	175,57	247,49	1,06	
CH16					75	507	264,65	0,71	187,90	249,71	1,06	
CH18					100	501	261,52	0,71	185,68	249,71	1,05	
CH19	80x40x3	80	40	11,4	40	408	212,36	0,69	146,53	197,63	1,07	
CH20					60	392	204,62	0,72	147,33	200,43	1,02	
CH21					80	407	212,45	0,73	155,09	200,43	1,06	
CH22	80x20x3	80	20	4,6	40	290	151,38	0,84	127,16	138,84	1,09	
CH23					60	287	149,81	0,91	136,33	138,84	1,08	
CH24					80	294	153,47	0,95	145,79	138,83	1,11	
CH25	120x40x3	120	40	9,3	50	506	264,13	0,79	208,66	249,71	1,06	
CH26					75	500	261,00	0,81	211,41	249,71	1,05	
CH27					100	502	262,04	0,83	217,50	249,71	1,05	
Среднее значение								0,78*			1,07	
Среднеквадратическое отклонение												0,019
Коэффициент вариаций								0,096*				0,018

\*По данным [16]

Таблица 2.1.8,б – Несущая способность испытанных в [16] образцов  $t_{nom}=3$  мм, вычисленная по методике Пана

Образец	Размеры сечения, мм	$W_c$ , мм	$W_f$ , мм	$x$ , мм	$L$ , мм	$A_n$ , мм <sup>2</sup>	$P_{rn Pan}$ , кН	$P_{exp}/P_{rn Pan}$	$P_{exp Pan}$ , кН	$P_{rn Pan}$ CFSteel, кН	$P_{rn Pan}/P_{rn Pan}$ CFSteel	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
CH2	100x30x3	100	30	6,9	50	381	209,34	0,77	161,19	194,63	1,08	
CH4					75	386	220,94	0,78	172,34	204,03	1,08	
CH6					100	389	227,12	0,78	177,16	208,72	1,09	
CH8	100x40x3	100	40	10,2	50	449	224,63	0,75	168,47	205,39	1,09	
CH10					75	450	240,39	0,74	177,89	221,08	1,09	
CH12					100	450	248,02	0,74	183,54	228,93	1,08	
CH14	100x50x3	100	50	13,9	50	502	224,46	0,78	175,08	208,66	1,08	
CH16					75	507	250,13	0,75	187,60	232,51	1,08	
CH18					100	501	258,75	0,72	186,30	244,44	1,06	
CH19	80x40x3	80	40	11,4	40	408	181,01	0,81	146,61	165,03	1,10	
CH20					60	392	192,48	0,76	146,29	185	1,04	
CH21					80	407	209,49	0,74	155,02	194,98	1,07	
CH22	80x20x3	80	20	4,6	40	290	165,02	0,78	128,72	148,86	1,11	
CH23					60	287	168,80	0,81	136,73	154,26	1,09	
CH24					80	294	175,73	0,83	145,86	154,26	1,14	
CH25	120x40x3	120	40	9,3	50	506	263,17	0,8	210,53	244,22	1,08	
CH26					75	500	275,51	0,77	212,14	260,54	1,06	
CH27					100	502	284,37	0,77	218,97	268,7	1,06	
Среднее значение								0,77*			1,08	
Среднеквадратическое отклонение												0,022
Коэффициент вариаций								0,039*				0,020

\*По данным [16]

Элементы

Таблица 2.1.8,в – Несущая способность испытанных в [16] образцов  $t_{nom}=3$  мм, вычисленная по методике Теха и Джильберта

Обра зец	Размеры сечения, мм	$W_c$ , мм	$W_f$ , мм	$x$ , мм	L, мм	$A_n$ , мм <sup>2</sup>	$P_{trn T\&G}$ , кН	$P_{exp}/$ $P_{trn T\&G}$	$P_{exp T\&G}$ , кН	$P_{trn T\&G}$ CFSteel, кН	$P_{trn T\&G}/$ $P_{trn T\&G}$ CFSteel	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
CH2	100x30x3	100	30	6,9	50	381	155,02	1,04	161,22	144,72	1,07	
CH4					75	386	162,29	1,07	173,65	150,15	1,08	
CH6					100	389	166,33	1,07	177,97	153,03	1,09	
CH8	100x40x3	100	40	10,2	50	449	170,63	0,98	167,22	157,19	1,09	
CH10					75	450	178,99	1	178,99	165,21	1,08	
CH12					100	450	183,26	1	183,26	169,52	1,08	
CH14	100x50x3	100	50	13,9	50	502	178,85	0,98	175,27	168,16	1,06	
CH16					75	507	191,53	0,98	187,70	179,01	1,07	
CH18					100	501	195,15	0,96	187,35	184,97	1,06	
CH19	80x40x3	80	40	11,4	40	408	144,73	1,02	147,63	133,94	1,08	
CH20					60	392	147,64	0,99	146,16	142,9	1,03	
CH21					80	407	158,16	0,98	155,00	147,84	1,07	
CH22	80x20x3	80	20	4,6	40	290	121,74	1,05	127,82	109,92	1,11	
CH23					60	287	123,92	1,1	136,31	113,61	1,09	
CH24					80	294	128,78	1,13	145,52	115,54	1,11	
CH25	120x40x3	120	40	9,3	50	506	197,50	1,06	209,35	184,33	1,07	
CH26					75	500	203,65	1,04	211,80	193,11	1,05	
CH27					100	502	209,02	1,04	217,38	197,82	1,06	
Среднее значение								1,02*			1,08	
Среднеквадратическое отклонение												0,019
Коэффициент вариаций								0,045*				0,018

\*По данным [16]

Таблица 2.1.9 - Экспериментальные значения несущей способности

Обра зец	$P_{exp AISI}$ , кН	$P_{exp Pan.}$ , кН	$P_{exp T\&G}$ , кН	Мах разность, кН	Среднее значение $P_{exp}$ , кН
CH2	161,09	161,19	161,22	0,13	161,17
CH4	173,28	172,34	173,65	1,31	173,09
CH6	178,69	177,16	177,97	1,53	177,94
CH8	166,41	168,47	167,22	2,06	167,37
CH10	178,52	177,89	178,99	1,1	178,47
CH12	-	183,54	183,26	0,28	183,4
CH14	175,57	175,08	175,27	0,49	175,31
CH16	187,90	187,60	187,70	0,3	187,73
CH18	185,68	186,30	187,35	1,67	186,44
CH19	146,53	146,61	147,63	1,1	146,92
CH10	147,33	146,29	146,16	1,17	146,59
CH21	155,09	155,02	155,00	0,09	155,04
CH22	127,16	128,72	127,82	1,56	127,90
CH23	136,33	136,73	136,31	0,42	136,46
CH24	145,79	145,86	145,52	0,34	145,72
CH25	208,66	210,53	209,35	1,87	209,51
CH26	211,41	212,14	211,80	0,66	211,78
CH27	217,50	218,97	217,38	1,59	217,95
Среднее значение				0,98	

Элементы

Таблица 2.1.10,а – Сравнение экспериментальных значений несущей способности с результатами CFSteel по нормам СП 260, EC3 и AISI для  $t_{ном}=3$  мм

Обра зец	Размеры сечения, мм	$N_{exp}$ , кН	Нормативное значение несущей способности						Расчётное значение несущей способности						
			$N_n$ , кН СП260	$N_{exp}/N_n$	$N_{uR}$ , кН EC3	$N_{exp}/N_{uR}$	$P_m$ , кН AISI	$N_{exp}/P_m$	$N$ , кН СП260	$N_{exp}/N$	$N_{uRd}$ , кН EC3	$N_{exp}/N_{uRd}$	$P_r$ , кН AISI	$N_{exp}/P_r$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
CH2	100x30x3	161,17	181,77	0,89	94,67	1,70	139,53	1,16	190,43	0,85	75,74	2,13	90,69	1,78	
CH4		173,09	181,77	0,95	131,56	1,32	144,18	1,20	190,43	0,91	105,25	1,64	93,72	1,85	
CH6		177,94	181,77	0,98	146,31	1,22	146,63	1,21	190,43	0,93	117,05	1,52	95,31	1,87	
CH8	100x40x3	167,37	213,04	0,79	110,17	1,52	152,74	1,10	223,19	0,75	88,14	1,90	99,28	1,69	
CH10		178,47	213,04	0,84	153,09	1,17	159,87	1,12	223,19	0,80	122,47	1,46	103,91	1,72	
CH12		183,40	213,04	0,86	170,26	1,08	163,68	1,12	223,19	0,82	136,21	1,35	106,40	1,72	
CH14	100x50x3	175,31	244,31	0,72	125,67	1,40	164,29	1,07	255,94	0,68	100,54	1,74	106,79	1,64	
CH16		187,73	244,31	0,77	174,63	1,08	174,19	1,08	255,94	0,73	139,70	1,34	113,22	1,66	
CH18		186,44	244,31	0,76	194,22	0,96	179,60	1,04	255,94	0,73	155,38	1,20	116,74	1,60	
CH19	80x40x3	146,92	181,77	0,81	104,5	1,41	134,78	1,09	190,43	0,77	83,60	1,76	87,61	1,68	
CH20		146,59	181,77	0,81	146,61	1,00	141,58	1,04	190,43	0,77	117,29	1,25	92,03	1,59	
CH21		155,04	181,77	0,85	155,89	0,99	145,25	1,07	190,43	0,81	124,71	1,24	94,41	1,64	
CH22	80x20x3	127,90	119,23	1,07	72,38	1,77	-	-	124,91	1,02	57,90	2,21	-	-	
CH23		136,46	119,23	1,14	100,86	1,35	-	-	124,91	1,09	80,69	1,69	-	-	
CH24		145,72	119,23	1,22	107,98	1,35	-	-	124,91	1,17	86,38	1,69	-	-	
CH25	120x40x3	209,51	244,31	0,86	125,67	1,67	179,94	1,16	255,94	0,82	100,54	2,08	116,96	1,79	
CH26		211,78	244,31	0,87	174,63	1,21	187,77	1,13	255,94	0,83	139,70	1,52	122,05	1,74	
CH27		217,95	244,31	0,89	194,22	1,12	191,94	1,14	255,94	0,85	155,38	1,40	124,76	1,75	
Среднее значение				0,89		1,29		-		0,85		1,62		-	
Среднеквадратическое отклонение				0,135		0,249		-		0,129		0,311		-	
Коэффициент вариаций				0,152		0,192		-		0,152		0,192		-	

Таблица 2.1.10,б – Сравнение экспериментальных значений несущей способности с результатами CFSteel по методикам Кулака и Vu, Пана, Теха и Джильберта для  $t_{ном}=3$  мм

Обра зец	Размеры сечения, мм	$N_{exp}$ , кН	Нормативное значение несущей способности						Расчётное значение несущей способности						
			$N_{tm}$ , кН K&W	$N_{exp}/N_{tm}$	$P_{tm}$ , кН Pan	$N_{exp}/P_{tm}$	$P_{tm}$ , кН T&G	$N_{exp}/P_{tm}$	$N_{tr}$ , кН K&W	$N_{exp}/N_{tr}$	$P_{tr}$ , кН Pan	$N_{exp}/P_{tr}$	$P_{tr}$ , кН T&G	$N_{exp}/P_{tr}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
CH2	100x30x3	161,17	170,33	0,95	194,63	0,83	144,72	1,11	133,42	1,21	126,51	1,27	94,07	1,71	
CH4		173,09	170,33	1,02	204,03	0,85	150,15	1,15	133,42	1,30	132,62	1,31	97,60	1,77	
CH6		177,94	170,33	1,04	208,72	0,85	153,03	1,16	133,42	1,33	135,67	1,31	99,47	1,79	
CH8	100x40x3	167,37	185,97	0,90	205,39	0,81	157,19	1,06	147,63	1,13	133,50	1,25	102,17	1,64	
CH10		178,47	185,97	0,96	221,08	0,81	165,21	1,08	147,63	1,21	143,70	1,24	107,39	1,66	
CH12		183,40	185,97	0,99	228,93	0,80	169,52	1,08	147,63	1,24	148,80	1,23	110,19	1,66	
CH14	100x50x3	175,31	201,6	0,87	208,66	0,84	168,16	1,04	161,85	1,08	135,63	1,29	109,30	1,60	
CH16		187,73	201,6	0,93	232,51	0,81	179,01	1,05	161,85	1,16	151,13	1,24	116,36	1,61	
CH18		186,44	201,6	0,92	244,44	0,76	184,97	1,01	161,85	1,15	158,89	1,17	120,23	1,55	
CH19	80x40x3	146,92	158,59	0,93	165,03	0,89	133,94	1,10	127,92	1,15	107,27	1,37	87,06	1,69	
CH20		146,59	158,59	0,92	185	0,79	142,9	1,03	127,92	1,15	120,25	1,22	92,89	1,58	
CH21		155,04	158,59	0,98	194,98	0,80	147,84	1,05	127,92	1,21	126,74	1,22	96,10	1,61	
CH22	80x20x3	127,90	127,32	1,00	148,86	0,86	109,92	1,16	99,49	1,29	96,76	1,32	71,45	1,79	
CH23		136,46	127,32	1,07	154,26	0,88	113,61	1,20	99,49	1,37	100,27	1,36	73,85	1,85	
CH24		145,72	127,32	1,14	154,26	0,94	115,54	1,26	99,49	1,46	100,27	1,45	75,10	1,94	
CH25	120x40x3	209,51	220,19	0,95	244,22	0,86	184,33	1,14	172,27	1,22	158,74	1,32	119,81	1,75	
CH26		211,78	220,19	0,96	260,54	0,81	193,11	1,10	172,27	1,23	169,35	1,25	125,52	1,69	
CH27		217,95	220,19	0,99	268,7	0,81	197,82	1,10	172,27	1,27	174,66	1,25	128,58	1,70	
Среднее значение				0,97		0,83		1,11		1,23		1,28		1,70	
Среднеквадратическое отклонение				0,066		0,043		0,065		0,095		0,067		0,101	
Коэффициент вариаций				0,068		0,052		0,059		0,077		0,052		0,059	

**Задание 2.1.3.** В программе CFSteel выполнить расчёты растянутых элементов, результаты испытаний которых представлены в работе Bolandim, E.A., Beck, A.T., Malite, M. Bolted connections in cold-formed steel: reliability analysis for rupture in net section / E.A. Bolandim, A.T. Beck, M. Malite // Journal of Structural Engineering, ASCE, 2013, pp. 748-756 [17]. Сравнить результаты, полученные в программе с экспериментальными данными.

Элементы выполнены из холодногнутого профиля с поперечным сечением в виде швеллера с номинальными размерами:  $100 \times 40 \times 1,55$  мм (1 тип) и  $150 \times 50 \times 3,75$  мм (2 тип). Внутренний радиус закругления  $r = 5$  мм. Прикрепление элемента осуществляется болтами через пояса. Болты располагаются в один ряд по каждому поясу посередине ширины с количеством болтов два, три и четыре. Для образцов 1 типа применены болты номинальным диаметром  $d = 12,5$  мм с отверстиями  $d_0 = 14$  мм, шаг отверстий в продольном направлении 50 мм; для образцов 2 типа болты номинальным диаметром  $d = 16$  мм с отверстиями  $d_0 = 18$  мм, шаг 64 мм (Рисунок 2.1.5). Образцы 1 типа выполнены из листовой оцинкованной стали номинальной толщиной  $t_{nom} = 1,55$  мм (фактическая толщина  $t = 1,5$  мм) с пределом текучести  $f_y = 333$  МПа и пределом прочности  $f_u = 451$  МПа ( $f_u / f_y = 1,35$ ), полученными по результатам испытаний стандартных образцов. Образцы 2 типа выполнены из листовой углеродистой стали  $t_{nom} = 3,75$  мм (фактическая толщина  $t = 3,9$  мм) с пределом текучести  $f_y = 287$  МПа и пределом прочности  $f_u = 399$  МПа ( $f_u / f_y = 1,39$ ). В [17] указывается, что разрушение всех испытанных образцов происходило от разрыва по ослабленному отверстиями сечению в месте прикрепления.

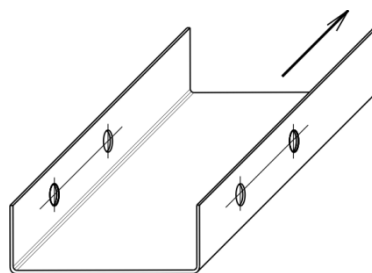


Рисунок 2.1.5 – Расположение отверстий для болтов в образцах, испытанных в [17]

*Расчёт:* В программе CFSteel выполнен расчёт по нормам СП 260 [1], СП 16 [2], EC3 [4,5], AISI S100 [7]. Определялось нормативное значение несущей способности элементов по ослабленному отверстиями для болтов сечению в месте прикрепления, а также соответствующее расчётное значение. Для вычисления расчётного значения по СП 260 и СП 16 учтён коэффициент надёжности по материалу  $\gamma_m = 1,05$ , по EC3 частный коэффициент  $\gamma_{M2} = 1,25$ , а по AISI S100 коэффициент сопротивления  $\phi_t = 0,65$ . В расчёт принята фактическая толщина стали. По СП260 значения несущей способности вычислялись дважды: по п.7.7.2.1 и по п.7.7.2.4. В последнем случае полагалось, что сечение состоит из двух уголков, прикрепляемых одной полкой болтами. По СП16 значения несущей способности вычислялись также дважды: по формуле (5) и по формуле (6). В последнем случае полагалось, что сечение состоит из двух уголков, прикрепляемых одной полкой болтами. Результаты расчёта приведены в таблице 2.1.11.

Элементы

Таблица 2.1.11,а – Сравнение экспериментальных значений несущей способности [17] с результатами CFSteel по нормам СП 16, EC3, AISI и СП 260 для сечений 100х40х1,55

Образец	Размеры сечения, мм	К-во попереч. рядов, шт.	N <sub>exp</sub> , кН	Нормативное значение несущей способности					Расчётное значение несущей способности						
				N <sub>n</sub> , кН СП 16	N <sub>exp</sub> /N <sub>n</sub>	N <sub>uR</sub> , кН EC3	N <sub>exp</sub> /N <sub>uR</sub>	P <sub>m</sub> , кН AISI	N <sub>exp</sub> /P <sub>m</sub>	N, кН СП 16	N <sub>exp</sub> /N	N <sub>uRd</sub> , кН EC3	N <sub>exp</sub> /N <sub>uRd</sub>	P <sub>r</sub> , кН AISI	N <sub>exp</sub> /P <sub>r</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
C1B2-1	100х40х1,5	2	64,9	77,05	0,84	45,94	1,41	38,61	1,68	73,38	0,88	36,75	1,77	25,09	2,66
C1B2-2		2	64		0,83		1,39		1,66		0,87		1,74		2,66
C1C2-1		3	82,6		1,07	50,91	1,62	48,47	1,70		1,13	40,73	2,03	31,51	2,56
C1D2-1		4	91,5		1,19	50,91	1,80	52,98	1,73		1,25	2,25	2,48		
C1D2-2		4	92,2		1,20		1,81		1,74		1,26	2,26	34,44	2,48	
Среднее значение					1,03		1,61		1,70		1,08		2,01		2,57
Среднеквадратическое отклонение					0,18		0,20		0,03		0,19		0,25		0,09
Коэффициент вариаций					0,18		0,13		0,02		0,18		0,13		0,03

Образец	Размеры сечения, мм	К-во попереч. рядов, шт.	N <sub>exp</sub> , кН	Нормативное значение несущей способности		Расчётное значение несущей способности	
				N <sub>n</sub> , кН СП 260	N <sub>exp</sub> /N <sub>n</sub>	N, кН СП 260	N <sub>exp</sub> /N
17	18	19	20	21	22	23	24
C1B2-1	100х40х1,5	2	64,9	70,04	0,93	73,38	0,88
C1B2-2		2	64		0,91		0,87
C1C2-1		3	82,6		1,18		1,13
C1D2-1		4	91,5		1,31		1,25
C1D2-2		4	92,2		1,32		1,26
Среднее значение					1,03		1,08
Среднеквадратическое отклонение					0,18		0,19
Коэффициент вариаций					0,18		0,18

Таблица 2.1.11,б – Сравнение экспериментальных значений несущей способности [17] с результатами CFSteel по нормам СП 16, EC3 и AISI для сечений 150х50х3,75

Образец	Размеры сечения, мм	К-во попереч. рядов, шт.	N <sub>exp</sub> , кН	Нормативное значение несущей способности					Расчётное значение несущей способности						
				N <sub>n</sub> , кН СП 16	N <sub>exp</sub> /N <sub>n</sub>	N <sub>uR</sub> , кН EC3	N <sub>exp</sub> /N <sub>uR</sub>	P <sub>m</sub> , кН AISI	N <sub>exp</sub> /P <sub>m</sub>	N <sub>r</sub> , кН СП 16	N <sub>exp</sub> /N <sub>r</sub>	N <sub>uRd</sub> , кН EC3	N <sub>exp</sub> /N <sub>uRd</sub>	P <sub>r</sub> , кН AISI	N <sub>exp</sub> /P <sub>r</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
C3B2-1	150х50х3,90	2	188	246,53	0,76	134,41	1,40	116,51	1,61	234,79	0,80	107,53	1,75	75,73	2,48
C3B2-2		2	186		0,75		1,38		1,60		0,79		1,73		2,46
C3C2-1		3	226		0,92	149,15	1,52	149,63	1,51		0,96	119,32	1,89	97,26	2,32
C3D2-1		4	263		1,07	149,15	1,76	165,31	1,59		1,12	119,32	2,20	107,45	2,45
C3D2-2		4	258		1,05		1,73		1,56		1,10	2,16	2,40		
Среднее значение					0,91		1,56		1,57		0,95		1,95		2,42
Среднеквадратическое отклонение					0,15		0,18		0,04		0,16		0,22		0,06
Коэффициент вариаций					0,16		0,12		0,03		0,16		0,12		0,03

Образец	Размеры сечения, мм	К-во попереч. рядов, шт.	N <sub>exp</sub> , кН	Нормативное значение несущей способности		Расчётное значение несущей способности	
				N <sub>n</sub> , кН СП 260	N <sub>exp</sub> /N <sub>n</sub>	N, кН СП 260	N <sub>exp</sub> /N
17	18	19	20	21	22	23	24
C3B2-1	150х50х3,90	2	188	224,12	0,84	240,52	0,78
C3B2-2		2	186		0,83		0,77
C3C2-1		3	226		1,01		0,94
C3D2-1		4	263		1,17		1,09
C3D2-2		4	258		1,15		1,07
Среднее значение					1,03		1,08
Среднеквадратическое отклонение					0,18		0,19
Коэффициент вариаций					0,18		0,18



Таблица 2.1.11,в – Сравнение расчётных значений, вычисленных по п.7.7.2.1 и п.7.7.2.4 СП 260 для сечений 100х40х1,55

Образец	Размеры образца, мм	К-во попереч. рядов	P <sub>exp</sub> кН [17]	Нормативное значение несущей способности				Расчётное значение несущей способности			
				P <sub>m</sub> (7.7.2.1) кН	P <sub>exp</sub> /P <sub>m</sub>	P <sub>m</sub> (7.7.2.4) кН	P <sub>exp</sub> /P <sub>m</sub>	P <sub>r</sub> (7.7.2.1) кН	P <sub>exp</sub> /P <sub>r</sub>	P <sub>r</sub> (7.7.2.4) кН	P <sub>exp</sub> /P <sub>r</sub>
C1B2-1	100х40х1,5	2	64,9	77,05	0,84	36,63	1,77	73,38	0,88	27,55	2,36
C1B2-2		2	64		0,83		1,75		0,87		2,32
C1C2-1		3	82,6		1,07	50	1,65		1,13	37,04	2,23
C1D2-1		4	91,5		1,19	56,82	1,61		1,25	42,74	2,14
C1D2-2		4	92,2		1,20		1,62		1,26		2,16

Таблица 2.1.11,г – Сравнение расчётных значений, вычисленных по п.7.7.2.1 и п.7.7.2.4 СП 260 для сечений 150х50х3,75

Образец	Размеры образца, мм	К-во попереч. рядов	P <sub>exp</sub> кН [17]	Нормативное значение несущей способности				Расчётное значение несущей способности			
				P <sub>m</sub> (7.7.2.1) кН	P <sub>exp</sub> /P <sub>m</sub>	P <sub>m</sub> (7.7.2.4) кН	P <sub>exp</sub> /P <sub>m</sub>	P <sub>r</sub> (7.7.2.1) кН	P <sub>exp</sub> /P <sub>r</sub>	P <sub>r</sub> (7.7.2.4) кН	P <sub>exp</sub> /P <sub>r</sub>
C3B2-1	150х50х3,90	2	188	224,12	0,84	147,06	1,28	240,52	0,78	110,62	1,70
C3B2-2		2	186		0,83		1,26		0,77		1,68
C3C2-1		3	226		1,01	185,19	1,22		0,94	138,5	1,63
C3D2-1		4	263		1,17	204,08	1,29		1,09	153,85	1,71
C3D2-2		4	258		1,15		1,26		1,07		1,68

Таблица 2.1.11,д – Сравнение расчётных значений, вычисленных по формулам (5) и (6) СП 16 для сечений 100х40х1,55

Образец	Размеры образца, мм	К-во попереч. рядов	P <sub>exp</sub> кН [16]	Нормативное значение несущей способности				Расчётное значение несущей способности			
				P <sub>m</sub> (5) кН	P <sub>exp</sub> /P <sub>m(5)</sub>	P <sub>m</sub> (6) кН	P <sub>exp</sub> /P <sub>m(6)</sub>	P <sub>r</sub> (5) кН	P <sub>exp</sub> /P <sub>r(5)</sub>	P <sub>r</sub> (6) кН	P <sub>exp</sub> /P <sub>r(6)</sub>
C1B2-1	100х40х1,5	2	64,9	77,05	0,84	37,73	1,72	73,38	0,88	35,40	1,83
C1B2-2		2	64		0,83		1,70		0,87		1,81
C1C2-1		3	82,6		1,07	45,36	1,82		1,13	43,20	1,91
C1D2-1		4	91,5		1,19	49,70	1,84		1,25	47,34	1,93
C1D2-2		4	92,2		1,20		1,86		1,26		1,95

Таблица 2.1.11,е – Сравнение расчётных значений, вычисленных по формулам (5) и (6) СП 16 для сечений 150х50х3,75

Образец	Размеры образца, мм	К-во попереч. рядов	P <sub>exp</sub> кН [16]	Нормативное значение несущей способности				Расчётное значение несущей способности			
				P <sub>m</sub> (5) кН	P <sub>exp</sub> /P <sub>m(5)</sub>	P <sub>m</sub> (6) кН	P <sub>exp</sub> /P <sub>m(6)</sub>	P <sub>r</sub> (5) кН	P <sub>exp</sub> /P <sub>r(5)</sub>	P <sub>r</sub> (6) кН	P <sub>exp</sub> /P <sub>r(6)</sub>
C3B2-1	150х50х3,90	2	188	246,53	0,76	113,34	1,66	234,79	0,80	107,94	1,74
C3B2-2		2	186		0,75		1,64		0,79		1,72
C3C2-1		3	226		0,92	141,83	1,59		0,96	135,07	1,67
C3D2-1		4	263		1,07	157,47	1,67		1,12	149,97	1,75
C3D2-2		4	258		1,05		1,64		1,10		1,72

**Задание 2.1.4.** В программе CFSteel выполнить расчёты растянутых элементов из работы Wallace J.A., Shuster R.M., LaBoube R.A. Testing of Bolted Cold-Formed Steel Connections in Dearing (With and without Washers). Final Report //Canadian Cold Formed Research Group Department of Civil Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Canada, March, 2001, 33 p [21]. Сравнить результаты, полученные в программе по разным методикам, между собой и с экспериментальными данными, приведёнными в [21].

Экспериментальные образцы, которые подвергались центральному растяжению, выполнены из оцинкованной листовой стали  $t_{ном} = 1,38$  мм с размерами, приведёнными на Рисунке 2.1.6. Диаметры болтов  $d = 6,35$  и  $7,94$  мм. Диаметры отверстий  $d_0 = 7,94$  и  $9,53$  мм соответственно. Предел текучести и предел прочности стали, полученные в результате испытаний стандартных образцов, составляют  $f_y = 356$  МПа и  $f_u = 361$  МПа;  $f_u / f_y = 1,014$ .

Испытывались по три образца каждого диаметра болтов. При этом каждый из них испытывался дважды: с шайбами под головкой и гайкой болта и без шайб.

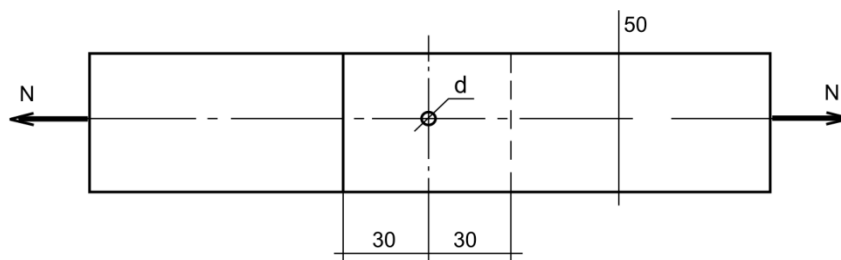


Рисунок 2.1.6 – Размеры экспериментальных образцов [21]

Исчерпание несущей способности всех образцов происходило в результате смятия соединяемых листов. Характерный вид исчерпания несущей способности показан на Рисунке 2.1.7. За экспериментальную несущую способность принималась нагрузка, соответствующая максимуму на диаграмме работы соединения, которая записывалась в ходе каждого испытания.

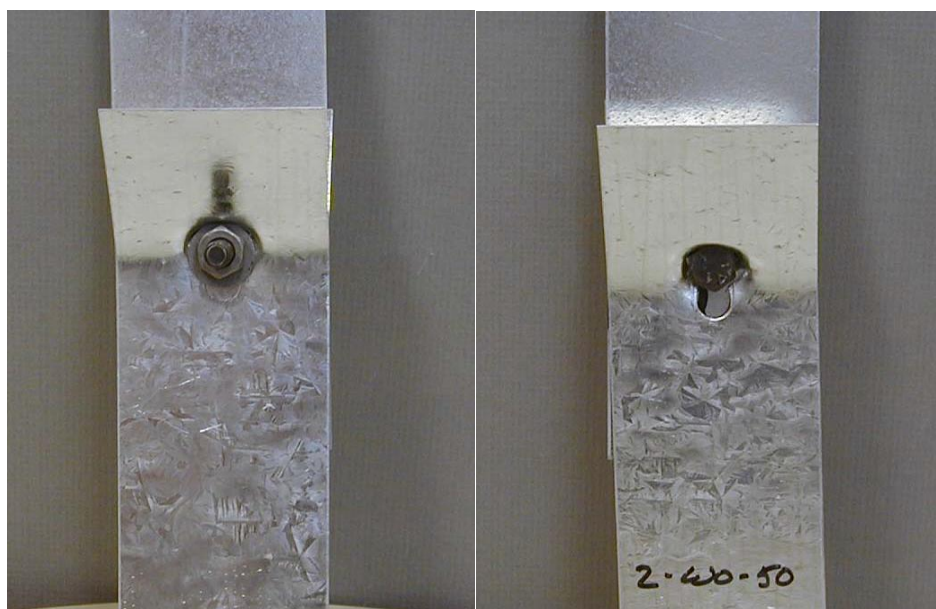


Рисунок 2.1.7 - Характерный вид исчерпания несущей способности образцов с шайбами и без них [21]

*Расчёт:* В программе CFSteel вычислена расчётная несущая способность по критерию смятия соединяемых деталей по методикам СП 260 [1], СП 16 [2], Рекомендациям ЦНИИПроектстальконструкция [9], EC3 [4,5], AISI (LRFD) [7]. В работе [21] говорится о том, что ширина листа выбрана таким образом, что она не влияет на несущую способность. Поэтому в расчёте принято сечение элемента в виде швеллера той же толщины стали с шириной исходной заготовки 50 мм и соединением первого типа с одним болтом (см. Документация к программе CFSteel. Том I Руководство пользователя [12]). Для вычисления расчётного значения по СП 260 и СП 16 учтён коэффициент надёжности по материалу  $\gamma_m=1,05$ , по EC3 частный коэффициент  $\gamma_{M2}=1,25$ , а по AISI S100 коэффициент сопротивления  $\phi=0,6$ . В расчёт принята расчётная толщина стали  $t = t_{nom} - t_{coat}$ . Результаты расчётов приведены в таблице 2.1.12.

**Задание 2.1.5.** В программе CFSteel выполнить расчёты растянутых элементов из работы Ведяков, И.И., Одесский, П.Д., Соловьёв, Д.В. Несущая способность болтовых соединений лёгких конструкций из холодногнутой профилей малых толщин / И.И. Ведяков, П.Д. Одесский, Д.В.Соловьёв // Промышленное и гражданское строительство, 2010.- №3.- С.19-22 [18]. Сравнить результаты, полученные в программе по разным методикам, между собой и с экспериментальными данными, приведёнными в [18].

В [18] экспериментальные образцы, которые подвергались центральному растяжению, выполнены из оцинкованной листовой стали  $t_{nom} = 1,2$  и  $1,5$  мм с размерами, приведёнными на Рисунке 2.1.8 Диаметр болта  $d=10$  мм подобран исходя из его несрезности. Расстояние от центра болта до кромки пластины  $a$  принималось равным  $2d$  (20 мм) и  $3d$  (30 мм). Средние пределы текучести и прочности стали, полученные в результате испытаний стандартных образцов, составляют: для стали  $t=1,2$  мм  $f_y=255$  МПа и  $f_u=325$  МПа;  $f_u/f_y=1,27$ ; для стали  $t=1,5$  мм  $f_y=245$  МПа и  $f_u=320$  МПа;  $f_u/f_y=1,31$ . За несущую способность болтового соединения в [18] по косвенным признакам принималась нагрузка начала пластических деформаций в соединении, т.е. изменение вида кривой деформирования соединения, записываемой во время испытаний. В работе [18] указывается, что разрушение в большинстве случаев было обусловлено вырывом (срез) металла образца болтом.

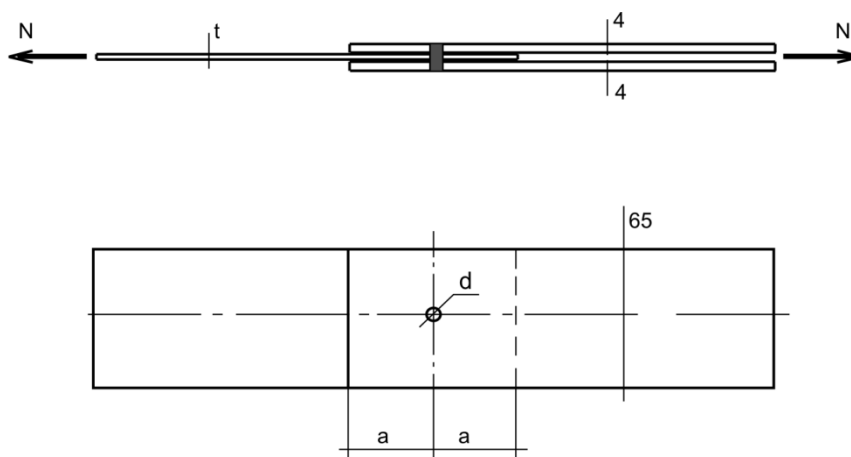


Рисунок 2.1.8 – Размеры экспериментальных образцов [18]

Таблица 2.1.12 - Сравнение экспериментальных значений несущей способности [21] с результатами CFSteel по нормам EC3, AISI, СП 260, СП 16 и Рекомендациям ЦНИИПроектстальконструкция

Образец	Диаметр болта d, мм	N <sub>exp</sub> , кН	Нормативное значение несущей способности						Расчётное значение несущей способности							
			N <sub>tbR</sub> кН EC3	N <sub>exp</sub> /N <sub>tbR</sub>	P <sub>tb</sub> кН AISI	N <sub>exp</sub> /P <sub>tb</sub>	N <sub>tb,Rd</sub> кН EC3	N <sub>exp</sub> /N <sub>tb,Rd</sub>	P <sub>tb</sub> кН AISI	N <sub>exp</sub> /P <sub>tb</sub>	N <sub>tp</sub> кН СП 260	N <sub>exp</sub> /N <sub>tp</sub>	N <sub>tp</sub> кН СП 16	N <sub>exp</sub> /N <sub>tp</sub>	N <sub>tp</sub> кН ЦНИИПСК	N <sub>exp</sub> /N <sub>tp</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			12	13	14	15
Без шайб																
1-wo-sst-1/4	6,35	9,16	7,68	1,19	6,92	1,32	6,14	1,49	4,15	2,21	2,33	3,93	3,95	2,32	6,57	1,39
2-wo-sst-1/4		8,92		1,16		1,29		1,45		2,15		3,83		2,26		1,36
3-wo-sst-1/4		9,03		1,18		1,31		1,47		2,18		3,88		1,67		1,37
1-wo-sst-5/16	7,94	9,12	9,6	0,95	8,65	1,05	7,68	1,19	5,19	1,76	2,91	3,13	4,94	1,85	7,32	1,25
2-wo-sst-5/16		8,51		0,89		0,98		1,11		1,64		2,92		1,72		1,16
3-wo-sst-5/16		8,26		0,86		0,95		1,08		1,59		2,84		1,67		1,13
С шайбами																
1-ww-sst-1/4	6,35	12,2	7,68	1,59	9,22	1,32	6,14	1,99	5,53	2,21	2,33	5,24	3,95	3,09	6,57	1,86
2-ww-sst-1/4		12,2		1,59		1,32		1,99		2,21		5,24		3,09		1,86
3-ww-sst-1/4		11,9		1,55		1,29		1,94		2,15		5,11		3,01		1,81
1-ww-sst-5/16	7,94	14,7	9,6	1,53	11,52	1,28	7,68	1,91	6,91	2,13	2,91	5,05	4,94	2,98	7,32	2,01
2-ww-sst-5/16		12,6		1,31		1,09		1,64		1,82		4,33		2,55		1,72
3-ww-sst-5/16		12,4		1,29		1,08		1,61		1,79		4,26		2,51		1,69

Таблица 2.1.13 - Сравнение экспериментальных значений несущей способности [18] с результатами CFSteel по нормам EC3, AISI, СП 260, СП 16 и Рекомендациям ЦНИИПроектстальконструкция

Расстояние a, мм	N <sub>exp</sub> , кН	Нормативное значение несущей способности				Расчётное значение несущей способности									
		N <sub>tbR</sub> кН EC3	N <sub>exp</sub> /N <sub>tbR</sub>	P <sub>tb</sub> кН AISI	N <sub>exp</sub> /P <sub>tb</sub>	N <sub>tb,Rd</sub> кН EC3	N <sub>exp</sub> /N <sub>tb,Rd</sub>	P <sub>tb</sub> кН AISI	N <sub>exp</sub> /P <sub>tb</sub>	N <sub>tp</sub> кН СП 16	N <sub>exp</sub> /N <sub>tp</sub>	N <sub>tp</sub> кН ЦНИИПСК	N <sub>exp</sub> /N <sub>tp</sub>	N <sub>tp</sub> кН СП 260	N <sub>exp</sub> /N <sub>tp</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
t=1,2 мм															
20	7,21	5,09	1,42	8,48	0,85	4,07	1,77	5,09	1,42	4,20	1,72	5,51	1,31	2,54	2,84
30	7,78	7,63	1,02	8,48	0,88	6,10	1,28	5,09	1,53	4,85	1,60	6,97	1,09	2,93	2,66
t=1,5 мм															
20	7,49	6,49	1,15	8,68	0,86	5,19	1,44	6,31	1,19	5,21	1,44	6,83	1,10	3,14	2,39
30	8,42	9,74	0,86	8,68	0,97	7,79	1,08	6,31	1,33	6,01	1,40	8,64	0,97	3,64	2,31

*Расчёт:* В программе CFSteel определена расчётная несущая способность по критерию смятия соединяемых деталей по методикам СП 260 [1], СП 16 [2], Рекомендациям ЦНИИПроектстальконструкция [9], EC3 [4,5] и AISI S100 (LRFD) [7]. Для вычисления расчётного значения по СП 260 учтён коэффициент надёжности по материалу  $\gamma_m=1,025$ , по СП 16 учтён коэффициент надёжности по материалу  $\gamma_m=1,05$ , по EC3 частный коэффициент  $\gamma_{M2}=1,25$ , а по AISI S100 коэффициент сопротивления  $\phi=0,6$ . В расчёт принята расчётная толщина стали  $t = t_{ном} - t_{coat}$ . Расчёт по AISI выполнялся для случая без шайб с обеих сторон. Результаты приведены в таблице 2.1.13.

**Задание 2.1.6.** В программе CFSteel выполнить расчёты растянутого раскоса в составе модели узла сопряжения с поясом фермы. Результаты испытаний таких моделей представлены в работе Panyanouvong M. Bearing strength of cold formed steel bolted connections in truss/thesis for the degree of master of science, University of North Texas, May 2012, 109 p. [20]. Сравнить результаты, полученные в программе с экспериментальными данными, приведёнными в [20].

Пояса и раскосы в моделях узлов ферм выполнены из холодногнутого профиля из оцинкованной стали и поперечным сечением в виде швеллера с широкими поясами. Схема испытаний приведена на Рисунке 2.1.9. Варьировались толщины стали и диаметры болтов. Толщины стали без учёта цинкового покрытия  $t = 0,92; 1,11; 1,43; 1,77; 2,28; 3,31$  мм.

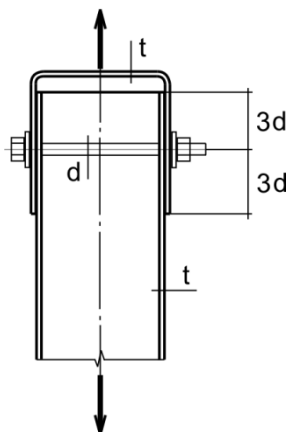


Рисунок 2.1.9 – Схема испытаний [20]

Прочностные характеристики сталей, полученные в результате испытания стандартных образцов, приведены в таблице 2.1.14

Таблица 2.1.14 - Прочностные характеристики сталей

Толщина стали без учёта цинкового покрытия $t$ , мм	Предел текучести $f_y$ , МПа	Предел прочности $f_u$ , МПа	Отношение $f_u/f_y$
0,92	307,52	373,02	1,21
1,11	455,07	548,84	1,21
1,43	415,91	539,53	1,3
1,77	317,86	375,78	1,18
2,58	482,31	518,64	1,08
3,31	312,34	359,92	1,15

*Расчёт:* В программе CFSteel определена расчётная несущая способность по критерию смятия соединяемых деталей растянутого раскоса. Расчёт выполнен по нормам СП 16 [2], EC3 [4,5] и AISI S100 [7] для диаметра болта  $12,7$  мм (ASTM 307) с отверстием диаметром  $14,3$  мм в предположении отсутствия шайб. Экспериментальные данные по несущей способности,

исчерпание которой происходило в результате смятия листов стали [20], а также расчётные данные приведены в таблице 2.1.15. Характерный вид исчерпания несущей способности представлен на Рисунке 2.1.10.

Таблица 2.1.15 - Сравнение результатов эксперимента [20] и расчёта по CFSteel ( $d = 12,7$  мм)

Образец	Толщина стали без учета цинкового покрытия $t$ , мм	Несущая способность эксперимент $P_{exp}$ , кН	Расчётная несущая способность по СП 16 $N_p$ , кН	$P_{exp}/N_p$	Расчётная несущая способность по Рекомендациям [9] $N_p$ , кН	$P_{exp}/N_p$	Расчётная несущая способность по EC3 $N_{tb,Rd}$ кН	$P_{exp}/N_{tb,Rd}$	Расчётная несущая способность по AISI S100 (LRFD) $P_{tb}$ , кН	$P_{exp}/P_{tb}$
33-1/2-T1	0,92	12,764	11,207	1,14	14,513	0,88	13,848	0,92	10,275	1,24
33-1/2-T2		12,682		1,13		0,87		0,92		1,23
43-1/2-T1	1,11	14,536	19,895	0,73	25,764	0,56	26,254	0,55	19,886	0,73
43-1/2-T2		14,300		0,72		0,55		0,54		0,72
54-1/2-T1	1,43	24,98	25,196	0,99	32,629	0,77	34,808	0,72	26,456	0,94
54-1/2-T2		23,988		0,95		0,74		0,69		0,91
68-1/2-T1	1,77	31,464	21,721	1,16	28,129	1,12	30,008	1,05	22,807	1,38
68-1/2-T2		29,544		1,36		1,05		0,98		1,30
97-1/2-T1	2,58	74,46	43,698	1,70	56,589	1,32	60,369	1,23	45,883	1,62
97-1/2-T2		79,116		1,81		1,40		1,31		1,72
118-1/2-T1	3,31	85,144	38,906	2,19	50,383	1,69	53,748	1,58	40,851	2,08
118-1/2-T2		86,51		2,22		1,72		1,61		2,12



Рисунок 2.1.10 - Характерный вид исчерпания несущей способности в результате смятия  $t = 1,43$  мм [20] (соединение без шайб)

## 2.2. Сжатие

### 2.2.1. Устойчивость сжатого элемента С-образного сечения в соответствии с СП 260.1325800.2016

**Задание:** Выполнить расчёт сжатого стержневого элемента С-образного сечения из Example H Worked Examples According to EN 1993-1-3 Eurocode 3, Part 1.3 / ECCS TC 7, № 123, 2008.- 235 p. [10]. Расчётная схема элемента приведена на Рисунке 2.2.1.



Рисунок 2.2.1 – Расчётная схема элемента

Поперечное сечение приведено на Рисунке 2.2.2. Размеры сечения:  $h = 102 \text{ мм}$ ,  $t = 2 \text{ мм}$ ,  $b = 120 \text{ мм}$ ,  $c = 26 \text{ мм}$ ,  $r = 10 \text{ мм}$  (внутренний).  $R_{yn} = 35,5 \text{ кН/см}^2$ ;  $\gamma_m = 1,05$ ;  $R_y = 33,81 \text{ кН/см}^2$ . Коэффициент условий работы принять равным  $\gamma_c = 1,0$ . Расчёт элемента выполняется на усилие  $N = 85,7 \text{ кН}$ , полученное в [10].

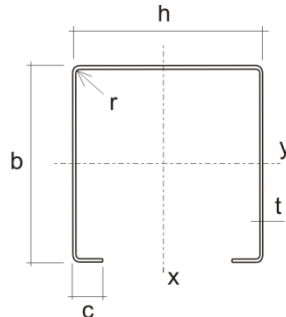


Рисунок 2.2.2 – Поперечное сечение

Граничные условия: имеются закрепления на обоих концах от перемещения из плоскости, отсутствует закрепление от деформации торцовых сечений, расчётная длина элемента при потере устойчивости по крутильной или изгибно-крутильной форме равна геометрической длине элемента.

Геометрические характеристики полного и эффективного сечений приведены в п.1.2.1.

В результате несовпадения центральных осей  $y$  -  $y$  полного и эффективного сечений возникает эксцентриситет  $e_N = -0,785 \text{ см}$ , который необходимо учесть в расчётах. Поэтому считаем элемент как сжатый с эксцентриситетом стержень. Расчётная схема приведена на Рисунке 2.2.3.

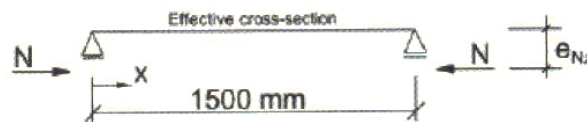


Рисунок 2.2.3 – Расчётная схема элемента с учётом эксцентриситета

**Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel**

Условие устойчивости согласно п.7.7.10.4 [1]

$$\left( \frac{N}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} + \left( \frac{e_N N}{\chi_{LT} W_{y,ef} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} = \left( \frac{85,7}{0,703 \cdot 4,76 \cdot 33,81 \cdot 1} \right)^{0,8} + \left( \frac{0,785 \cdot 85,7}{0,939 \cdot 12,816 \cdot 33,81 \cdot 1} \right)^{0,8} = 1,038 > 1.$$

Расчёт по п.7.7.10.3 [1]

Для сжатых с изгибом элементов должны выполняться условия:

$$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{e_N N}{\chi_{LT} W_{y,ef} R_y \gamma_c} \leq 1,$$

$$\frac{N}{\varphi_x A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xy} \frac{e_N N}{\chi_{LT} W_{y,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$$

**Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel**

Формулы взаимодействия (п. 7.7.10.3[1])

$$\frac{85,7}{0,936 \cdot 4,76 \cdot 33,81 \cdot 1} + 1,402 \frac{0,785 \cdot 85,7}{0,939 \cdot 12,816 \cdot 33,81 \cdot 1} = 0,802 < 1,$$

$$\frac{85,7}{0,935 \cdot 4,76 \cdot 33,81 \cdot 1} + 1,402 \frac{0,785 \cdot 85,7}{0,92 \cdot 12,816 \cdot 33,81 \cdot 1} = 0,802 < 1.$$

В таблице 2.2.1 приведено сравнение результатов ручного расчёта с результатами, полученными в CFSteel.

Таблица 2.2.1 – Сопоставление результатов расчётов

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) СП 260	Ручной расчёт	CFSteel	Расхождение, %
<b>Прочность</b>						
Левая часть проверки прочности элемента как сжатого с изгибом стержня	-	-	7.7.4	0,688	0,688	0
<b>Устойчивость</b>						
Приведённая гибкость относительно оси x - x	$\bar{\lambda}_x$	-	7.7.8.1	1,123	1,123	0
Приведённая гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	-	7.7.8.1	1,118	1,118	0
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии по изгибной форме	$\varphi$	-	СП 16	0,935	0,935	0
Критическая сила по Эйлеру	$N_x$	кН		1257	1257	0
Критическая сила по Эйлеру	$N_y$	кН		1268	1270	0,1
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	кН	(7.90)	253,08	253,10	0
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,TF}$	кН	(7.91)	217,62	217,63	0
Максимальное значение условной гибкости по крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\bar{\lambda}_{FT}$	-	(7.89)	0,860	0,860	0,1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии по крутильной/изгибно-крутильной форме	$\varphi_{TF}$	-	СП 16	0,703	0,703	0
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	кНсм	Приложение Г	3612	3613	0
Условная гибкость	$\bar{\lambda}_{LT}$	-	(7.96)	0,346	0,346	0
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	-	(7.94)	0,947	0,947	0
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	-	СП 16	0,939	0,939	0
Левая часть проверки устойчивости элемента	-	-	(7.101)	1,038	1,038	0
Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии	$M_{cr,0}$	кНсм	Приложение Г	3612	3612	0,1



при постоянном значении изгибающего момента по длине элемента						
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба при постоянном моменте по длине элемента	$\bar{\lambda}_0$	-	Приложение В	0,346	0,4346	0
Предельное значение условной гибкости при потере устойчивости плоской формы изгиба при постоянном моменте по длине элемента	$\bar{\lambda}_{0,lim}$	-		0,176	0,176	0
Коэффициент перехода к эквивалентной прямоугольной эпюре моментов	$C_{m,y0}$		Таблица В.2	1,016	1,016	0
Параметр	$a_{LT}$	-		1	1	0
Коэффициент	$C_{m,y}$	-		1,011	1,011	0
Коэффициент	$C_{m,LT}$	-		1,300	1,300	0
Параметр	$\mu_y$	-	Таблица В.1	0,995	0,995	0
Параметр	$\mu_x$	-	Таблица В.1	0,995	0,995	0
Метод 1 Табл.В.1 и В.2						
Коэффициент взаимодействия $k_{xx}$	$k_{yy}$	-	Таблица В.1	1,402	1,402	0
Коэффициент взаимодействия $k_{yx}$	$k_{xy}$	-	Таблица В.1	1,402	1,402	0,
Левая часть неравенства (7.99)			п.7.7.10.3	0,802	0,802	0
Левая часть неравенства (7.100)			п.7.7.10.3	0,802	0,802	0

Результаты расчёта в программе CFSteel представлены на Рисунках 2.2.4 – 2.2.12.

Сжатие [СП260]

Наименование элемента: Example H

Длина элемента L: 1,5 м

Расчётное усилие сжатия N: 85,7 кН

Коэффициент приведения длины относительно оси x - x  $\mu_x$ : 1

Коэффициент приведения длины относительно оси y - y  $\mu_y$ : 1

Коэффициент закрепления концов элемента от кручения  $k_T$ : 1

Коэффициент условий работы элемента (устойчивость)  $\gamma_c$ : 1

Коэффициент условий работы элемента (прочность)  $\gamma_c$ : 1

Критический момент потери устойчивости плоской формы  $M_{cr}$ : 0 кН·см

Ослабления: Выбрать...

Предельная гибкость:  $\lambda_d$  180-60\*alfa

Комментарии:

Сечение: C 102-2-120 ECCSLipChannel

Сталь: EN, EN 10147, S350GD

$R_{yt}$  358 Н/мм<sup>2</sup>,  $R_{ct}$  420 Н/мм<sup>2</sup>

Вычислить, Закрыть, Справка

Рисунок 2.2.4 – Ввод данных

Результаты

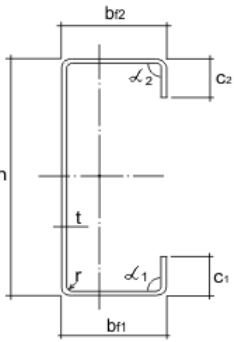
Общие данные | Характеристики полного сечения | Характеристики эффективного сечения | Результаты расчёта

**Example H**

Расчетное усилие сжатия	N	85,70 кН
Длина элемента	L	1,500 м
Кoeffициент приведения длины относительно оси x - x	$\mu_x$	1
Кoeffициент приведения длины относительно оси y - y	$\mu_y$	1
Кoeffициент приведения длины (кручение)	$k_T$	1
Кoeffициент условий работы элемента (устойчивость)	$\gamma_c$	1
Кoeffициент условий работы элемента (прочность)	$\gamma_c$	1
Предельная гибкость	$\lambda_u$	145,8

**Сечение**

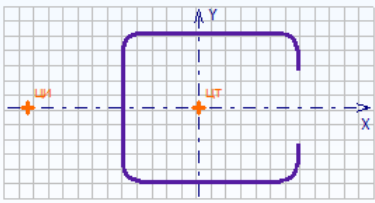
C 102-2-120  
ECCSLipChannel



h	102,0 мм
t	2,0 мм
b <sub>f1</sub>	120,0 мм
b <sub>f2</sub>	120,0 мм
c <sub>1</sub>	26,0 мм
c <sub>2</sub>	26,0 мм
α <sub>1</sub>	90,0 °
α <sub>2</sub>	90,0 °
r	10,0 мм
t <sub>coat</sub>	0,00 мм

**Сталь**

Группа стандартов	EN
Стандарт	EN 10147
Сталь	S350GD
Нормативное сопротивление стали по пределу текучести	$R_{yn}$ 355 Н/мм <sup>2</sup>
Нормативное сопротивление стали по пределу прочности	$R_{un}$ 420 Н/мм <sup>2</sup>
Модуль упругости	E 206000 Н/мм <sup>2</sup>
Кoeffициент Пуассона	$\nu$ 0,3
Кoeffициент надёжности по материалу	$\gamma_m$ 1,05



Excel | Закрыть | Справка

Рисунок 2.2.5 – Результаты расчёта: Общие данные

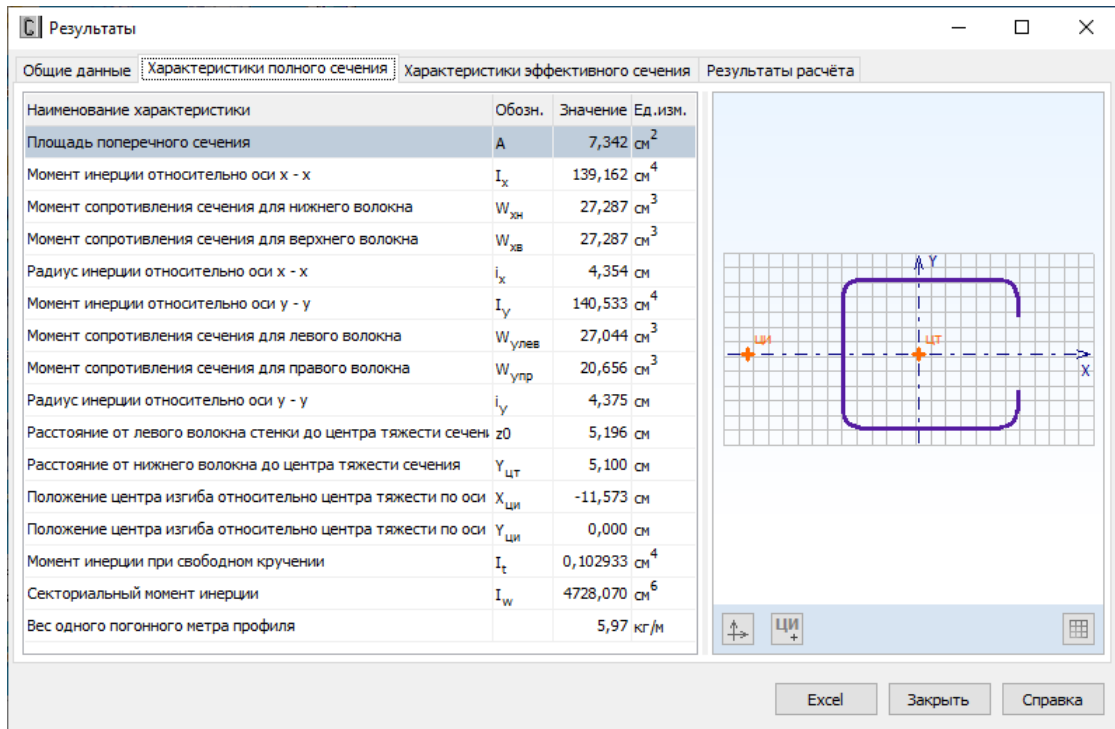


Рисунок 2.2.6 – Результаты расчёта: Характеристики полного сечения

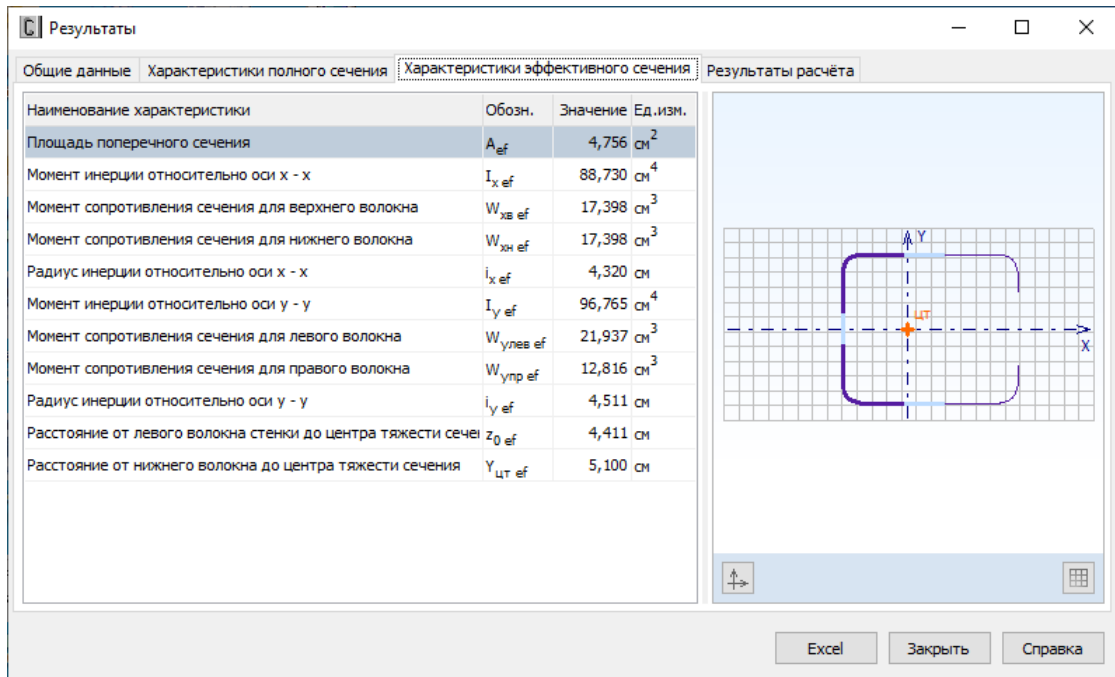


Рисунок 2.2.7 – Результаты расчёта: Характеристики эффективного сечения

Результаты			
Общие данные	Характеристики полного сечения	Характеристики эффективного сечения	Результаты расчёта
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула)
Расчёт на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{ef}R_y\gamma_c} + \frac{N e_N}{W_{y,ef}R_y\gamma_c} \leq 1$	0,688 < 1	✓ 7.7.4
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xy} \frac{e_N N}{\chi_{LT} W_{y,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,802 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xy} \frac{e_N N}{\chi_{LT} W_{y,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,802 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	$\left(\frac{N_1}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{e_1 N_1}{\chi_{LT} W_{y,ef} R_y \gamma_c}\right)^{1,8} \leq 1$	1,038 > 1	✗ 7.7.10.4
Проверка гибкости элемента	$\lambda_{max} \leq \lambda_u$	34,5 < 145,8	✓ 10.4

Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	N	85,700	кН	
Эксцентриситет	e <sub>N</sub>	-0,785	см	7.7.2.3
Площадь эффективного сечения	A <sub>ef</sub>	4,756	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения	W <sub>y,ef</sub>	12,816	см <sup>3</sup>	
Геометрическая длина элемента	L	1,500	м	
Расчётная длина относительно оси x - x	l <sub>efx</sub>	1,500	м	
Расчётная длина относительно оси y - y	l <sub>efy</sub>	1,500	м	
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	L <sub>crT</sub>	1,500	м	
Приведённая гибкость относительно оси x - x	$\bar{\lambda}_x$	1,123		7.7.8.1
Приведённая гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	1,118		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси x - x		b		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси y - y		b		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ <sub>x</sub>	0,935		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ <sub>y</sub>	0,936		7.7.8.1
Критическая сила для крутильной формы потери устойчивости	N <sub>crT</sub>	253,097	кН	7.7.8.4
Критическая сила для изгибно-крутильной формы потери устойчивости	N <sub>crTF</sub>	217,635	кН	7.7.8.5
Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии	M <sub>cr</sub>	3612,940	кН·см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,346		7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b		7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	χ <sub>LT</sub>	0,939		7.7.9.2
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1		
Коэффициент взаимодействия	k	1,402		
Расчётное сопротивление стали	R <sub>y</sub>	338	Н/мм <sup>2</sup>	

Excel    Закрыть    Справка

Результаты			
Общие данные	Характеристики полного сечения	Характеристики эффективного сечения	Результаты расчёта
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула)
Расчёт на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{ef}R_y\gamma_c} + \frac{Ne_N}{W_{yef}R_y\gamma_c} \leq 1$	0,688 < 1	✓ 7.7.4
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xy} \frac{e_N N}{\chi_{LT} W_{yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,802 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xy} \frac{e_N N}{\chi_{LT} W_{yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,802 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	$\left(\frac{N_1}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{e_1 N_1}{\chi_{LT} W_{yef} R_y \gamma_c}\right)^{1,8} \leq 1$	1,038 > 1	✗ 7.7.10.4
Проверка гибкости элемента	$\lambda_{max} \leq \lambda_u$	34,5 < 145,8	✓ 10.4

Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	N	85,700	кН	
Эксцентриситет	e <sub>N</sub>	-0,785	см	7.7.2.3
Площадь эффективного сечения	A <sub>ef</sub>	4,756	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения	W <sub>yef</sub>	12,816	см <sup>3</sup>	
Геометрическая длина элемента	L	1,500	м	
Расчётная длина относительно оси x - x	l <sub>efx</sub>	1,500	м	
Расчётная длина относительно оси y - y	l <sub>efy</sub>	1,500	м	
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	L <sub>crT</sub>	1,500	м	
Приведённая гибкость относительно оси x - x	$\bar{\lambda}_x$	1,123		7.7.8.1
Приведённая гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	1,118		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси x - x		b		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси y - y		b		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ <sub>x</sub>	0,935		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ <sub>y</sub>	0,936		7.7.8.1
Критическая сила для крутильной формы потери устойчивости	N <sub>crT</sub>	253,097	кН	7.7.8.4
Критическая сила для изгибно-крутильной формы потери устойчивости	N <sub>crTF</sub>	217,635	кН	7.7.8.5
Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии	M <sub>cr</sub>	3612,940	кН·см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,346		7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b		7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	χ <sub>LT</sub>	0,939		7.7.9.2
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1		
Коэффициент взаимодействия	k	1,402		
Расчётное сопротивление стали	R <sub>y</sub>	338	Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	γ <sub>c</sub>	1		

Excel    Закрыть    Справка

Результаты			
Общие данные	Характеристики полного сечения	Характеристики эффективного сечения	Результаты расчёта
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула)
Расчёт на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{ef} R_y \gamma_c} + \frac{N e_N}{W_{yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,688 < 1	✓ 7.7.4
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xy} \frac{e_N N}{\chi_{lt} W_{yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,802 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xy} \frac{e_N N}{\chi_{lt} W_{yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,802 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	$\left(\frac{N_1}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{e_1 N_1}{\chi_{lt} W_{yef} R_y \gamma_c}\right)^{1,8} \leq 1$	1,038 > 1	✗ 7.7.10.4
Проверка гибкости элемента	$\lambda_{max} \leq \lambda_u$	34,5 < 145,8	✓ 10.4

Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное усилие сжатия	N	85,700	кН	
Эксцентриситет	e <sub>N</sub>	0,785	см	7.7.2.3
Площадь эффективного сечения	A <sub>ef</sub>	4,756	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения	W <sub>yef</sub>	12,816	см <sup>3</sup>	
Понижающий коэффициент	φ	0,703		
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	χ <sub>min</sub>	0,939		7.7.9.2
Расчётное сопротивление стали по пределу текучести	R <sub>y</sub>	338	Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы элемента	γ <sub>c</sub>	1		

Excel    Закрыть    Справка

Рисунок 2.2.8 – Результаты расчёта: Проверки



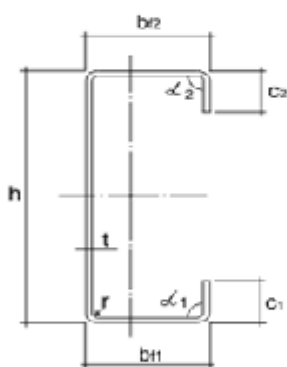
**Example H**

Расчетное усилие сжатия	N	85,700 кН
Длина элемента	L	1,500 м
Коэффициент приведения длины относительно оси x - x	$\mu_x$	1
Коэффициент приведения длины относительно оси y - y	$\mu_y$	1
Коэффициент приведения длины (кручение)	$k_T$	1
Коэффициент условий работы элемента (устойчивость)	$\gamma_c$	1
Коэффициент условий работы элемента (прочность)	$\gamma_c$	1
Предельная гибкость	$\lambda_u$	145,8

**Сечение**

C 102-2-120

ECCSLipChannel



h	102,0 мм
t	2,0 мм
b <sub>11</sub>	120,0 мм
b <sub>12</sub>	120,0 мм
c <sub>1</sub>	26,0 мм
c <sub>2</sub>	26,0 мм
$\alpha_1$	90,0 °
$\alpha_2$	90,0 °
r	10,0 мм
t <sub>coat</sub>	0,00 мм

**Сталь**

Группа стандартов	EN
Стандарт	EN 10147
Сталь	S350GD
Нормативное сопротивление стали по пределу текучести	$R_{yH}$ 355 Н/мм <sup>2</sup>
Нормативное сопротивление стали по пределу прочности	$R_{uH}$ 420 Н/мм <sup>2</sup>
Модуль упругости	E 206000 Н/мм <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона	$\nu$ 0,3
Коэффициент надёжности по материалу	$\gamma_m$ 1,05

Рисунок 2.2.9 – Результаты расчёта, представленные в Microsoft Excel®:

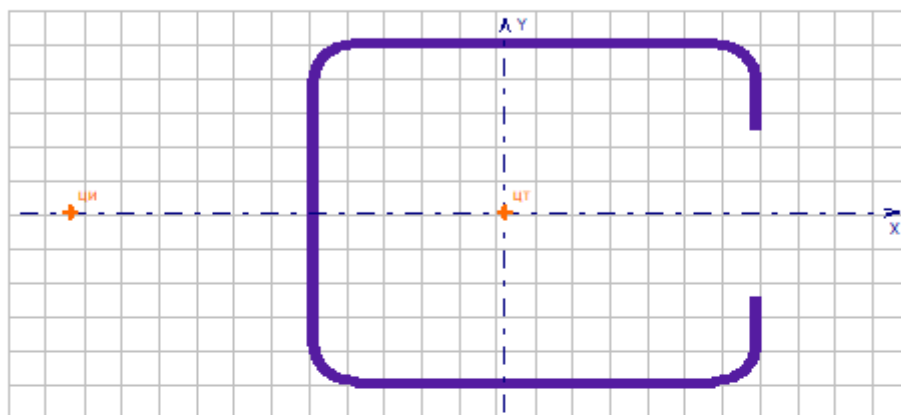
*Исходные данные*



Example H

C 102-2-120 ECCSLipChannel

Характеристики полного сечения



Наименование характеристики	Обозн.	Значение Ед.изм.
Площадь поперечного сечения	A	7,342 см <sup>2</sup>
Момент инерции относительно оси x - x	I <sub>x</sub>	139,162 см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения для нижнего волокна	W <sub>ниж</sub>	27,287 см <sup>3</sup>
Момент сопротивления сечения для верхнего волокна	W <sub>верх</sub>	27,287 см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси x - x	i <sub>x</sub>	4,354 см
Момент инерции относительно оси y - y	I <sub>y</sub>	140,533 см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения для левого волокна	W <sub>лев</sub>	27,044 см <sup>3</sup>
Момент сопротивления сечения для правого волокна	W <sub>прав</sub>	20,656 см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси y - y	i <sub>y</sub>	4,375 см
Расстояние от левого волокна стенки до центра тяжести сечения	z0	5,196 см
Расстояние от нижнего волокна до центра тяжести сечения	Y <sub>цт</sub>	5,100 см
Положение центра изгиба относительно центра тяжести по оси x - x	X <sub>цв</sub>	-11,573 см
Положение центра изгиба относительно центра тяжести по оси y - y	Y <sub>цв</sub>	0,000 см
Момент инерции при свободном кручении	I <sub>t</sub>	0,102933 см <sup>4</sup>
Секториальный момент инерции	I <sub>w</sub>	4728,070 см <sup>6</sup>
Вес одного погонного метра профиля		5,97 кг/м

Рисунок 2.2.10 – Результаты расчёта, представленные в Microsoft Excel®:  
Геометрические характеристики полногo сечения




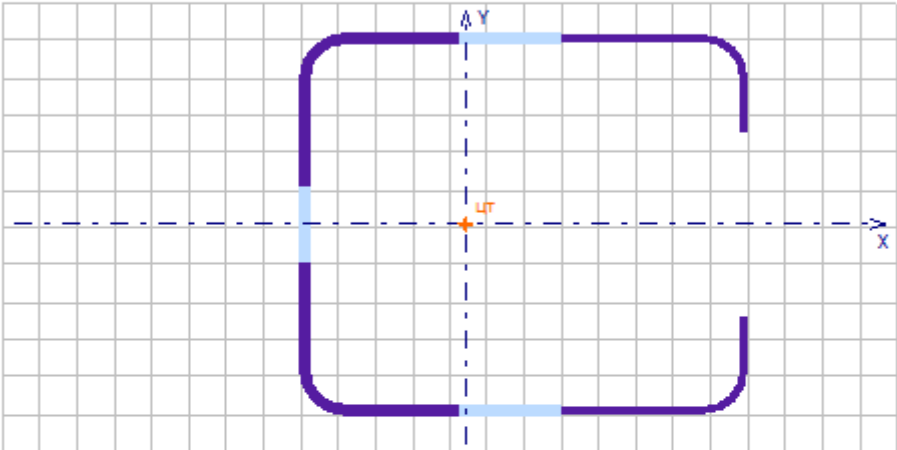
	Delta Engineering Software	CFSteel 4.3	страница 3
	http://www.CFSteel.ru	User	
	mailto:deltaing@mail.ru	CP260	14.04.2022
<b>Example H</b>			
C 102-2-120 ECCSLipChannel			
Характеристики эффективного сечения			
			
Наименование характеристики	Обозн.	Значение	Ед.изм.
Площадь поперечного сечения	$A_{ef}$	4,756	см <sup>2</sup>
Момент инерции относительно оси x - x	$I_{x\,ef}$	88,730	см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения для верхнего волокна	$W_{ab\,ef}$	17,398	см <sup>3</sup>
Момент сопротивления сечения для нижнего волокна	$W_{xii\,ef}$	17,398	см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси x - x	$i_{x\,ef}$	4,320	см
Момент инерции относительно оси y - y	$I_{y\,ef}$	96,765	см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения для левого волокна	$W_{ylns\,ef}$	21,937	см <sup>3</sup>
Момент сопротивления сечения для правого волокна	$W_{ynp\,ef}$	12,816	см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси y - y	$i_{y\,ef}$	4,511	см
Расстояние от левого волокна стенки до центра тяжести сечения	$Z_{0\,ef}$	4,411	см
Расстояние от нижнего волокна до центра тяжести	$Y_{ur\,ef}$	5,100	см

Рисунок 2.2.11 – Результаты расчёта, представленные в Microsoft Excel®:  
*Геометрические характеристики эффективного сечения*



**Example H**

Проверка	Расчётное неравенство	Значение		Пункт (формула) СП 260
Расчёт на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{ef} R_y \gamma_c} + \frac{M_{ed}}{W_{yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,688 < 1	✓	7.7.4
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)	$\frac{N}{\alpha_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{e_N N}{\lambda_{eff} W_{yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,802 < 1	✓	7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)	$\frac{N}{\alpha_x A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{e_N N}{\lambda_{eff} W_{yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,802 < 1	✓	7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	$\left( \frac{N}{\alpha_y A_{ef} R_y \gamma_c} \right)^{0,1} + \left( \frac{e_N N}{\lambda_{eff} W_{yef} R_y \gamma_c} \right)^{0,1} \leq 1$	1,038 > 1	✗	7.7.10.4
Проверка гибкости элемента	$\lambda_{max} \leq \lambda_u$	34,5 < 145,8	✓	10.4

**Расчёт на прочность при сжатии с изгибом**

Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное усилие сжатия	N	85,700	кН	
Эксцентриситет	e <sub>N</sub>	0,785	см	7.7.2.3
Площадь эффективного сечения	A <sub>ef</sub>	4,756	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения	W <sub>yef</sub>	12,816	см <sup>3</sup>	7.7.4
Расчётное сопротивление стали по пределу текучести	R <sub>y</sub>	338	Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы элемента	γ <sub>c</sub>	1		

**Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.99)**

Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	N	85,700	кН	
Эксцентриситет	e <sub>N</sub>	0,785	см	7.7.2.3
Площадь эффективного сечения	A <sub>ef</sub>	4,756	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения	W <sub>yef</sub>	12,816	см <sup>3</sup>	
Геометрическая длина элемента	L	1,500	м	
Расчётная длина относительно оси x - x	l <sub>dfx</sub>	1,500	м	

Рисунок 2.2.12,a – Результаты расчёта, представленные в Microsoft Excel®: Проверки (начало)

Расчётная длина относительно оси у - у	$l_{dy}$	1,500 м	
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	$L_{крТ}$	1,500 м	
Приведённая гибкость относительно оси х - х	$\lambda_x$	1,123	7.7.8.1
Приведённая гибкость относительно оси у - у	$\lambda_y$	1,118	7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси х - х		b	7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси у - у		b	7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\Phi_x$	0,935	7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\Phi_y$	0,936	7.7.8.1
Критическая сила для крутильной формы потери устойчивости	$N_{крТ}$	253,097 кН	7.7.8.4
Критическая сила для изгибно-крутильной формы потери устойчивости	$N_{крТФ}$	217,635 кН	7.7.8.5
Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии	$M_{кр}$	3612,940 кН·см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\lambda_{LT}$	0,346	7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b	7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,939	7.7.9.2
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1	
Коэффициент взаимодействия	k	1,402	
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	338 Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	1	
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.100)</b>			
Параметр	Обозн.	Значение Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	N	85,700 кН	
Эксцентриситет	$e_N$	0,785 см	7.7.2.3
Площадь эффективного сечения	$A_{эф}$	4,756 см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения	$W_{эф}$	12,816 см <sup>3</sup>	
Геометрическая длина элемента	L	1,500 м	

Рисунок 2.2.12,б – Результаты расчёта, представленные в Microsoft Excel®:  
Проверки (продолжение)

Расчётная длина относительно оси x - x	$l_{dfx}$	1,500 м	
Расчётная длина относительно оси y - y	$l_{dfy}$	1,500 м	
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	$L_{сгт}$	1,500 м	
Приведённая гибкость относительно оси x - x	$\bar{\lambda}_x$	1,123	7.7.8.1
Приведённая гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	1,118	7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси x - x		b	7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси y - y		b	7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\varphi_x$	0,935	7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\varphi_y$	0,936	7.7.8.1
Критическая сила для крутильной формы потери устойчивости	$N_{сгт}$	253,097 кН	7.7.8.4
Критическая сила для изгибно-крутильной формы потери устойчивости	$N_{сгтф}$	217,635 кН	7.7.8.5
Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии	$M_{сг}$	3612,940 кН·см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{лт}$	0,346	7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b	7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{лт}$	0,939	7.7.9.2
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1	
Коэффициент взаимодействия	k	1,402	
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	338 Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	1	
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)</b>			
Параметр	Обозн.	Значение Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное усилие сжатия	N	85,700 кН	
Эксцентриситет	$e_N$	0,785 см	7.7.2.3
Площадь эффективного сечения	$A_{эф}$	4,756 см <sup>2</sup>	

Рисунок 2.2.12,в – Результаты расчёта, представленные в Microsoft Excel®:  
Проверки (продолжение)

Расчётный момент сопротивления сечения	$W_{yef}$	12,816 см <sup>3</sup>	
Понижающий коэффициент	$\varphi$	0,703	
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{min}$	0,939	7.7.9.2
Расчётное сопротивление стали по пределу текучести	$R_y$	338 Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы элемента	$\gamma_c$	1	

Проверка гибкости элемента			
Параметр	Обозн.	Значение Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Максимальная гибкость элемента	$\lambda_{max}$	34,5	
Предельная гибкость	$\lambda_c$	145,8	

Рисунок 2.2.12,г – Результаты расчёта, представленные в Microsoft Excel®:  
Проверки (окончание)

## 2.2.2. Устойчивость сжатых элементов в соответствии с ЕС3

2.2.2.1. Расчёт несущей способности по устойчивости сжатого элемента С-образного сечения

**Задание:** В программе CFSteel определить расчётную несущую способность по устойчивости сжатого стержневого элемента С-образного сечения из Примера Н документа Worked Examples According to EN 1993-1-3 Eurocode 3, Part 1.3 / ECCS TC 7, № 123 [10].

Расчётная схема элемента приведена на Рисунке 2.2.13.



Рисунок 2.2.13 – Расчётная схема элемента

Дополнительные граничные условия: расчётная длина элемента при потере устойчивости по крутильной или изгибно-крутильной форме равна геометрической длине элемента, имеются закрепления на обоих концах от перемещения из плоскости, отсутствует закрепление от деформации торцовых сечений.

Поперечное сечение представлено на Рисунке 1.2.1 и 1.2.9. Размеры, а также геометрические характеристики полного и эффективных сечений приведены в п.1.2.2. Промежуточные вычисления для определения несущей способности сведены в Таблицу 2.2.2. Расчёт в CFSteel выполнен в двух вариантах: вариант (а) – упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба  $M_{cr}$  вычислен программно в соответствии с ECCS [26]; (б) – значение упругого критического момента потери устойчивости плоской формы изгиба  $M_{cr}$  вводилось в программу равным значению в Примере Н [10].

Таблица 2.2.2 - Сопоставление результатов расчёта

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-1, EN 1993-1-3	Значение по [10]	CFSteel вариант (а)	%	CFSteel вариант (б)	%
Условная гибкость для расчёта по изгибной форме потери устойчивости относительно оси у - у	$\bar{\lambda}_y$	-	(6.51)	0,360	0,360	0	0,360	0
Кривая устойчивости (ось у - у)			Табл. 6.3	b	b	-	b	-
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha$	-	Табл. 6.1	0,34	0,34	-	0,34	-
Редукционный коэффициент	$\chi_y$	-	п.6.3.1.2	0,942	0,942	0	0,942	0
Расчётное значение несущей способности по изгибной форме потери устойчивости	$N_{b,Ed}$	кН	(6.48)	156,2	156,6	0,3	156,6	0,3
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	кН	(6.33а)	236,79*	258,01*	9*	258,01*	9*
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,TF}$	кН	(6.35)	205,73*	221,86*	7,8*	221,86*	7,8*
Условная гибкость для расчёта по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\bar{\lambda}_{TF}$	-	(6.53)	0,898	0,865	3,8	0,865	3,8
Редукционный коэффициент	$\chi_{TF}$	-	п.6.3.1.2	0,662	0,683	3,2	0,683	3,2
Расчётная несущая способность по устойчивости	$N_{b,Rd}$	кН	(6.48)	109,7	113,6	3,6	113,6	3,6
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	кНсм		32581	3365	-	32581	-
Условная гибкость для расчёта по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\bar{\lambda}_{LT}$	-	п.6.3.2.2	0,136	0,427	-	0,136	-
Редукционный коэффициент	$\chi_{LT}$	-	п.6.3.2.2	1,0	0,915	-	1,0	-
Расчётная несущая способность элемента на изгиб	$M_{b,Rd}$	кНсм		604,9	562,6	7,5	614,9	1,6
Расчётная несущая способность по устойчивости	$N_{Ed}$	кН	(6.38)	85,7	87,2	1,8	89,0	3,9

\* Значения момента инерции сечения при кручении и секториального момента инерции, входящие в формулы расчёта  $N_{cr,T}$  и  $N_{cr,TF}$ , в [10] вычислены с учётом закругления углов; в CFSteel данные величины вычисляются в предположении отсутствия закруглений в соответствии с Приложением С [4]. Все остальные геометрические характеристики в [10] и в CFSteel вычислены с учётом закругления углов

#### 2.2.2.2. Проверка устойчивости сжатого элемента С-образного сечения

**Задание:** В программе CFSteel выполнить расчёт на устойчивость сжатых элементов С-образного сечения, данные о которых приведены в работе Design of Cold-Formed Members Following New EN 1993-1-3 // Heinisuo, M., Kukkonen, J. [23]. Расчёт выполнить в соответствии с нормами EC3.

В [23] приведён расчёт по EC3 стержня С-образного сечения (Рисунок 2.2.14), результаты испытаний которого представлены в работе [25].

Размеры сечения:  $h = 97,3$  мм,  $t = 1,48$  мм,  $b_{f1} = b_{f2} = 37$  мм,  $c = 12,5$  мм,  $r = 0,85$  мм (внутренний).  
 Материал - сталь:  $E = 210000$  Н/мм<sup>2</sup>,  $G = 80769$  Н/мм<sup>2</sup>,  $\nu = 0,3$ ,  $f_{0,2} = 505$  Н/мм<sup>2</sup>, частный коэффициент  $\gamma_{M1} = 1,0$ .

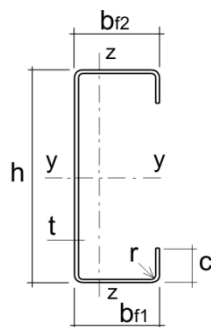


Рисунок 2.2.14 - Поперечное сечение

В работе [25] приведены результаты испытаний стержней приведённого выше сечения разной длины от 1000 до 3000 мм. На обоих концах осуществлялась жёсткое закрепление так, что: исключались перемещения вдоль осей  $y - y$  и  $z - z$ , поворот вокруг осей  $y - y$  и  $z - z$ , вращение вокруг продольной оси стержня, а также исключалась деформация торцевых сечений. Верхний конец стержня свободен в продольном направлении. Авторы [25] на основании анализа полученных экспериментальных данных установили, что при таких условиях закрепления требованиями EN 1993-1-3 [4] по учёту эксцентриситета  $e_N$ , появляющегося в результате смещения центра тяжести эффективного сечения относительно центра тяжести полного сечения, можно пренебречь. Если нагрузка действует в центре тяжести сечения, такой случай может рассматриваться как центрально сжатый стержень. На основании этого в [23] за несущую способность стержня принято наименьшее значение из несущей способности по изгибной форме потери устойчивости, крутильной и изгибно-крутильной форме для центрально сжатого стержня:  $N_{b,Rd} = \min(N_{b,Rd,F}, N_{b,Rd,T}, N_{b,Rd,TF})$ . В Таблице 2.2.3 приведено сравнение результатов расчёта в CFSteel по EC3 с результатами расчёта [23] и результатами испытаний  $P_{эксп}$  [25]. С целью верификации расчётных значений  $N_{b,Rd,F}$ ,  $N_{b,Rd,T}$ ,  $N_{b,Rd,TF}$  в CFSteel также как и в [23] принято  $N_{b,Rd} = \min(N_{b,Rd,F}, N_{b,Rd,T}, N_{b,Rd,TF})$ .

Таблица 2.2.3 – Сравнение результатов CFSteel с [23] и [25]

Расчётн. длины $L_{cr,z}=L_{cr,y}=L_T$ мм	$N_{b,Rd,F}$ [23] кН	$N_{b,Rd,F}$ CFSteel кН	%	$N_{b,Rd,TF}$ [23] кН	$N_{b,Rd,TF}$ CFSteel кН	%	$N_{b,Rd}$ [23] кН	$N_{b,Rd}$ CFSteel кН	%	$P_{эксп}$ [25] кН	$P_{эксп}/N_{b,Rd}$ [23]	$P_{эксп}/N_{b,Rd}$ CFSteel
500	86,5	87,0	0,6	84,4	85,0	0,7	84,4	85,0	0,7	89,6	1,06	1,05
750	75,4	75,6	0,3	71,6	72,1	0,7	71,6	72,1	0,7	82,4	1,15	1,15
1000	61,5	61,4	0,2	56,9	57,3	0,7	56,9	57,3	0,7	70,1	1,23	1,22
1250	47,7	47,4	0,6	44,0	44,3	0,7	44,0	44,3	0,7	58,1	1,32	1,31
1500	36,7	36,4	0,8	35,6	34,8	2,2	35,6	34,8	2,2	39,3	1,11	1,13

RGB: 232 244 254

В таблице 2.2.4 приведено сравнение результатов, полученных в CFSteel с учетом эксцентриситета  $e_N$  (п.6.1.3 [4]) по формуле взаимодействия (6.36) с экспериментальными данными [25].

Таблица 2.2.4 – Сравнение результатов CFSteel с [25]

Расчётн. длины $L_{cr,z}=L_{cr,y}=L_T$ мм	$P_{эксп}$ [25] кН	$P_{эксп}/N_{Rd}$ CFSteel (EC3)
500	89,6	1,23
750	82,4	1,29
1000	70,1	1,33
1250	58,1	1,38
1500	39,3	1,20

В работе [25] также приведены результаты испытаний стержней такого же сечения длиной 500, 1000 и 1500 мм но с другим закреплением на концах. Стержни имели шарнирное закрепление относительно оси  $z - z$  и жёсткое относительно оси  $y - y$ . Также имело место жёсткое закрепление от вращения вокруг продольной оси стержня и от деформации торцевых сечений. Нагрузка прилагалась в центре тяжести сечения. В Таблице 2.2.5 приведены результаты расчётов в CFSteel испытанных стержней. Расчёты выполнены по нормам EC3. Проверка несущей способности по устойчивости производилась по формуле (6.36) [4] с учётом  $e_N$ .

Таблица 2.2.5 – Сравнение результатов CFSteel с [25]

Длина стержня, мм	$P_{эксп}$ [25] кН	$P_{эксп}/N_{Rd}$ CFSteel (EC3)
1	2	3
500	82,0	1,13
1000	70,0	1,26
1500	40,0	1,18

### 2.2.3. Устойчивость сжатых элементов в соответствии с AISI S100 Specification

#### 2.2.3.1. Определение несущей способности сжатого элемента из спаренных С-образных профилей

**Задание:** Используя ASD и LRFD методы определить несущую способность сжатого элемента из спаренных С-образных профилей (Рисунок 2.2.15). Коэффициенты приведения длины относительно обеих осей  $K_x = K_y = 1,0$ . Нераскреплённые длины:  $L_x = 12 \text{ ft} = 3658 \text{ мм}$ ,  $L_y = 6 \text{ ft} = 1829 \text{ мм}$ .  $K_t L_t = 6 \text{ ft} = 1829 \text{ мм}$ .  $F_y = 33 \text{ ksi} = 227,5 \text{ N/mm}^2$ . Расстояние между метизами, соединяющими профили в сечении  $12 \text{ in} = 305 \text{ мм}$ . Размеры С-образного профиля:  $h = 8 \text{ in} = 203,2 \text{ мм}$ ,  $t = 0,075 \text{ in} = 1,905 \text{ мм}$ ,  $b = 3 \text{ in} = 76,2 \text{ мм}$ ,  $c = 0,7 \text{ in} = 17,78 \text{ мм}$ ,  $r = 3/32 \text{ in} = 2,38 \text{ мм}$ . Пример взят из книги Wei-Wen Yu, LaBoube R.A. Cold-formed steel design // John Wiley & Sons, Inc., Fourth edition, 2010, 491 p. [31].

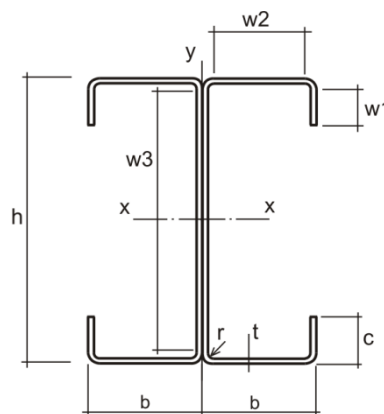


Figure 2.2.15 - Cross section

*Solution:* Properties of a full section are shown in Table 2.2.6.



Table 2.2.6 – Properties of a full section

Property	[31]				CFSteel		%
	Volume	U.S. unit	Value	SI unit	Value	SI unit	
A	2,24	in <sup>2</sup>	14,448	cm <sup>2</sup>	14,395	cm <sup>2</sup>	0,4
I <sub>x</sub>	22,1	in <sup>4</sup>	919,80	cm <sup>4</sup>	919,53	cm <sup>4</sup>	0,03
I <sub>y</sub>	4,20	in <sup>4</sup>	174,804	cm <sup>4</sup>	174,663	cm <sup>4</sup>	0,08
r <sub>x</sub>	3,15	in	8,0	cm	7,99	cm	0,1
r <sub>y</sub>	1,37	in	3,47	cm	3,48	cm	0,3

Table 2.2.7 – Nominal buckling stresses

Description	Sym bol	Value according to [31]				CFSteel		Discre pancy, %
		Value	U.S. unit	Value	SI unit	Value	SI unit	
Elastic flexural buckling								
Modified slenderness ratio	$KL/r_m$	53,717		53,717		53,674		0,08
Elastic flexural buckling stress	$F_e$	100,902	ksi	695,72	N/mm <sup>2</sup>	695,45	N/mm <sup>2</sup>	0,04
Plate buckling coefficient	$k$	19,83		19,83		19,83		0
Elastic torsional buckling								
Elastic torsional buckling stress	$F_e$	152,02	ksi	1048,2	N/mm <sup>2</sup>	1086,3	N/mm <sup>2</sup>	3,6
Stress $F_n$								
Slenderness factor	$\lambda_c$	0,572		0,572		0,573		0,02
Stress	$F_n$	28,777	ksi	198,42	N/mm <sup>2</sup>	198,77	N/mm <sup>2</sup>	0,2

Calculation of the effective area at the stress  $F_n$  is summarized in Table 2.2.8.

Table 2.2.8 - Calculation of the effective area at the stress  $F_n$

Description	Sym bol	Value according to [31]				CFSteel		Discre pancy, %
		Value	U.S. unit	Value	SI unit	Value	SI unit	
Effective width of the compression flanges								
Parameter	$S$	40,982		40,982		40,906		0,2
Required moment of inertia of the edge stiffener	$I_a$	0,002	in	0,83	mm	0,83	mm	0
Moment of inertia of the full edge stiffener	$I_s$	0,000937	in	0,34	mm	0,39	mm	14
Parameter	$R_f$	0,469		0,469		0,472		0,6
Plate buckling coefficient	$k$	3,09		3,09		3,09		0
Slenderness factor	$\lambda$	0,664		0,664		0,664		0
Effective width	$b$	2,6625	in	67,62	mm	67,63	mm	0,01
Effective width of edge stiffeners								
Slenderness factor	$\lambda$	0,355		0,355		0,356		0,03
Effective width	$d_s'$	0,5313	in	13,49	mm	13,50	mm	0,07
Reduced effective width	$d_s$	0,249	in	6,32	mm	6,37	mm	0,08
Slenderness factor	$\lambda$	1,238		1,238		1,238		0
Effective width of web element								
Slenderness factor	$\lambda$	1,678		1,678		1,681		0,2
Reduction factor	$\rho$	0,518		0,518		0,517		0,2
Effective width	$b$	3,969	in	100,81	mm	100,60	mm	0,02
Effective area of a section								
Effective area of a section	$A_e$	1,601	in <sup>2</sup>	10,346	cm <sup>2</sup>	10,279	cm <sup>2</sup>	0,7
Nominal axial load for flexural buckling	$P_n$	46,07	kips	204,919	kN	204,124	kN	0,04

Because edge-stiffened flanges are used for the section, the nominal axial load for distortional buckling should be checked according to Section C4.2 [7]. These calculations are summarized in Table 2.2.9.

Table 2.2.9 - Distortional buckling

Description	Sym bol	Value according to [31]				CFSteel		Discre pancy, %
		Value	U.S. unit	Value	SI unit	Value	SI unit	
Method (a) of $F_d$ calculation								
Critical length	$L_{cr}$	20,36	in	517,1	mm	517,1	mm	0
Plate buckling coefficient for distortional buckling	$k_d$	0,578		0,578		0,578		0
Elastic distortional buckling stress	$F_d$	9,63	ksi	66,4	N/mm <sup>2</sup>	66,2	N/mm <sup>2</sup>	0,3
Parameter	$P_{crd}$	21,57	kips	95,94	kN	95,36	kN	0,6
Slenderness factor	$\lambda_d$	1,85		1,85		1,86		0,5
Nominal axial load for distortional buckling	$P_n$	31,09	kips	138,29	kN	137,72	kN	0,4
Method (b) of $F_d$ calculation								
Critical length	$L_{cr}$	25,35	in	643,9	mm	643,7	mm	0
Elastic distortional buckling stress	$F_d$	24,90	ksi	171,7	N/mm <sup>2</sup>	171,1	N/mm <sup>2</sup>	0,3
Parameter	$P_{crd}$	55,78	kips	248,11	kN	246,40	kN	0,7
Slenderness factor	$\lambda_d$	1,151		1,151		1,154		0,3
Nominal axial load for distortional buckling	$P_n$	49,25	kips	219,64	kN	218,17	kN	0,7
Allowable load for the ASD method	$P_a$	25,59	kips	113,82	kN	113,40	kN	0,4
Design strength for the LRFD method	$\Phi_c P_n$	39,16	kips	174,18	kN	173,51	kN	0,4

## 2.3. Сжатие с изгибом

### 2.3.1. Сжатый с изгибом элемент из С-образного профиля по СП 260.1325800.2016

**Задание:** Проверить прочность и устойчивость сжатого с изгибом стержневого элемента С-образного сечения. Расчётная схема элемента приведена на Рисунке 2.3.1.  $l = 1,5$  м,  $N = 40$  кН;  $q = 0,15$  кН/см. Распределённая нагрузка приложена на уровне стенки.  $R_{yn} = 35,5$  кН/см<sup>2</sup>;  $\gamma_m = 1,05$ ;  $R_y = 33,81$  кН/см<sup>2</sup>. Коэффициент условий работы принять равным 1,0.

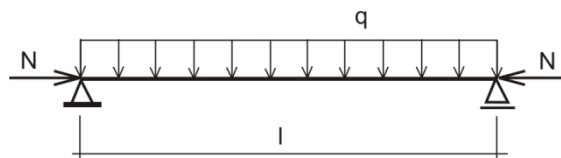


Рисунок 2.3.1 – Расчётная схема элемента

Поперечное сечение приведено на Рисунке 2.3.2. Размеры сечения:  $h = 102$  мм,  $t = 2$  мм,  $b = 120$  мм,  $c = 26$  мм,  $r = 10$  мм (внутренний). Геометрические характеристики сечения принять из расчёта по CFSteel.

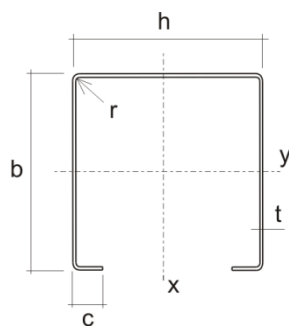


Рисунок 2.3.2 – Поперечное сечение

Граничные условия: имеются закрепления на обоих концах от перемещения из плоскости, отсутствует закрепление от деформации торцовых сечений, расчётная длина элемента при потере устойчивости по крутильной и изгибно-крутильной форме равна геометрической длине элемента.

$$M_{y_{max}} = \frac{ql^2}{8} = \frac{0,15 \cdot 150^2}{8} = 421,875 \text{ кНсм}$$

$$Q_{max} = \frac{ql}{2} = \frac{0,15 \cdot 150}{2} = 11,25 \text{ кН}$$

Геометрические характеристики полного и эффективного сечений приведены на Рисунках 2.3.6 – 2.3.8.

*Проверка прочности сечения на действие поперечной силы (п. 7.7.6 [1])*

***Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel***

*Прочность элемента при сжатии с изгибом (п.7.7.4 [1])*

***Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel***

В соответствии с Приложением Г [1]  $x_g = x_a - x_s$ , где  $x_a$  – координата точки приложения поперечной нагрузки;  $x_s$  – координата центра изгиба (Рисунок 2.3.4).

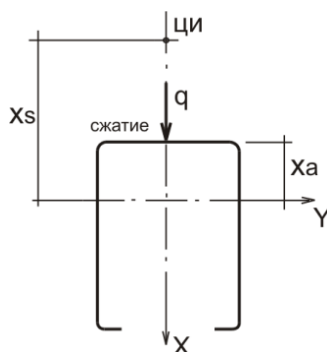


Рисунок 2.3.4 – К определению  $x_g$

*Расчёт по п. 7.7.10.4[1]*

*Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel*

Условие устойчивости согласно п.7.7.10.4 [1]

$$\left(\frac{N}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_{max}}{\chi_{LT} W_{y,ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} = \left(\frac{40}{0,703 \cdot 4,76 \cdot 33,81 \cdot 1}\right)^{0,8} + \left(\frac{421,875}{0,979 \cdot 23,526 \cdot 33,81 \cdot 1}\right)^{0,8} = 1,048 > 1.$$

Условие устойчивости не выполняется.

Разгружающее действие момента от эксцентриситета, возникающего от несовпадения осей полного и эффективного сечений, не учитываем.

*Расчёт по п. 7.7.10.3[1]*

Для сжатых с изгибом элементов должны выполняться условия:

$$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{M_{max}}{\chi_{LT} W_{y,ef} R_y \gamma_c} \leq 1,$$

$$\frac{N}{\varphi_x A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xy} \frac{M_{max}}{\chi_{LT} W_{y,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$$

*Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel*

Формулы взаимодействия (п. 7.7.10.3[1])

$$\frac{40}{0,936 \cdot 4,76 \cdot 33,81 \cdot 1} + 1,139 \frac{421,875}{0,98 \cdot 23,526 \cdot 33,81 \cdot 1} = 0,883 < 1,$$

$$\frac{40}{0,935 \cdot 4,76 \cdot 33,81 \cdot 1} + 1,139 \frac{421,875}{0,98 \cdot 23,526 \cdot 33,81 \cdot 1} = 0,883 < 1.$$

В таблице 2.3.1 приведено сравнение результатов ручного расчёта, представленного выше, с результатами, полученными в CFSteel.

Таблица 2.3.1 – Сопоставление результатов расчётов

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) СП 260	Ручной расчёт	CFSteel	Расхождение, %
<i>Проверка прочности сечения на действие поперечной силы</i>						
Условная гибкость стенки	$\bar{\lambda}_w$	-	7.7.6.2	0,827	0,827	0
Расчётное напряжение при сдвиге	$R_s$	кН/см <sup>2</sup>	7.7.6.1	19,61	19,61	0
Несущая способность сечения	$Q_w$	кН	7.7.6.1	92,56	92,56	0
<i>Проверка прочности при сжатии с изгибом</i>						
Левая часть проверки прочности		-	7.7.4	0,779	0,779	0
<i>Проверка устойчивости по п.7.7.10.4 [1]</i>						
Приведённая гибкость относительно оси x - x	$\bar{\lambda}_x$	-	7.7.8.1	0,358	0,358	0

Элементы

Приведённая гибкость относительно оси у - у	$\overline{\lambda}_y$	-	7.7.8.1	0,356	0,356	0
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии по изгибной форме	$\varphi_x$	-	СП 16	0,935	0,935	0
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии по изгибной форме	$\varphi_y$	-	СП 16	0,936	0,936	0
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	кН	(7.90)	253,1	253,1	0
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,TF}$	кН	(7.91)	217,6	217,6	0
Условная гибкость при крутильной (изгибно-крутильной) форме потери устойчивости	$\overline{\lambda}_T$	-	(7.89)	0,860	0,860	0
Коэффициент устойчивости по крутильной/ изгибно-крутильной форме	$\varphi_T$	-	7.7.8.3	0,703	0,703	0
Минимальный коэффициент	$\varphi_{min}$	-		0,703	0,703	0
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	кНсм	Приложение Г	17610	17615,8	0,03
Условная гибкость	$\overline{\lambda}_{LT}$	-	(7.96)	0,213	0,212	0,5
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	-	(7.94)	0,996	0,996	0
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	-	СП 16	0,979	0,979	0
Левая часть проверки устойчивости элемента	-	-	(7.101)	1,048	1,048	0
<i>Проверка устойчивости по п.7.7.10.3 [1]</i>						
Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии при постоянном значении изгибающего момента по длине элемента	$M_{cr0}$	кНсм		10260	10209,8	0,4
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба при постоянном моменте по длине элемента	$\overline{\lambda}_0$	-	Приложение В	0,279	0,279	0
Предельное значение условной гибкости при потере устойчивости плоской формы изгиба при постоянном моменте по длине элемента	$\overline{\lambda}_{0\ lim}$	-		0,202	0,202	0
Коэффициент перехода к эквивалентной прямоугольной эпюре моментов	$C_{m,y0}$		Таблица В.2	0,999	1,000	0,1
Параметр	$a_{LT}$	-		0,999	0,999	0
Коэффициент	$C_{m,y}$	-		1	1	0
Коэффициент	$C_{m,LT}$	-		1,106	1,108	0,2
Параметр	$\mu_y$	-	Таблица В.1	0,998	0,998	0
Параметр	$\mu_x$	-	Таблица В.1	0,998	0,998	0
Коэффициент взаимодействия $k_{yy}$	$k_{yy}$	-	Таблица В.1	1,140	1,142	0,2
Коэффициент взаимодействия $k_{xy}$	$k_{xy}$	-	Таблица В.1	1,140	1,142	0,2
Левая часть неравенства (7.99)			п.7.7.10.3	0,883	0,884	0,1
Левая часть неравенства (7.100)			п.7.7.10.3	0,883	0,884	0,1

Результаты расчёта в программе CFSteel представлены на Рисунках 2.3.4 – 2.3.10.

Сжатие с изгибом [СП260]

Наименование элемента: Элемент 7-9

Длина элемента L: 1,5 м

Расчётное осевое усилие сжатия N: 40 кН К-т условий работы (уст-ть)  $\gamma_c$ : 1

Расчётный момент (устойчивость) M: 421,875 кН·см К-т условий работы (прочность)  $\gamma_c$ : 1

Расчётный момент (прочность) M: 421,875 кН·см Q: 11,25 кН  Проверка прочности

Ввод расчётной длины:  Ввод к-тов приведения длины:

Расчётная длина относительно оси x - x  $l_{efx}$ : 1,5 м К-т приведения длины  $\eta_x$ : 1

Расчётная длина относительно оси y - y  $l_{efy}$ : 1,5 м К-т приведения длины  $\eta_y$ : 1

Расчётная длина: крутильная форма  $L_{crT}$ : 1,5 м  Устойчивость плоской формы изгиба

Расчётная длина: плоская форма изгиба  $L_{crLT}$ : 1,5 м  $M_{cr}$ : 0 кН·см

Устойчивость плоской формы изгиба

Граничные условия

Коэффициент закрепления концов от поворота вокруг оси эл-та k: 1

Коэффициент стеснения деформации концов элемента  $k_w$ : 1


Коэффициент  $C_1$ : 1,127


В точке с максимальным моментом (устойчивость) M

Уровень приложения нагрузки...  сжатие  сжатие

Коэффициент  $C_2$ : 0,454

Коэффициент  $C_3$ : 0,525

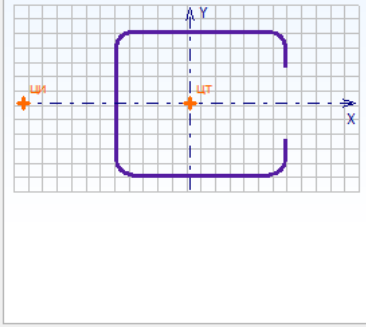
Эпюра моментов ... 

Расчётный момент (прочность)  

Ослабление

Выбрать ...

Сечение



Выбрать... C 102-2-120 ECCSLipChannel

Сталь

Группа стандартов: EN

Стандарт: EN 10147

Сталь: S350GD

$R_{yk}$ : 355 Н/мм<sup>2</sup>  $R_{yk}$ : 420 Н/мм<sup>2</sup>

Комментарии

Сжатие с изгибом

Вычислить Закрыть Справка

Рисунок 2.3.4 – Ввод данных

Результаты

Общие данные | Характеристики полного сечения | Характеристики эффективного сечения | Характеристики эффективного сечения (изгиб) | Результаты расчёта

**Элемент 7-9**

Длина элемента	L	1,500 м
Расчётное осевое усилие сжатия	N	40,00 кН
Расчётный изгибающий момент (расчёт на устойчивость)	M	421,88 кН·см
Расчётный изгибающий момент (расчёт на прочность)	M	421,88 кН·см
Расчётная длина относительно оси x - x	$l_{efx}$	1,500 м
Расчётная длина относительно оси y - y	$l_{efy}$	1,500 м
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	$L_{crT}$	1,500 м
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	$L_{cr,LT}$	1,500 м
Коэффициент закрепления концов от поворота вокруг оси элемента	k	1
Коэффициент стеснения деформации концов элемента	$k_w$	1
Коэффициент	$C_1$	1,127
Коэффициент	$C_2$	0,454
Коэффициент	$C_3$	0,525

Уровень приложения поперечной нагрузки

Направление действия момента M (расчёт на устойчивость)

Вид эпюры моментов

Направление действия момента M (расчёт на прочность)

Коэффициент условий работы (расчёт на устойчивость)	$\gamma_c$	1
Коэффициент условий работы (расчёт на прочность)	$\gamma_c$	1

**Сечение**

C 102-2-120  
ECCSLipChannel

h	102,0 мм
t	2,0 мм
bf1	120,0 мм
bf2	120,0 мм
c1	26,0 мм
c2	26,0 мм
$\alpha_1$	90,0 °
$\alpha_2$	90,0 °
r	10,0 мм
t	0,00 мм

Excel | Закрывать | Справка

Рисунок 2.3.5 – Результаты расчёта. Общие данные

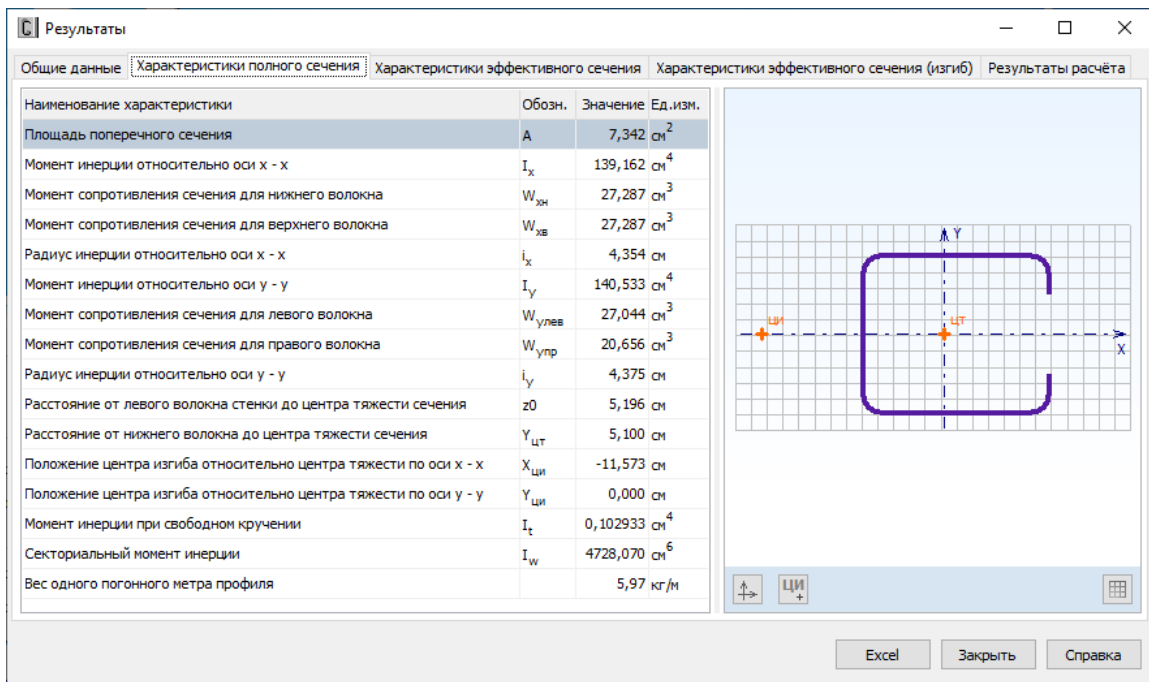


Рисунок 2.3.6 – Результаты расчёта. Характеристики полного сечения

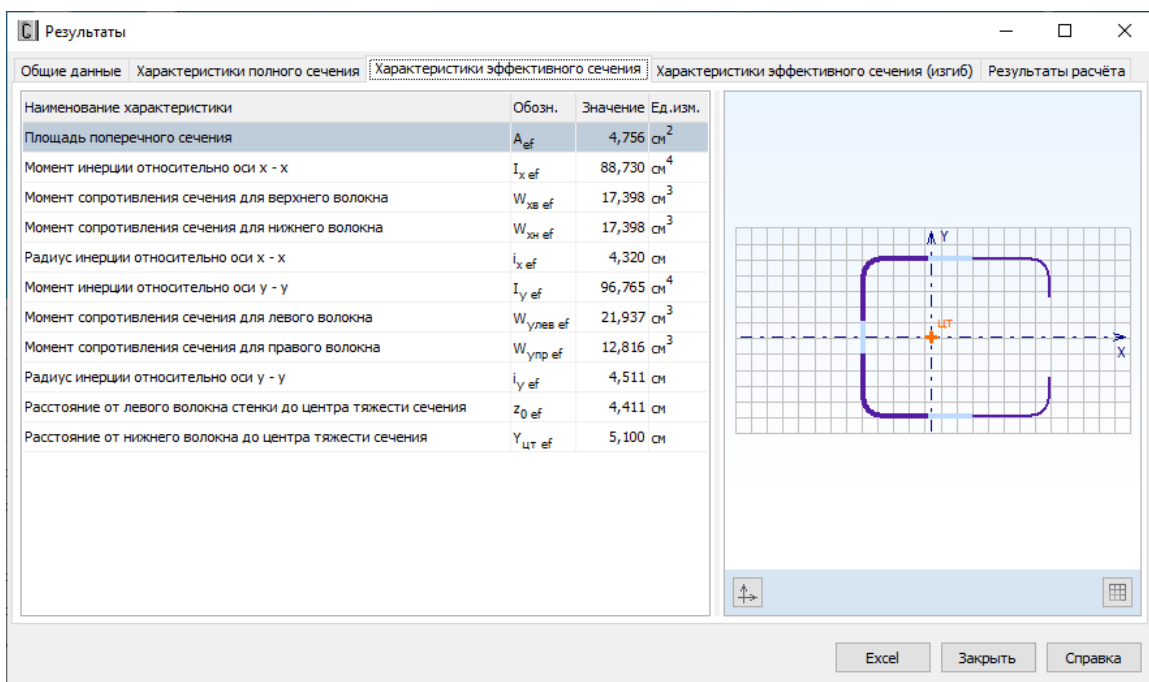


Рисунок 2.3.7 – Результаты расчёта. Характеристики эффективного сечения (сжатие)



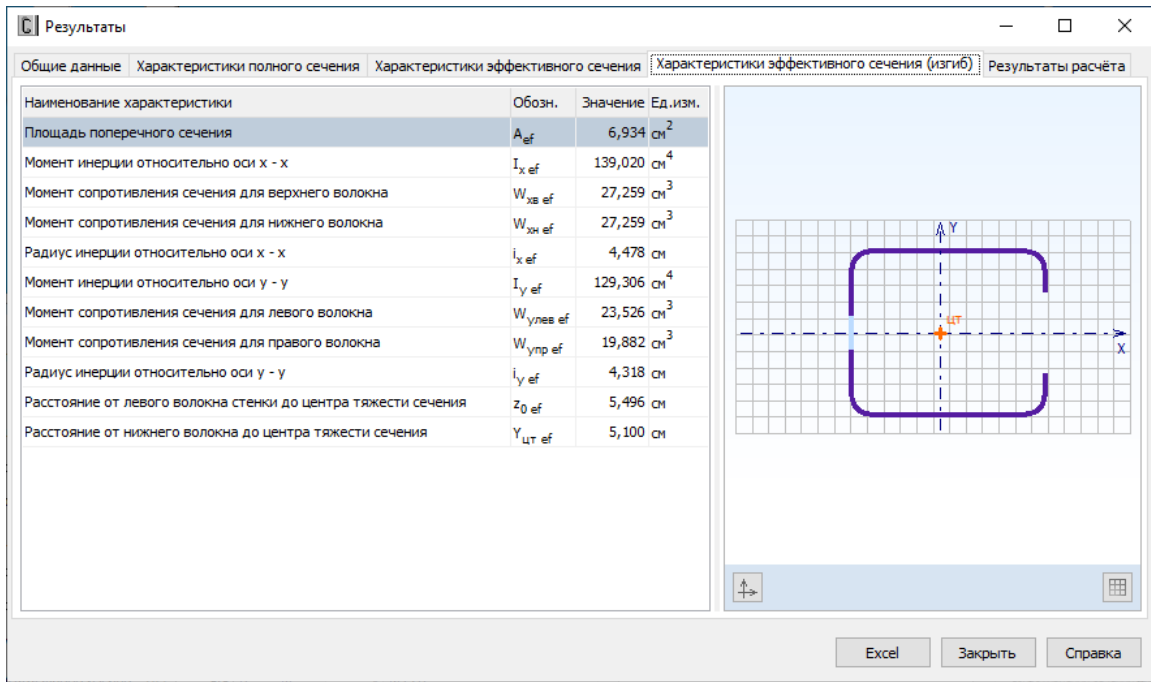


Рисунок 2.3.8 – Результаты расчёта. Характеристики эффективного сечения (изгиб)

Результаты

Характеристики эффективного сечения | Характеристики эффективного сечения (изгиб) | Результаты расчёта

Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула)
Расчёт на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{ef} R_y \gamma_c} + \frac{M_y + N e_N}{W_{yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,779 < 1	✓ 7.7.4
Расчёт на поперечную силу	$Q / Q_w \leq 1$	0,122 < 1	✓ 7.7.6
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{M_y + e_N N}{\chi_{LT} W_{yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,884 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)	$\frac{N}{\varphi_x A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xy} \frac{M_y + e_N N}{\chi_{LT} W_{yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,884 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.101)	$\left( \frac{N}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} + \left( \frac{e_N N + M_y (e)}{\chi_{LT} W_{yef} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} \leq 1$	1,048 > 1	✗ 7.7.10.4

**Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)**

Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	N	40,000	кН	
Изгибающий момент	M	421,875	кН·см	
Эксцентриситет	e <sub>N</sub>	-0,785	см	7.7.2.3
Эксцентриситет, принимаемый в расчёт	e <sub>N</sub>	0,000	см	
Площадь эффективного сечения	A <sub>ef</sub>	4,756	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения	W <sub>ef</sub>	23,526	см <sup>3</sup>	
Геометрическая длина элемента	L	1,500	м	
Расчётная длина относительно оси x - x	l <sub>efx</sub>	1,500	м	
Расчётная длина относительно оси y - y	l <sub>efy</sub>	1,500	м	
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	L <sub>сТ</sub>	1,500	м	
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	L <sub>сЛТ</sub>	1,500	м	
Приведённая гибкость относительно оси x - x	$\bar{\lambda}_x$	0,358		7.7.8.1
Приведённая гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,356		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси x - x		b		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси y - y		b		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ <sub>x</sub>	0,935		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ <sub>y</sub>	0,936		7.7.8.1
Критическая сила для крутильной формы потери устойчивости	N <sub>сТ</sub>	253,097	кН	7.7.8.4
Критическая сила для изгибно-крутильной формы потери устойчивости	N <sub>сТФ</sub>	217,635	кН	7.7.8.5
Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии	M <sub>ср</sub>	17615,758	кН·см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,212		7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b		7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	χ <sub>LT</sub>	0,979		7.7.9.2
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1		
Коэффициент взаимодействия	k	1,142		
Расчётное сопротивление стали	R <sub>y</sub>	338	Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	γ <sub>c</sub>	1		

Excel | Закрыть | Справка

Результаты

Характеристики эффективного сечения | Характеристики эффективного сечения (изгиб) | Результаты расчёта

Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула)
Расчёт на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{ef} R_y \gamma_c} + \frac{M_y + N e_N}{W_{yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,779 < 1	✓ 7.7.4
Расчёт на поперечную силу	$Q / Q_w \leq 1$	0,122 < 1	✓ 7.7.6
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{M_y + e_N N}{\chi_{LT} W_{yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,884 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{M_y + e_N N}{\chi_{LT} W_{yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,884 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.101)	$\left(\frac{N}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{e_N N + M_y (e_N)}{\chi_{LT} W_{yef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} \leq 1$	1,048 > 1	✗ 7.7.10.4

Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)

Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	N	40,000	кН	
Изгибающий момент	M	421,875	кН·см	
Эксцентриситет	e <sub>N</sub>	-0,785	см	7.7.2.3
Эксцентриситет, принимаемый в расчёт	e <sub>N</sub>	0,000	см	
Площадь эффективного сечения	A <sub>ef</sub>	4,756	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения	W <sub>ef</sub>	23,526	см <sup>3</sup>	
Геометрическая длина элемента	L	1,500	м	
Расчётная длина относительно оси x - x	l <sub>efx</sub>	1,500	м	
Расчётная длина относительно оси y - y	l <sub>efy</sub>	1,500	м	
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	L <sub>сТ</sub>	1,500	м	
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	L <sub>сЛТ</sub>	1,500	м	
Приведённая гибкость относительно оси x - x	$\bar{\lambda}_x$	0,358		7.7.8.1
Приведённая гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,356		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси x - x		b		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси y - y		b		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ <sub>x</sub>	0,935		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ <sub>y</sub>	0,936		7.7.8.1
Критическая сила для крутильной формы потери устойчивости	N <sub>сТ</sub>	253,097	кН	7.7.8.4
Критическая сила для изгибно-крутильной формы потери устойчивости	N <sub>сТФ</sub>	217,635	кН	7.7.8.5
Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии	M <sub>ср</sub>	17615,758	кН·см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,212		7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b		7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	χ <sub>LT</sub>	0,979		7.7.9.2
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1		
Коэффициент взаимодействия	k	1,142		
Расчётное сопротивление стали	R <sub>y</sub>	338	Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	γ <sub>c</sub>	1		

Excel | Закрыть | Справка

Результаты			
Характеристики эффективного сечения		Характеристики эффективного сечения (изгиб)	
Результаты расчёта			
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) С
Расчёт на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{ef} R_y \gamma_c} + \frac{M_y + N e_N}{W_{y,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,779 < 1	✓ 7.7.4
Расчёт на поперечную силу	$Q / Q_w \leq 1$	0,122 < 1	✓ 7.7.6
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{M_y + e_N N}{\chi_{LT} W_{y,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,884 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)	$\frac{N}{\varphi_x A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xy} \frac{M_y + e_N N}{\chi_{LT} W_{y,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,884 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.101)	$\left(\frac{N}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{e_N N + M_y(x)}{\chi_{LT} W_{y(x),ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} \leq 1$	1,048 > 1	✗ 7.7.10.4

Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.101)				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Эксцентриситет	$e_N$	-0,785	см	7.7.2.3
Эксцентриситет, принимаемый в расчёт	$e_N$	0,000	см	
Площадь эффективного сечения	$A_{ef}$	4,756	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения	$W_{y(x),ef}$	23,526	см <sup>3</sup>	
Геометрическая длина элемента	$L$	1,500	м	
Расчётная длина относительно оси x - x	$l_{efx}$	1,500	м	
Расчётная длина относительно оси y - y	$l_{efy}$	1,500	м	
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	$L_{crT}$	1,500	м	
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	$L_{crLT}$	1,500	м	
Приведённая гибкость относительно оси x - x	$\bar{\lambda}_x$	0,358		7.7.8.1
Приведённая гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,356		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси x - x		b		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси y - y		b		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\varphi_x$	0,935		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\varphi_y$	0,936		7.7.8.1
Критическая сила при крутильной форме потери устойчивости	$N_{crT}$	253,097	кН	7.7.8.4
Критическая сила при изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{crTF}$	217,635	кН	7.7.8.5
Условная гибкость при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\bar{\lambda}_T$	0,860		7.7.8.3
Кривая потери устойчивости при крутильной/изгибно-крутильной форме		b		7.7.8.3
Коэффициент устойчивости при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\varphi_T$	0,703		7.7.8.3
Расчётный понижающий коэффициент	$\varphi$	0,703		
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	17615,758	кН·см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,212		7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b		7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,979		7.7.9.2
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	338	Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	1		

Рисунок 2.3.9 – Результаты расчёта. Результаты проверок

Элемент 7-9

Проверка	Расчётное неравенство	Значение		Пункт (формула) СП 260
Расчёт на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{ef} R_y \gamma_c} + \frac{M_y + N e_N}{W_{yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,779 < 1	✓	7.7.4
Расчёт на поперечную силу	$Q / Q_w \leq 1$	0,122 < 1	✓	7.7.6
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{M_y + e_N N}{\chi_{LT} W_{yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,884 < 1	✓	7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{zy} \frac{M_y + e_N N}{\chi_{LT} W_{yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,884 < 1	✓	7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.101)	$\left(\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{e_N N + M_y \gamma_c}{\chi_{LT} W_{yef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} \leq 1$	1,048 > 1	✗	7.7.10.4

Расчёт на прочность при сжатии с изгибом

Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	N	40,000 кН		
Изгибающий момент	M <sub>y</sub>	421,875 кН·см		
Эксцентриситет	e <sub>N</sub>	-0,785 см		7.7.2.3
Расчётный изгибающий момент		421,875 кН·см		
Площадь эффективного сечения	A <sub>ef</sub>	4,756 см <sup>2</sup>		
Расчётный момент сопротивления сечения	W <sub>yef</sub>	23,526 см <sup>3</sup>		
Расчётное сопротивление стали	R <sub>y</sub>	338 Н/мм <sup>2</sup>		
Коэффициент условий работы	γ <sub>c</sub>	1		

Расчёт на поперечную силу

Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётная поперечная сила	Q	11,250 кН		
Расчётная высота стенки	s <sub>w</sub>	118,0 мм		7.7.6

Рисунок 2.3.10,а – Результаты расчёта в Excel. *Результаты проверок (начало)*

Элементы

Расчётная толщина	$t$	2,0 мм		
Условная гибкость стенки	$\bar{\lambda}_w$	0,827		7.7.6
Расчётное сопротивление стали сдвигу	$R_s$	196 Н/мм <sup>2</sup>		7.7.6
Расчётная несущая способность сечения от действия поперечной силы	$Q_w$	92,557 кН		(7.7.9)
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)</b>				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	$N$	40,000 кН		
Изгибающий момент	$M$	421,875 кН·см		
Эксцентриситет	$e_N$	-0,785 см		7.7.2.3
Эксцентриситет, принимаемый в расчёт	$e_N$	0,000 см		
Площадь эффективного сечения	$A_{ef}$	4,756 см <sup>2</sup>		
Расчётный момент сопротивления сечения	$W_{ef}$	23,526 см <sup>3</sup>		
Геометрическая длина элемента	$L$	1,500 м		
Расчётная длина относительно оси x - x	$l_{ex}$	1,500 м		
Расчётная длина относительно оси y - y	$l_{ey}$	1,500 м		
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	$L_{crT}$	1,500 м		
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	$L_{crLT}$	1,500 м		
Приведённая гибкость относительно оси x - x	$\bar{\lambda}_x$	0,358		7.7.8.1
Приведённая гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,356		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси x - x		b		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси y - y		b		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\Phi_x$	0,935		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\Phi_y$	0,936		7.7.8.1

Рисунок 2.3.10,б – Результаты расчёта в Excel. *Результаты проверок (продолжение)*

Элементы

Критическая сила для крутильной формы потери устойчивости	$N_{кр}$	253,097 кН	7.7.8.4
Критическая сила для изгибно-крутильной формы потери устойчивости	$N_{крТ}$	217,635 кН	7.7.8.5
Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии	$M_{кр}$	17615,758 кН-см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\lambda_{LT}$	0,212	7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b	7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,979	7.7.9.2
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1	
Коэффициент взаимодействия	k	1,142	
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	338 Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	1	
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)</b>			
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм. Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	N	40,000 кН	
Изгибающий момент	M	421,875 кН-см	
Эксцентриситет	$e_N$	-0,785 см	7.7.2.3
Эксцентриситет, принимаемый в расчёт	$e_N$	0,000 см	
Площадь эффективного сечения	$A_{ef}$	4,756 см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения	$W_{ef}$	23,526 см <sup>3</sup>	
Геометрическая длина элемента	L	1,500 м	
Расчётная длина относительно оси x - x	$l_{ex}$	1,500 м	
Расчётная длина относительно оси y - y	$l_{ey}$	1,500 м	

Рисунок 2.3.10,в – Результаты расчёта в Excel. *Результаты проверок (продолжение)*

Элементы

Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	$L_{крТ}$	1,500 м	
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	$L_{крЛТ}$	1,500 м	
Приведённая гибкость относительно оси x - x	$\bar{\lambda}_x$	0,358	7.7.8.1
Приведённая гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,356	7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси x - x		b	7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси y - y		b	7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\varphi_x$	0,935	7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\varphi_y$	0,936	7.7.8.1
Критическая сила для крутильной формы потери устойчивости	$N_{крТ}$	253,097 кН	7.7.8.4
Критическая сила для изгибно-крутильной формы потери устойчивости	$N_{крТФ}$	217,635 кН	7.7.8.5
Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии	$M_{кр}$	17615,758 кН·см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{ЛТ}$	0,212	7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b	7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{ЛТ}$	0,979	7.7.9.2
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1	
Коэффициент взаимодействия	k	1,142	
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	338 Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	1	
<u>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.101)</u>			

Рисунок 2.3.10,г – Результаты расчёта в Excel. *Результаты проверок (продолжение)*



Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	N	40,000	кН	
Изгибающий момент	$M_{y(x)}$	421,875	кН·см	
Эксцентриситет	$e_N$	-0,785	см	7.7.2.3
Эксцентриситет, принимаемый в расчёт	$e_N$	0,000	см	
Площадь эффективного сечения	$A_{ef}$	4,756	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения	$W_{y(x)ef}$	23,526	см <sup>3</sup>	
Геометрическая длина элемента	L	1,500	м	
Расчётная длина относительно оси x - x	$l_{ex}$	1,500	м	
Расчётная длина относительно оси y - y	$l_{ey}$	1,500	м	
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	$L_{crT}$	1,500	м	
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	$L_{crLT}$	1,500	м	
Приведённая гибкость относительно оси x - x	$\bar{\lambda}_x$	0,358		7.7.8.1
Приведённая гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,356		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси x - x		b		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси y - y		b		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\varphi_x$	0,935		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\varphi_y$	0,936		7.7.8.1
Критическая сила при крутильной форме потери устойчивости	$N_{crT}$	253,097	кН	7.7.8.4
Критическая сила при изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{crTF}$	217,635	кН	7.7.8.5
Условная гибкость при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\bar{\lambda}_T$	0,860		7.7.8.3

Рисунок 2.3.10,д – Результаты расчёта в Excel. *Результаты проверок (продолжение)*

Кривая потери устойчивости при крутильной/изгибно-крутильной форме		b	7.7.8.3
Коэффициент устойчивости при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\varphi_T$	0,703	7.7.8.3
Расчётный понижающий коэффициент	$\varphi$	0,703	
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	17615,758 кН·см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,212	7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b	7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,979	7.7.9.2
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	338 Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	1	

Рисунок 2.3.10,е – Результаты расчёта в Excel. *Результаты проверок (окончание)*

### 2.3.2. Сжатый с изгибом элемент из спаренных С-образных профилей по СП 260.1325800.2016

**Задание:** Выполнить проверку устойчивости сжато-изгибаемого элемента из спаренных С-образных профилей. Исходные данные взяты из Примера L документа Worked Examples According to EN 1993-1-3 Eurocode 3, Part 1.3 / ECCS TC 7, № 123 [10]. Элемент моделирует колонну фахверка. С-профили соединены дискретно парми болтов, расположенных в третях высоты профиля. Диаметр отверстий  $d = 18$  мм. Согласно [10], колонна представляет собой шарнирно опёртый стержень, нагруженный осевой сжимающей силой и тремя поперечными силами от давления ветра, приложенными в местах крепления стеновых прогонов к норужным поясам спаренных С-профилей элемента (Рисунок 2.3.11 [10]).

Расчёты производятся для двух вариантов нагружения: активное и пассивное давление ветра. В [10] абсолютные значения сил  $F$  для активного и пассивного давления приняты одинаковыми.

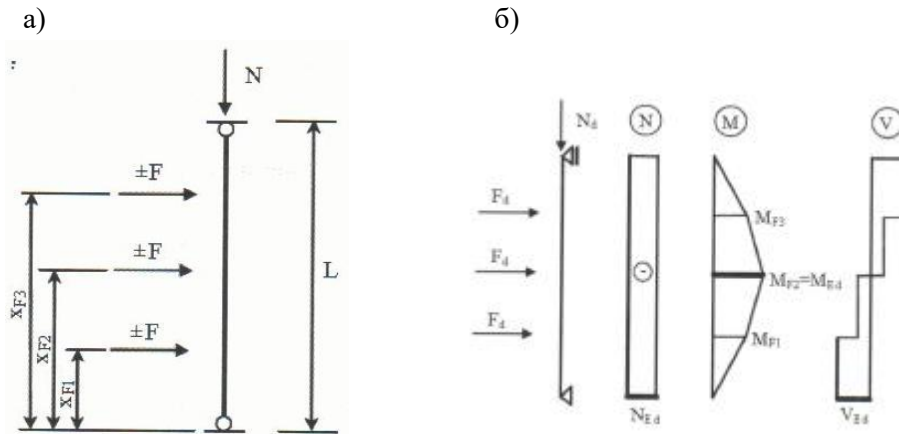


Рисунок 2.3.11 – Данные для расчёта [10]: а) - расчётная схема;  
б) – внутренние усилия

Высота  $L = 8$  м, расстояние  $x_{F1} = 2$  м,  $x_{F2} = 4$  м,  $x_{F3} = 6$  м, шаг стеновых прогонов  $g = 2$  м, расстояние между раскреплениями поясов  $f = 4$  м.  $N = 40$  кН,  $F = 8$  кН, Максимальный изгибающий момент  $M = 32$  кНм. Максимальная поперечная сила  $Q = 12$  кН.

Таблица 2.3.2 – Расчётные длины и коэффициенты [10]

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Расчётная длина относительно оси x - x	$l_{efx}$	м	8
Расчётная длина относительно оси y - y	$l_{efy}$	м	2
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	$l_T$	м	4
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба (наружные пояса сжаты при изгибе)	$l_{LT}$	м	2
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба (внутренние пояса сжаты при изгибе)	$l_{LT}$	м	4
Коэффициент эффективной длины, зависящий от условий закрепления торцевых сечений от поворота относительно более слабой оси y - y	$k$		1
Коэффициент эффективной длины, зависящий от условий закрепления торцевых сечений от деформации	$k_w$		1
Коэффициент (наружные пояса сжаты при изгибе)	$C_1$		1,141
Коэффициент (внутренние пояса сжаты при изгибе)	$C_1$		1,879
Коэффициент	$C_2$		0

Размеры сечения (Рисунок 2.3.12):  $h = 250$  мм,  $t = 2,5$  мм,  $b_f(b) = 80$  мм,  $c = 40$  мм,  $r = 5$  мм,  $S = 0$ ,  $\alpha = 90^\circ$ .

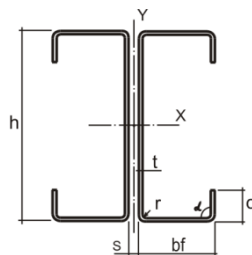


Рисунок 2.3.12 – Размеры сечения

Номинальное значение предела текучести  $R_{yn} = 350 \text{ Н/мм}^2$ . Коэффициент надёжности по материалу в соответствии с п.6.3 [1]  $\gamma_m = 1,05$ .  $R_y = 333,3 \text{ Н/мм}^2$ .  $t_{m,p} = 0$ . Модуль упругости  $E = 206000 \text{ Н/мм}^2$ . В [10]  $E = 210000 \text{ Н/мм}^2$ , частный коэффициент  $\gamma_{M0} = 1,0$ . Коэффициент условий работы примем равными  $1,0$  (с целью сопоставления результатов с ЕС3).

Решение: Соотношение размеров (п.7.1.1 [1]):

$$b/t = 80/2,5 = 32 \leq 100 \quad c/t = 40/2,5 = 16 \leq 40$$

$$h/t = 250/2,5 = 100 \leq 300.$$

П. 7.1.2 [1]:  $0,2 \leq c/b \leq 0,5 \quad c/b = 40/80 = 0,5$

Срединная линия радиуса закругления

$$r_m = r + t/2 = 0,5 + 0,125 = 0,625 \text{ см}$$

Параметр  $g_r$  (Рисунок 7.3 [1])

$$g_r = r_m \left( tg \left( \frac{\varphi}{2} \right) - \sin \left( \frac{\varphi}{2} \right) \right) = 0,625 \cdot (1 - 0,707) = 0,183 \text{ см}$$

Длина дуги закругления

$$u = \pi/2 \cdot r_m = 0,981 \text{ см}$$

Расстояние от центра дуги до центра тяжести дуги

$$v = 0,637 r_m = 0,398 \text{ см}$$

$$w = 0,363 r_m = 0,227 \text{ см}$$

$$v + w = r_m$$

Теоретические ширины

$$h_p = h - 2(g_r + t/2) = 25 - 2(0,183 + 0,125) = 24,384 \text{ см}$$

$$b_p = b - 2(g_r + t/2) = 8 - 2(0,183 + 0,125) = 7,384 \text{ см}$$

$$c_p = c - (g_r + t/2) = 4 - (0,183 + 0,125) = 3,692 \text{ см}$$

Размеры по срединным линиям сечения

$$h_c = h - t = 24,75 \text{ см}$$

$$b_c = b - t = 7,75 \text{ см}$$

$$c_c = c - t/2 = 3,875 \text{ см}$$

Площадь дуги закругления

$$A_{RC} = u \cdot t = 0,2453 \text{ см}^2$$

Момент инерции дуги закругления

$$I_{RC} = \frac{\pi}{4} r_m t \left( r_m^2 + \frac{t^2}{4} \right) - A_{RC} v^2 = 0,010921 \text{ см}^4$$

Геометрические характеристики полного сечения по [10] и вычисленные в CFSteel приведены в Таблице 2.3.3. В обоих случаях геометрические характеристики вычисляются с учётом закругления в местахгиба, за исключением секториального момента инерции.

Таблица 2.3.3 - Геометрические характеристики полного сечения

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Значение [10]	Значение CFSteel	Расхождение, %
Площадь сечения	$A_g$	см <sup>2</sup>	23,463	23,463	0
Момент инерции относительно оси x - x	$I_x$	см <sup>4</sup>	2161,9	2162,1	0
Момент инерции относительно оси y - y	$I_y$	см <sup>4</sup>	386,3	386,3	0
Радиус инерции	$i_x$	см	9,599	9,599	0
	$i_y$	см	4,058	4,058	0
Момент сопротивления сечения	$W_x$	см <sup>3</sup>	-	172,965	-
Момент инерции при кручении	$I_t$	см <sup>4</sup>	0,4872	0,4872	0
Секториальный момент инерции (без учёта радиусов в местахгиба)	$I_w$	см <sup>6</sup>	74458	74458	0

Эффективное сечение (равномерное сжатие)

*Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel*

Таблица 2.3.4 – Параметры стенки

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) СП 260	Значение	Значение CFSteel	Расхождение, %
Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_p$		(7.18)	2,064	2,063	0
Коэффициент редуцирования	$\rho$		(7.13)	0,433	0,433	0
Эффективная часть	$h_{ef}$	мм	Таблица 7.2	105,55	105,57	0
	$h_{e1}$	мм		52,77	52,79	0,04
	$h_{e2}$	мм		52,77	52,79	0,04

В Таблице 2.3.5 приведено сравнение значений параметров эффективности стенки, полученных по СП 260, с соответствующими значениями Примера L [10], полученными по ЕС3. В Примере L в соответствии с нормами ЕС3 принималось:  $E=210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_y = 350 \text{ N/mm}^2$ , частный коэффициент  $\gamma_{M0}=1,0$ . Результаты сравнения приведены в столбце 6 Таблицы 2.3.5. Расхождение составляет 1,4...1,8%. Также были выполнены расчёты по методике СП 260, но исходные данные принимались как в Примере L [10]:  $E=210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{yn} = f_y = 350 \text{ N/mm}^2$ ,  $\gamma_m = \gamma_{M0}=1,0$ . Расчёт выполнен в программе CFSteel. Сравнение результатов, полученных таким образом, с данными Примера L [10] приведено в столбцах 7 и 8. Отмечается практическое совпадение результатов. Это говорит о том, что методика определения эффективных ширин пластинки, заложенная в СП 260 в целом совпадает с методикой ЕС3. Различие заключается в разных значениях модуля упругости  $E$  и коэффициентов: частного коэффициента  $\gamma_{M0}$  и коэффициента надёжности по материалу  $\gamma_m$ .

Таблица 2.3.5 – Параметры стенки. Сравнение результатов по СП 260 и ЕС3

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Значение по [10] (ЕС3)	Значение по СП 260 (CFSteel)	Расхождение, %	Значение по СП 260* (CFSteel)	Расхождение*, %
1	2	3	4	5	6	7	8
Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_p$		2,10	2,063	1,8	2,094	0,3
Коэффициент редуцирования	$\rho$		0,427	0,433	1,4	0,427	0
Эффективная часть	$h_{ef}$	мм	104,14	105,57	1,4	104,203	0,06
	$h_{e1}$	мм	52,07	52,79	1,4	52,10	0,06
	$h_{e2}$	мм	52,07	52,79	1,4	52,10	0,06

\* - Результаты получены по СП 260 но с  $E=210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{yn} = 350 \text{ N/mm}^2$ ,  $\gamma_m = \gamma_{M0} = 1,0$

*Эффективные размеры сжатого пояса с отгибом (одинарное сечение)*

Таблица 2.3.6 – Параметры пояса и отгиба ( $K = \infty$ ,  $\sigma_{com} = R_y$ )

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) СП 260	Значение	Значение CFSteel	Расхождение, %
<b>Пояс</b>						
Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_p$		(7.18)	0,624	0,625	0,2
Коэффициент редуцирования	$\rho$		(7.13)	1	1	0
Эффективная ширина	$b_{ef}$	мм	Табл. 7.2	73,84	73,84	0
	$b_{e1}$	мм		36,92	36,92	0
	$b_{e2}$	мм		36,92	36,92	0
<b>Отгиб</b>						
Коэффициент потери устойчивости	$k\sigma$		7.3.2.6	0,737	0,734	0,4

Элементы

Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_p$		(7.18)	0,728	0,729	0,1
Коэффициент редуцирования	$\rho$		(7.15)	1	1	0
Эффективная ширина	$c_{ef}$	мм	Табл. 7.2	36,92	36,92	0

В таблице 2.3.7 приведено сравнение значений параметров эффективности пояса и отгиба, полученных по СП 260, с соответствующими значениями Примера L [10], полученными по ЕС3. В Примере L в соответствии с нормам ЕС3 принималось:  $E=210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_y = 350 \text{ N/mm}^2$ , частный коэффициент  $\gamma_{M0} = 1,0$ . Результаты сравнения приведены в столбце 6. Расхождение составляет до 0,8%. В столбцах 7 и 8 приведены результаты вычислений по методике СП 260, но исходные данные принимались как в Примере L [10], т.е.:  $E=210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{yn} = f_y = 350 \text{ N/mm}^2$ ,  $\gamma_m = \gamma_{M0} = 1,0$ . Расчёт выполнен в CFSteel. Отмечается совпадение результатов.

Таблица 2.3.7 – Параметры пояса и отгиба . Сравнение результатов по СП 260 и ЕС3

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Значение по [10] (ЕС3)	Значение по СП 260 (CFSteel)	Расхождение, %	Значение по СП 260* (CFSteel)	Расхождение*, %
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Пояс</b>							
Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_p$		0,63	0,625	0,8	0,634	0,6
Коэффициент редуцирования	$\rho$		1	1	0	1	0
Эффективная ширина	$b_{ef}$	мм	73,84	73,84	0	73,84	0
	$b_{e1}$	мм	36,92	36,92	0	36,92	0
	$b_{e2}$	мм	36,92	36,92	0	36,92	0
<b>Отгиб</b>							
Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_p$		0,74	0,734	0,8	0,74	0
Коэффициент редуцирования	$\rho$		1	1	0	1	0
Эффективная ширина	$c_{ef}$	мм	36,92	36,92	0	36,92	0

\* - Результаты получены по СП 260 но с  $E=210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{yn} = 350 \text{ N/mm}^2$ ,  $\gamma_m = \gamma_{M0} = 1,0$

*Шаг 2: Снижение несущей способности краевого элемента жёсткости за счёт потери устойчивости формы сечения (плоская форма потери устойчивости элемента жёсткости)*

**Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel**

Таблица 2.3.8 – Эффективные характеристики краевого элемента жёсткости

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) СП 260	Значение	Значение CFSteel	Расхождение, %
<b>Эффективные характеристики краевого элемента жёсткости</b>						
Площадь	$A_S$	см <sup>2</sup>		1,8703	1,8704	0
Расстояние между срединной линией пояса и осью элемента жёсткости	$e_S$	мм		10,07	10,07	0
Расстояние между срединной линией стенки и осью элемента жёсткости	$b_I$	мм		67,43	67,43	0
Эффективный момент инерции	$I_S$	см <sup>4</sup>		2,9581	2,9571	0,03
<b>Жёсткость связи</b>						

*Элементы*

Жёсткость связи	$K$	кН/см <sup>2</sup>	(7.29)	0,0443	0,443	0
Критическое напряжение потери устойчивости краевого отгиба	$\sigma_{cr,s}$	кН/см <sup>2</sup>	(7.28)	55,56	55,57	0,02
Гибкость	$\bar{\lambda}_d$		7.3.2.9	0,774	0,775	0,1
Коэффициент снижения несущей способности ребра	$\chi_d$		7.3.2.9	0,910	0,910	0

*Шаг 3: Уточнение коэффициента снижения несущей способности итерационным расчётом (Приложение Б [1])*

Поскольку результаты, полученные с помощью программы на предыдущем шаге, практически совпадают с результатами ручного расчёта, приводим итерационное уточнение, выполненное по программе (Таблица 2.3.9). Условие окончания итерационного процесса, заложенное в программе: итерации заканчиваются при разнице в значениях  $\chi_{d,i}$  и  $\chi_{d,i-1}$ , не превышающей 0,1%.

Таблица 2.3.9 – Итерационный процесс уточнения эффективных параметров элемента жёсткости

Параметр			Ед. изм.	Начальный расчёт	Первая итерация
Элемент	Коэффициент снижения несущей способности	$\chi_{d,n-1}$		1,0	0,910
Пояс $\psi=1$ $k_\sigma=4$	Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_{pi}$		0,625	0,596
	Коэффициент редуцирования	$\rho$		1,0	1,0
	Эффективная ширина	$b_{e2}$	мм	36,92	36,92
Отгиб $\psi=1$ $k_\sigma=0,734$	Гибкость пластинки	$\bar{\lambda}_{pi}$		0,729	0,696
	Коэффициент редуцирования	$\rho$		1,0	1,0
	Эффективная ширина	$c_{ef}$	мм	36,92	36,92
Элемент жёсткости	Эффективная площадь	$A_s$	см <sup>2</sup>	1,8704	1,8704
	Расстояние	$b_I$	см	6,743	6,743
	Момент инерции	$I_s$	см <sup>4</sup>	2,9571	2,9571
	Жёсткость связи	$K_I$	кН/см <sup>2</sup>	0,0443	0,0443
	Критическое напряжение потери устойчивости краевого отгиба	$\sigma_{cr,s}$	кН/см <sup>2</sup>	55,57	55,57
	Коэффициент снижения	$\chi_{d,n}$		0,910	0,910
	Редуцированная площадь	$A_{s,red}$	см <sup>2</sup>	1,702	1,702

$$t_{red} = t \cdot A_{s,red} / A_s = 2,5 \cdot 1,702 / 1,8704 = 2,27 \text{ мм}$$

Как видно из Таблицы, дальнейшего уточнения размеров элемента жёсткости не потребовалось. Поэтому, для дальнейших расчётов принимаем размеры элемента жёсткости, в том числе  $A_{s,red}$  и  $t_{red}$ , полученные на *Шаге 2*.

*Геометрические характеристики эффективного сечения*

***Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel***

Геометрические характеристики эффективного сечения при равномерном сжатии в сравнении полученными в CFSteel, приведены в Таблице 2.3.11.

## Элементы

*Эффективное сечение (изгиб относительно оси  $x-x$ )*

*Эффективные размеры сжатого пояса с отгибом (одинарное сечение)*

*Шаг 1: Эффективные размеры в предположении, что жёсткость, накладываемая отгибом на пояс  $K = \infty$  и напряжение  $\sigma_{com} = R_y$*

***Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel***

*Шаг 2: Снижение несущей способности краевого элемента жёсткости за счёт потери устойчивости формы сечения (плоская форма потери устойчивости элемента жёсткости)*

***Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel***

Таблица 2.3.10 – Эффективные характеристики краевого элемента жёсткости

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) СП 260	Значение	Значение CFSteel	Расхождение, %
<b>Эффективные характеристики краевого элемента жёсткости</b>						
Площадь	$A_S$	см <sup>2</sup>		1,8703	1,8704	0
Расстояние между срединной линией пояса и осью элемента жёсткости	$e_S$	мм		10,07	10,07	0
Расстояние между срединной линией стенки и осью элемента жёсткости	$b_I$	мм		67,43	67,43	0
Эффективный момент инерции	$I_S$	см <sup>4</sup>		2,9581	2,9590	0,03
<b>Жёсткость связи</b>						
Жёсткость связи	$K$	кН/см <sup>2</sup>	(7.29)	0,0618	0,0618	0
Критическое напряжение потери устойчивости краевого отгиба	$\sigma_{cr,s}$	кН/см <sup>2</sup>	(7.28)	65,60	65,6	0
Гибкость	$\bar{\lambda}_d$		7.3.2.9	0,712	0,713	0,1
Коэффициент снижения несущей способности ребра	$\chi_d$		7.3.2.9	0,955	0,955	0

*Эффективные размеры стенки (одинарный профиль)*

***Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel***

*Геометрические характеристики эффективного сечения*

***Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel***

Таблица 2.3.11 – Геометрические характеристики эффективного сечения

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Значение	Значение CFSteel	Расхождение, %



## Элементы

Эффективное сечение (сжатие)					
Площадь сечения	$A_{ef}$	см <sup>2</sup>	15,889	15,877	0,08
Момент инерции относительно оси x - x	$I_{xef}$	см <sup>4</sup>	1965,67	1963,88	0,09
Момент инерции относительно оси y - y	$I_{yef}$	см <sup>4</sup>	352,46	353,37	0,3
Радиус инерции	$i_{xef}$	см	11,123	11,122	0
	$i_{yef}$	см	4,710	4,718	0,2
Эффективное сечение (изгиб относительно оси x - x)					
Площадь сечения	$A_{ef}$	см <sup>2</sup>	23,294	23,294	0
Положение центра тяжести эффективного сечения по оси y - y относительно срединной оси нижнего пояса	$y_{cgef}$	см	12,292	12,292	0
Момент инерции относительно оси x - x	$I_{xef}$	см <sup>4</sup>	2139,99	2139,73	0,01
Радиус инерции относительно оси x - x	$i_{xef}$	см	9,585	9,584	0
Момент сопротивления сечения	$W_{xef}$	см <sup>3</sup>	170,070	170,052	0,01

*Прочность элемента при действии поперечной силы (п.7.7.6 [1])*

**Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel**

*Прочность элемента при сжатии с изгибом с учётом отверстий при  $Q < 0,5Q_w$  (п.7.7.4, 7.7.5 [1])*

**Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel**

*Устойчивость элемента при сжатии с изгибом*

В соответствии с п.7.7.10.4 [1]

$$\left( \frac{N}{\varphi_x A_{ef} R_y} \right)^{0,8} + \left( \frac{M}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y} \right)^{0,8} \leq 1$$

**Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel**

*Далее приведены результаты расчётов для варианта со сжатыми от изгиба наружными поясами элемента.*

**Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel**

Условие устойчивости (п.7.7.10.4 [1])

$$\left( \frac{40}{0,755 \cdot 15,889 \cdot 33,33} \right)^{0,8} + \left( \frac{3200}{0,912 \cdot 170,07 \cdot 33,33} \right)^{0,8} = 0,840 < 1.$$

*Расчёт по п. 7.7.10.3[1]*

Для сжатых с изгибом элементов должны выполняться условия:

$$\frac{N}{\varphi_x A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1,$$

$$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$$

Расчёт коэффициентов взаимодействия  $k_{xx}$  и  $k_{yx}$  по Таблицам В.1 и В.2 [1] (Метод 1):

**Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel**

Формулы взаимодействия (п. 7.7.10.3[1])

$$\frac{40}{0,755 \cdot 15,889 \cdot 33,33} + 1,042 \frac{3200}{0,912 \cdot 170,07 \cdot 33,33} = 0,745 < 1,$$

$$\frac{40}{0,877 \cdot 15,889 \cdot 33,33} + 1,055 \frac{3200}{0,912 \cdot 170,07 \cdot 33,33} = 0,739 < 1.$$

Расчёт коэффициентов взаимодействия  $k_{xx}$  и  $k_{yx}$  по Таблицам В.4 и В.5 [1] (Метод 2):

**Полный ручной расчёт приведён в версии Верификационных расчётов, передаваемой лицензированным пользователям при поставке ПО CFSteel**

Формулы взаимодействия (п. 7.7.10.3[1])

$$\frac{40}{0,755 \cdot 15,889 \cdot 33,33} + 0,947 \frac{3200}{0,912 \cdot 170,07 \cdot 33,33} = 0,686 < 1,$$

$$\frac{40}{0,904 \cdot 15,889 \cdot 33,33} + 0,997 \frac{3200}{0,912 \cdot 170,07 \cdot 33,33} = 0,703 < 1.$$

Полученные результаты расчёта сведены в Таблицу 2.3.12. Также в таблице содержатся соответствующие результаты, полученные в CFSteel .

Таблица 2.3.12 – Сопоставление результатов расчётов

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) СП 260	Ручной расчёт	CFSteel	Расхождение, %
Условная гибкость стенки	$\bar{\lambda}_w$	-	(7.80)	1,370	1,378	0,5
Расчётное напряжение при сдвиге	$R_s$	кН/см <sup>2</sup>	Табл. 7.4	11,68	11,61	0,6
Несущая способность поперечного сечения при действии поперечной силы	$Q_w$	кН	(7.79)	144,54	143,70	0,6
Отношение $Q/Q_w$	-	-	-	0,083	0,084	1,2
Левая часть проверки на прочность	-	-	7.7.4	0,641	0,640	0,2
Приведённая гибкость относительно оси $x-x$	$\bar{\lambda}_x$	-	7.7.8.1	0,878	0,878	0
Приведённая гибкость относительно оси $y-y$	$\bar{\lambda}_y$	-	7.7.8.1	0,519	0,519	0
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии по изгибной форме	$\varphi_x$	-	СП 16	0,755	0,755	0
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии по изгибной форме	$\varphi_y$	-	СП 16	0,877	0,877	0
Критическая сила потери устойчивости по изгибной форме относительно оси $x-x$	$N_{cr,x}$	кН	-	686,8	686,8	0
Критическая сила потери устойчивости по изгибной форме относительно оси $y-y$	$N_{cr,y}$	кН	-	1964	1963,7	0

Элементы

Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	кН	(7.90)	906,7	906,7	0
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,TF}$	кН	7.7.8.3	906,7	906,7	0
Условная гибкость при крутильной (изгибно-крутильной) форме потери устойчивости	$\overline{\lambda}_T$		(7.89)	0,764	0,764	0
Коэффициент устойчивости по крутильной (изгибно-крутильной) форме	$\varphi_T$		7.7.8.3	0,760	0,760	0
Минимальный коэффициент	$\varphi_{min}$			0,755	0,755	0
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	кНсм	Приложение Г	31230	31236	0
Условная гибкость	$\overline{\lambda}_{LT}$	-	(7.96)	0,426	0,426	0
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	-	(7.94)	0,916	0,916	0
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	-	СП 16	0,912	0,912	0
Левая часть проверки устойчивости элемента	-	-	(7.101)	0,840	0,840	0
Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии при постоянном значении изгибающего момента по длине элемента	$M_{cr0}$	кНсм	Приложение Г	27371	27399	0,1
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба при постоянном моменте по длине элемента	$\overline{\lambda}_0$	-	Приложение В	0,455	0,455	0
Предельное значение условной гибкости при потере устойчивости плоской формы изгиба при постоянном моменте по длине элемента	$\overline{\lambda}_{0\ lim}$	-		0,211	0,211	0
Коэффициент перехода к эквивалентной прямоугольной эпюре моментов	$C_{m,x0}$		Таблица В.2	0,956	0,956	0
Параметр	$a_{LT}$	-		0,999	0,999	0
Коэффициент	$C_{m,x}$	-		0,988	0,988	0
Коэффициент	$C_{m,LT}$	-		1,008	1,009	0,1
Параметр	$\mu_x$	-	Таблица В.1	0,985	0,985	0
Параметр	$\mu_y$	-	Таблица В.1	0,997	0,997	0
<i>Метод 1</i> Табл. В.1 и В.2 [1]						
Коэффициент взаимодействия $k_{xx}$	$k_{xx}$	-	Таблица В.1	1,042	1,043	0,1
Коэффициент взаимодействия $k_{yx}$	$k_{yx}$	-	Таблица В.1	1,055	1,056	0,1
Левая часть неравенства (7.99)			п.7.7.10.3	0,745	0,746	0,1
Левая часть неравенства (7.100)			п.7.7.10.3	0,739	0,740	0,1
<i>Метод 2</i> Табл. В.4 и В.5 [1]						
Коэффициент взаимодействия $k_{xx}$	$k_{xx}$	-	Таблица В.4	0,947	0,947	0
Коэффициент взаимодействия $k_{yx}$	$k_{yx}$	-	Таблица В.4	0,997	0,997	0
Левая часть неравенства (7.99)			п.7.7.10.3	0,686	0,686	0
Левая часть неравенства (7.100)			п.7.7.10.3	0,703	0,703	0

Результаты расчёта в программе CFSteel представлены на Рисунках 2.3.13 – 2.3.29.

Сжатие с изгибом [СП260]

Наименование элемента: Колонна фахверка

Длина элемента L: 8 м

Расчётное осевое усилие сжатия N: 40 кН К-т условий работы (уст-ть)  $\gamma_c$ : 1

Расчётный момент (устойчивость) M: 3200 кН·см К-т условий работы (прочность)  $\gamma_c$ : 1

Расчётный момент (прочность) M: 3200 кН·см Q: 12 кН  Проверка прочности

Ввод расчётной длины:  Ввод к-тов приведения длины:

Расчётная длина относительно оси x - x  $l_{efx}$ : 8 м К-т приведения длины  $\mu_x$ : 1

Расчётная длина относительно оси y - y  $l_{efy}$ : 2 м К-т приведения длины  $\mu_y$ : 1

Расчётная длина: крутильная форма  $L_{crT}$ : 4 м  Устойчивость плоской формы изгиба

Расчётная длина: плоская форма изгиба  $L_{crL}$ : 2 м  $M_{cr}$ : 0 кН·см

Потеря устойчивости плоской формы изгиба

Граничные условия

Коэффициент закрепления концов от поворота вокруг оси элемента  $k_T$ : 1

Коэффициент стеснения деформации концов элемента  $k_W$ : 1


Коэффициент  $C_1$ : 1,14

Коэффициент  $C_2$ : 0

Отдельная ветвь элемента

Шаг объединения ветвей  $l_1$ : 0,5 м

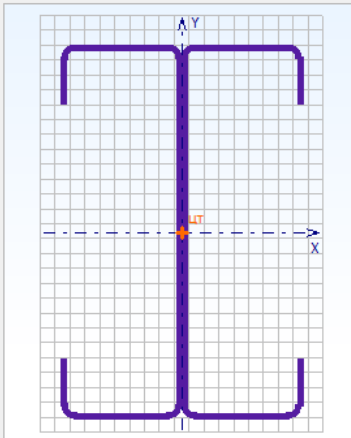
Уровень приложения нагрузки...

Эпюра моментов ... 

Ослабление

Выбрать ... d: 18 мм  $a_1$ : 83,3 мм  $a_2$ : 83,3 мм

Сечение



Выбрать... C 250x80x40x2,5 ECCS L

Сталь

Группа стандартов: EN

Стандарт: EN 10147

Сталь: S350GD

$R_{yk}$ : 350 Н/мм<sup>2</sup>  $R_{yk}$ : 420 Н/мм<sup>2</sup>

Комментарии

Вычислить Закрыть Справка

Рисунок 2.3.13 – Ввод исходных данных  
(вычисление коэффициентов взаимодействия  $k_{ij}$  по Методу 1)


Результаты

Общие данные | Характеристики полного сечения | Характеристики эффективного сечения | Характеристики эффективного сечения (изгиб)


### Колонна фахверка

Длина элемента	L	8,000 м
Расчётное осевое усилие сжатия	N	40,00 кН
Расчётный изгибающий момент (расчёт на устойчивость)	M	3200,00 кН·см
Расчётный изгибающий момент (расчёт на прочность)	M	3200,00 кН·см
Расчётная длина относительно оси x - x	$l_{efx}$	8,000 м
Расчётная длина относительно оси y - y	$l_{efy}$	2,000 м
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	$L_{crT}$	4,000 м
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	$L_{cr,LT}$	2,000 м
Коэффициент закрепления концов от поворота вокруг оси элемента	k	1
Коэффициент стеснения деформации концов элемента	$k_w$	1
Коэффициент	$C_1$	1,140
Коэффициент	$C_2$	0,000

Уровень приложения поперечной нагрузки



Вид эпюры моментов



Шаг объединения ветвей

$l_1$	0,500 м
-------	---------

Коэффициент условий работы (расчёт на устойчивость)

$\gamma_c$	1
------------	---

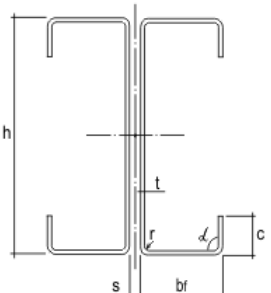
Коэффициент условий работы (расчёт на прочность)

$\gamma_c$	1
------------	---

### Сечение

C 250x80x40x2,5  
ECCS L

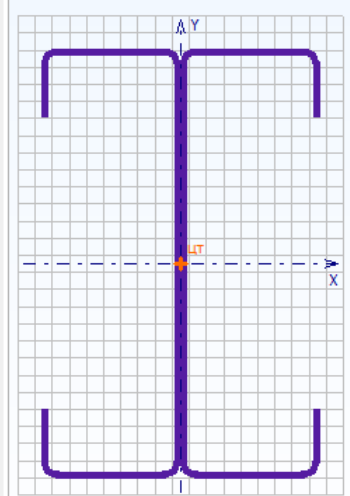
h	250,0 мм
t	2,5 мм
b	80,0 мм
c	40,0 мм
r	5,0 мм



$t_{coat}$	0,00 мм
S	0,0 мм

### Ослабление сечения отверстиями

Стенка		
Диаметр отверстия	d	18,0 мм



Excel | Закрыть | Справка

Рисунок 2.3.14 – Результаты расчёта. Общие данные

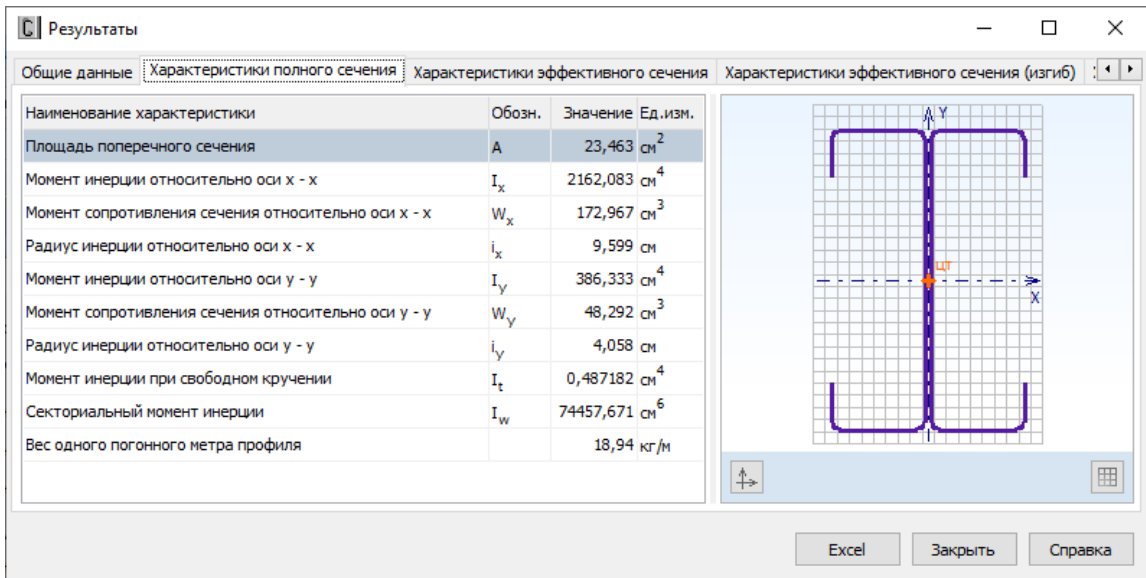


Рисунок 2.3.15 – Результаты расчёта. Характеристики полного сечения

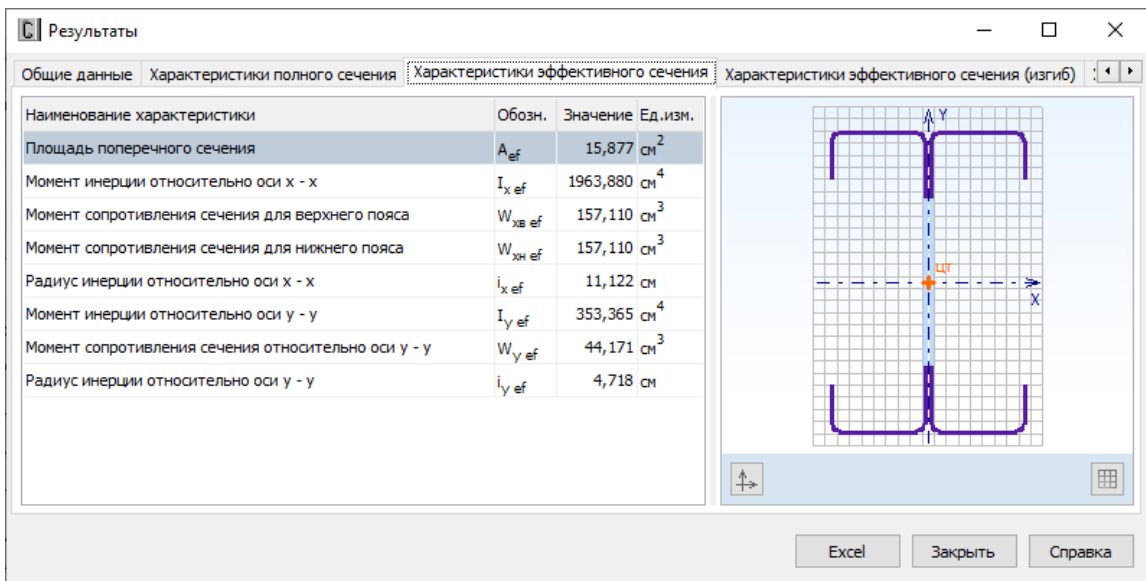


Рисунок 2.3.16 – Результаты расчёта. Характеристики эффективного сечения (сжатие)

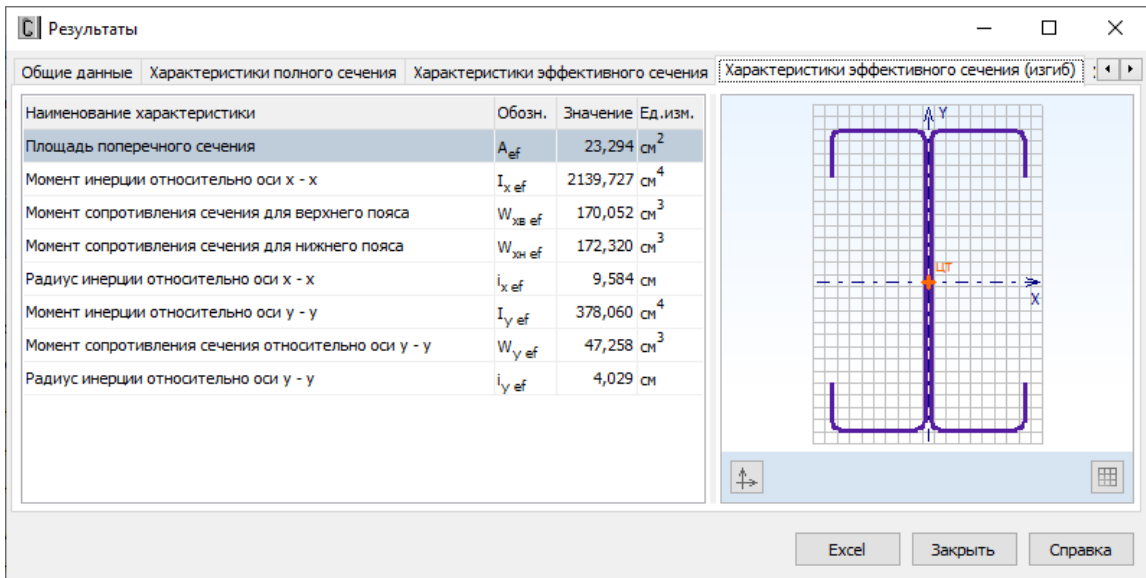


Рисунок 2.3.17 – Результаты расчёта. Характеристики эффективного сечения (изгиб)

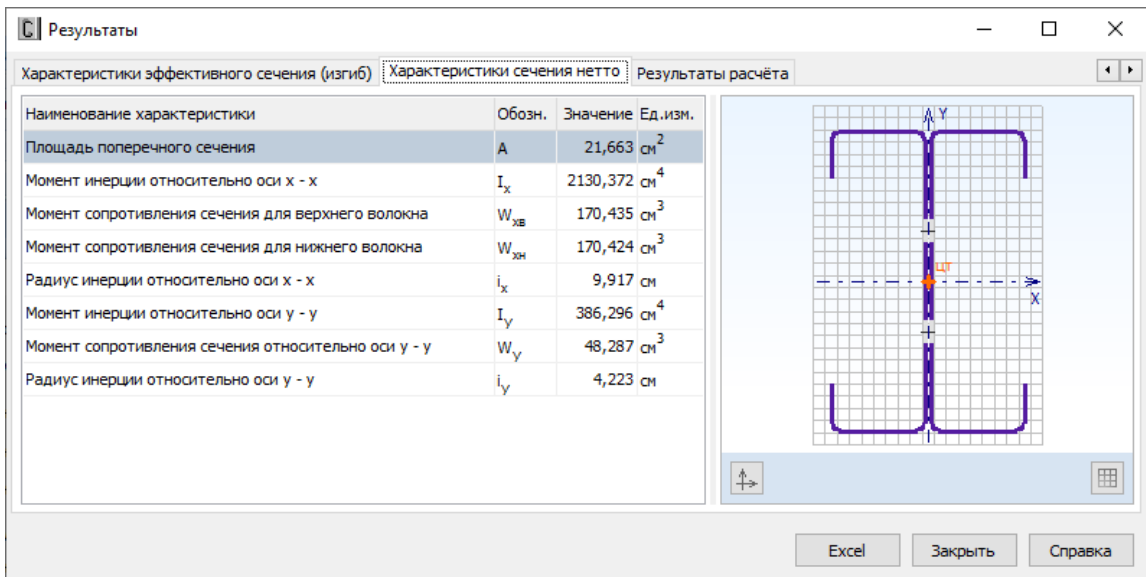


Рисунок 2.3.18 – Результаты расчёта. Характеристики сечения нетто

Результаты			
Характеристики эффективного сечения (изгиб)   Характеристики сечения нетто   Результаты расчёта			
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (с)
Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{эф} R_y \gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,640 < 1	✓ 7.7.4
Расчёт на поперечную силу	$Q / Q_w \leq 1$	0,084 < 1	✓ 7.7.6
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_i}{A_i R_y \gamma_c} + \frac{M_{i20}}{W_{i20ef} R_y \gamma_c} + \frac{e_i \cdot N_i}{W_{i30ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,737 < 1	✓
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)	$\frac{N}{\varphi_x A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{xxt} \frac{M_x}{\chi_{1t} W_{xэф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,746 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{yxt} \frac{M_x}{\chi_{1t} W_{xэф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,740 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.101)	$\left( \frac{N}{\varphi A_{эф} R_y \gamma_c} \right)^{0.8} + \left( \frac{e_N N + M_y(x)}{\chi_{1t} W_{y(2)эф} R_y \gamma_c} \right)^{0.8} \leq 1$	0,840 < 1	✓ 7.7.10.4

Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	N	40,000	кН	
Расчётный изгибающий момент	M <sub>x</sub>	3200,000	кН·см	
Площадь эффективного сечения	A <sub>эф</sub>	15,877	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения	W <sub>x</sub>	170,052	см <sup>3</sup>	
Расчётное сопротивление стали	R <sub>y</sub>	333	Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	γ <sub>c</sub>	1		

Результаты			
Характеристики эффективного сечения (изгиб)   Характеристики сечения нетто   Результаты расчёта			
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (с)
Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{эф} R_y \gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,640 < 1	✓ 7.7.4
Расчёт на поперечную силу	$Q / Q_w \leq 1$	0,084 < 1	✓ 7.7.6
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_i}{A_i R_y \gamma_c} + \frac{M_{i20}}{W_{i20ef} R_y \gamma_c} + \frac{e_i \cdot N_i}{W_{i30ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,737 < 1	✓
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)	$\frac{N}{\varphi_x A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{xxt} \frac{M_x}{\chi_{1t} W_{xэф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,746 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{yxt} \frac{M_x}{\chi_{1t} W_{xэф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,740 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.101)	$\left( \frac{N}{\varphi A_{эф} R_y \gamma_c} \right)^{0.8} + \left( \frac{e_N N + M_y(x)}{\chi_{1t} W_{y(2)эф} R_y \gamma_c} \right)^{0.8} \leq 1$	0,840 < 1	✓ 7.7.10.4

Расчёт на поперечную силу				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётная поперечная сила	Q	12,000	кН	
Расчётная высота стенки	s <sub>w</sub>	247,5	мм	7.7.6
Расчётная толщина	t	2,5	мм	
Условная гибкость стенки	λ <sub>w</sub>	1,378		7.7.6
Расчётное сопротивление стали сдвигу	R <sub>s</sub>	116	Н/мм <sup>2</sup>	7.7.6
Расчётная несущая способность сечения от действия поперечной силы	Q <sub>w</sub>	143,697	кН	(7.7.9)



Результаты			
Характеристики эффективного сечения (изгиб)   Характеристики сечения нетто   Результаты расчёта			
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (с
Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{эф} R_y \gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,640 < 1	✓ 7.7.4
Расчёт на поперечную силу	$Q / Q_w \leq 1$	0,084 < 1	✓ 7.7.6
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_i}{A_i R_y \gamma_c} + \frac{M_{1x0}}{W_{1x0ef} R_y \gamma_c} + \frac{e_i \cdot N_i}{W_{1y0ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,737 < 1	✓
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)	$\frac{N}{\phi_x A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x}{\chi_{1x} W_{xэф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,746 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)	$\frac{N}{\phi_y A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{M_x}{\chi_{1y} W_{xэф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,740 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.101)	$\left( \frac{N}{\phi A_{эф} R_y \gamma_c} \right)^{0.8} + \left( \frac{e_N N + M_y(x)}{\chi_{1y} W_{y(эф)} R_y \gamma_c} \right)^{0.8} \leq 1$	0,840 < 1	✓ 7.7.10.4

Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_1$	22,000	кН	
Изгибающий момент в ветви относительно её оси	$M_{1x0}$	1760,000	кН·см	
Расстояние от центра тяжести сечения из спаренных профилей до центра тяжести эффективн	$e_1$	0,895	см	
Расчётная площадь сечения ветви	$A_1$	7,938	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения ветви	$W_{1x0ef}$	85,022	см <sup>3</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения ветви	$W_{1y0ef}$	17,768	см <sup>3</sup>	
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	333	Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	1		

Excel    Закрыть    Справка

Результаты					
Характеристики эффективного сечения (изгиб)		Характеристики сечения нетто		Результаты расчёта	
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (с		
Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{ef} R_y \gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,640 < 1	✓ 7.7.4		
Расчёт на поперечную силу	$Q / Q_w \leq 1$	0,084 < 1	✓ 7.7.6		
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_i}{A_i R_y \gamma_c} + \frac{M_{i20}}{W_{i20} R_y \gamma_c} + \frac{e_i \cdot N_i}{W_{i30} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,737 < 1	✓		
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)	$\frac{N}{\phi_x A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,746 < 1	✓ 7.7.10.3		
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)	$\frac{N}{\phi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,740 < 1	✓ 7.7.10.3		
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.101)	$\left( \frac{N}{\phi_x A_{ef} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} + \left( \frac{e_N N + M_y(x)}{\chi_{LT} W_{y(2),ef} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} \leq 1$	0,840 < 1	✓ 7.7.10.4		
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)</b>					
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260	
Расчётное осевое усилие сжатия	N	40,000	кН		
Изгибающий момент	M	3200,000	кН·см		
Эксцентриситет	e <sub>N</sub>	0,000	см	7.7.2.3	
Площадь эффективного сечения	A <sub>ef</sub>	15,877	см <sup>2</sup>		
Расчётный момент сопротивления сечения	W <sub>ef</sub>	170,052	см <sup>3</sup>		
Геометрическая длина элемента	L	8,000	м		
Расчётная длина относительно оси x - x	l <sub>efx</sub>	8,000	м		
Расчётная длина относительно оси y - y	l <sub>efy</sub>	2,000	м		
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	L <sub>crT</sub>	4,000	м		
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	L <sub>crLT</sub>	2,000	м		
Приведённая гибкость относительно оси x - x	λ <sub>x</sub>	0,878		7.7.8.1	
Приведённая гибкость относительно оси y - y	λ <sub>y</sub>	0,519		7.7.8.1	
Кривая потери устойчивости относительно оси x - x		a		7.7.8.1	
Кривая потери устойчивости относительно оси y - y		b		7.7.8.1	
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ <sub>x</sub>	0,755		7.7.8.1	
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ <sub>y</sub>	0,877		7.7.8.1	
Критическая сила для крутильной формы потери устойчивости	N <sub>crT</sub>	906,661	кН	7.7.8.4	
Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии	M <sub>cr</sub>	31235,691	кН·см	Приложение Г	
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	λ <sub>LT</sub>	0,426		7.7.9.2	
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b		7.7.9.2	
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	χ <sub>LT</sub>	0,912		7.7.9.2	
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1			
Коэффициент взаимодействия	k	1,043			
Расчётное сопротивление стали	R <sub>y</sub>	333	Н/мм <sup>2</sup>		
Коэффициент условий работы	γ <sub>c</sub>	1			

Excel    Закрыть    Справка

Результаты			
Характеристики эффективного сечения (изгиб)   Характеристики сечения нетто   Результаты расчёта			
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (с
Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{эф} R_y \gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,640 < 1	✓ 7.7.4
Расчёт на поперечную силу	$Q / Q_w \leq 1$	0,084 < 1	✓ 7.7.6
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_i}{A_i R_y \gamma_c} + \frac{M_{i20}}{W_{i20} R_y \gamma_c} + \frac{e_i \cdot N_i}{W_{i30} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,737 < 1	✓
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)	$\frac{N}{\phi_x A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{xxt} \frac{M_x}{\chi_{xt} W_{xэф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,746 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)	$\frac{N}{\phi_y A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{yyt} \frac{M_x}{\chi_{yt} W_{xэф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,740 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.101)	$\left( \frac{N}{\phi A_{эф} R_y \gamma_c} \right)^{0.8} + \left( \frac{e_N N + M_y(x)}{\chi_{yt} W_{y(эф)} R_y \gamma_c} \right)^{0.8} \leq 1$	0,840 < 1	✓ 7.7.10.4

Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	N	40,000	кН	
Изгибающий момент	M	3200,000	кН·см	
Эксцентриситет	e <sub>N</sub>	0,000	см	7.7.2.3
Площадь эффективного сечения	A <sub>эф</sub>	15,877	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения	W <sub>эф</sub>	170,052	см <sup>3</sup>	
Геометрическая длина элемента	L	8,000	м	
Расчётная длина относительно оси x - x	l <sub>эфx</sub>	8,000	м	
Расчётная длина относительно оси y - y	l <sub>эфy</sub>	2,000	м	
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	L <sub>сТ</sub>	4,000	м	
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	L <sub>сЛТ</sub>	2,000	м	
Приведённая гибкость относительно оси x - x	λ <sub>x</sub>	0,878		7.7.8.1
Приведённая гибкость относительно оси y - y	λ <sub>y</sub>	0,519		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси x - x		a		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси y - y		b		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ <sub>x</sub>	0,755		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ <sub>y</sub>	0,877		7.7.8.1
Критическая сила для крутильной формы потери устойчивости	N <sub>сТ</sub>	906,661	кН	7.7.8.4
Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии	M <sub>ср</sub>	31235,691	кН·см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	λ <sub>ЛТ</sub>	0,426		7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b		7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	χ <sub>ЛТ</sub>	0,912		7.7.9.2
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1		
Коэффициент взаимодействия	k	1,056		
Расчётное сопротивление стали	R <sub>y</sub>	333	Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	γ <sub>c</sub>	1		

Excel | Закрыть | Справка

Результаты			
Характеристики эффективного сечения (изгиб)   Характеристики сечения нетто   Результаты расчёта			
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (с)
Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{ef} R_y \gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,640 < 1	✓ 7.7.4
Расчёт на поперечную силу	$Q / Q_w \leq 1$	0,084 < 1	✓ 7.7.6
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_i}{A_i R_y \gamma_c} + \frac{M_{i20}}{W_{i20} R_y \gamma_c} + \frac{e_i \cdot N_i}{W_{i30} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,737 < 1	✓
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)	$\frac{N}{\phi_x A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xst} \frac{M_x}{\chi_{st} W_{xst} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,746 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)	$\frac{N}{\phi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yst} \frac{M_x}{\chi_{st} W_{xst} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,740 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.101)	$\left( \frac{N}{\phi A_{ef} R_y \gamma_c} \right)^{0.8} + \left( \frac{e_N N + M_y(z)}{\chi_{LT} W_{y(LT)} R_y \gamma_c} \right)^{0.8} \leq 1$	0,840 < 1	✓ 7.7.10.4

Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.101)				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Эксцентриситет	$e_N$	0,000	см	7.7.2.3
Площадь эффективного сечения	$A_{ef}$	15,877	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения	$W_{y(z)ef}$	170,052	см <sup>3</sup>	
Геометрическая длина элемента	$L$	8,000	м	
Расчётная длина относительно оси x - x	$l_{efx}$	8,000	м	
Расчётная длина относительно оси y - y	$l_{efy}$	2,000	м	
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	$L_{crT}$	4,000	м	
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	$L_{crLT}$	2,000	м	
Приведённая гибкость относительно оси x - x	$\bar{\lambda}_x$	0,878		7.7.8.1
Приведённая гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,519		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси x - x		a		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси y - y		b		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\phi_x$	0,755		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\phi_y$	0,877		7.7.8.1
Критическая сила при крутильной форме потери устойчивости	$N_{crT}$	906,661	кН	7.7.8.4
Критическая сила при изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{crTF}$	906,661	кН	7.7.8.5
Условная гибкость при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\bar{\lambda}_T$	0,764		7.7.8.3
Кривая потери устойчивости при крутильной/изгибно-крутильной форме		a		7.7.8.3
Коэффициент устойчивости при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\phi_T$	0,820		7.7.8.3
Расчётный понижающий коэффициент	$\phi$	0,755		
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	31235,691	кН·см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,426		7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b		7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,912		7.7.9.2
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	333	Н/мм <sup>2</sup>	

Рисунок 2.3.19 – Результаты расчёта. Результаты проверки


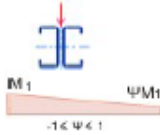
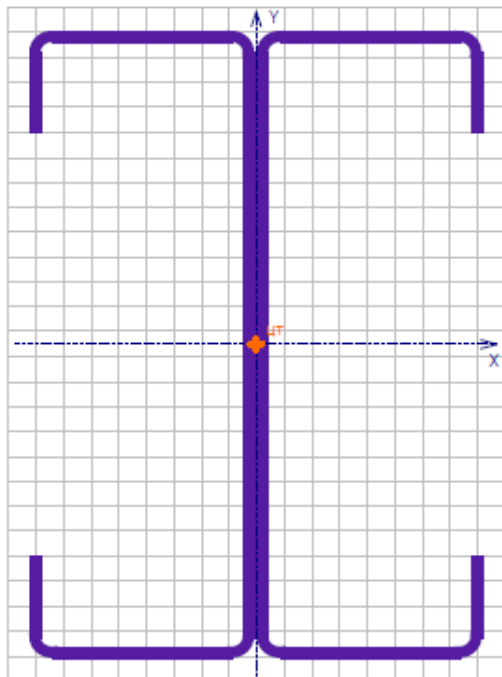
 Delta Engineering Software http://www.CFSteel.ru mailto:deltaing@mail.ru		CFSteel 4.3 User СП260	страница 1 28.04.2022
<b>Колонна фахверка</b>			
Длина элемента	L	8,000 м	
Расчётное осевое усилие сжатия	N	40,000 кН	
Расчётный изгибающий момент (расчёт на устойчивость)	M	3200,000 кН·см	
Расчётный изгибающий момент (расчёт на прочность)	M	3200,000 кН·см	
Расчётная длина относительно оси x - x	$l_{ex}$	8,000 м	
Расчётная длина относительно оси y - y	$l_{ey}$	2,000 м	
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	$L_{cr,T}$	4,000 м	
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	$L_{cr,LT}$	2,000 м	
Коэффициент закрепления концов от поворота вокруг оси элемента	k	1	
Коэффициент стеснения деформации концов элемента	$k_w$	1	
Коэффициент	$C_1$	1,140	
Коэффициент	$C_2$	0,000	
Уровень приложения поперечной нагрузки			
Вид эпюры моментов			
Шаг объединения ветвей	$l_1$	0,500 м	
Коэффициент условий работы (расчёт на устойчивость)	$\gamma_c$	1	
Коэффициент условий работы (расчёт на прочность)	$\gamma_c$	1	
<b>Сечение</b>			
С 250x80x40x2,5 ECCS L			
	h	250,0 мм	
	t	2,5 мм	
	b	80,0 мм	
	c	40,0 мм	
	r	5,0 мм	
	$t_{coat}$	0,00 мм	
	S	0,0 мм	
<b>Ослабление сечения отверстиями</b>			
	Стенка		
Диаметр отверстия	d	18,0 мм	
	$a_1$	83,3 мм	
	$a_2$	83,3 мм	
<b>Сталь</b>			
Группа стандартов		EN	
Стандарт		EN 10147	
Сталь		S350GD	
Нормативное сопротивление стали по пределу текучести	$R_{ym}$	350 Н/мм <sup>2</sup>	
Нормативное сопротивление стали по пределу прочности	$R_{un}$	420 Н/мм <sup>2</sup>	
Модуль упругости	E	206000 Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент Пуассона	$\nu$	0,3	
Коэффициент надёжности по материалу	$\gamma_m$	1,05	

Рисунок 2.3.20 – Результаты расчёта в Excel. Общие данные

Колонна фахверка

C 250x80x40x2,5 ECCS L

Характеристики полного сечения



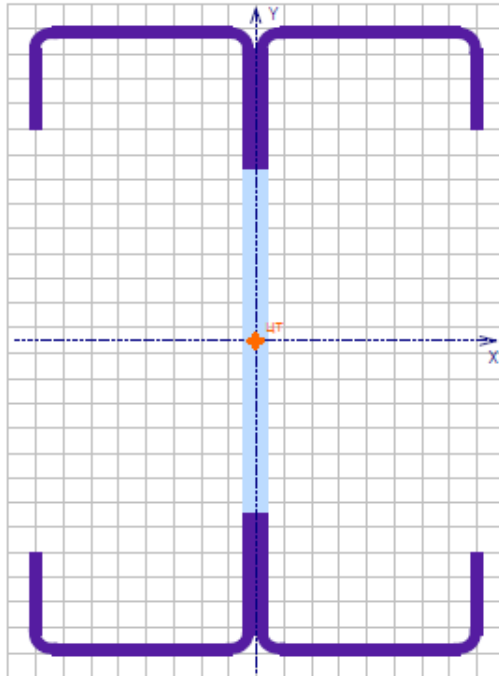
Наименование характеристики	Обозн.	Значение	Ед.изм.
Площадь поперечного сечения	A	23,463	см <sup>2</sup>
Момент инерции относительно оси x - x	I <sub>x</sub>	2162,083	см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения относительно оси x - x	W <sub>x</sub>	172,967	см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси x - x	i <sub>x</sub>	9,599	см
Момент инерции относительно оси y - y	I <sub>y</sub>	386,333	см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения относительно оси y - y	W <sub>y</sub>	48,292	см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси y - y	i <sub>y</sub>	4,058	см
Момент инерции при свободном кручении	I <sub>t</sub>	0,487182	см <sup>4</sup>
Секториальный момент инерции	I <sub>w</sub>	74457,671	см <sup>6</sup>
Вес одного погонного метра профиля		18,94	кг/м

Рисунок 2.3.21 – Результаты расчёта в Excel. Характеристики полного сечения

Колонна фахверка

C 250x80x40x2,5 ECCS L

Характеристики эффективного сечения



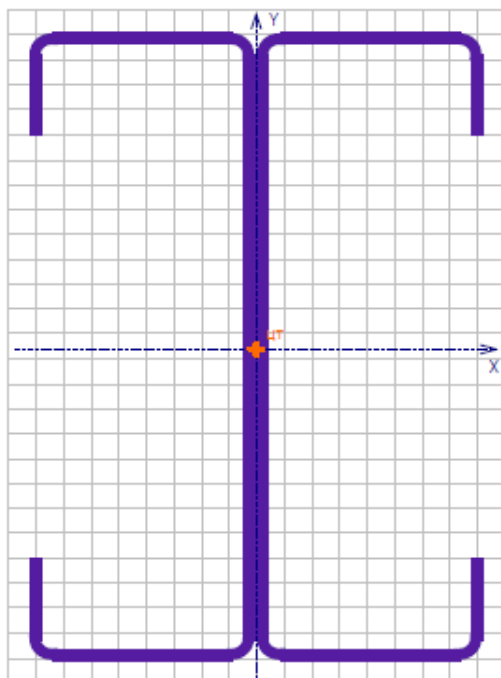
Наименование характеристики	Обозн.	Значение Ед.изм.
Площадь поперечного сечения	$A_{ef}$	15,877 см <sup>2</sup>
Момент инерции относительно оси x - x	$I_{x,ef}$	1963,880 см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения для верхнего пояса	$W_{x,ef}$	157,110 см <sup>3</sup>
Момент сопротивления сечения для нижнего пояса	$W_{x,ef}$	157,110 см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси x - x	$i_{x,ef}$	11,122 см
Момент инерции относительно оси y - y	$I_{y,ef}$	353,365 см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения относительно оси y - y	$W_{y,ef}$	44,171 см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси y - y	$i_{y,ef}$	4,718 см

Рисунок 2.3.22 – Результаты расчёта в Excel. Характеристики эффективного сечения (сжатие)

Колонна фахверка

C 250x80x40x2,5 ECCS L

Характеристики эффективного сечения (изгиб)



Наименование характеристики	Обозн.	Значение	Ед.изм.
Площадь поперечного сечения	$A_{ef}$	23,294	см <sup>2</sup>
Момент инерции относительно оси x - x	$I_{x,ef}$	2139,727	см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения для верхнего пояса	$W_{xs,ef}$	170,052	см <sup>3</sup>
Момент сопротивления сечения для нижнего пояса	$W_{xs,ef}$	172,320	см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси x - x	$i_{x,ef}$	9,584	см
Момент инерции относительно оси y - y	$I_{y,ef}$	378,060	см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения относительно оси y - y	$W_{y,ef}$	47,258	см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси y - y	$i_{y,ef}$	4,029	см

Рисунок 2.3.23 – Результаты расчёта в Excel. Характеристики эффективного сечения (изгиб)

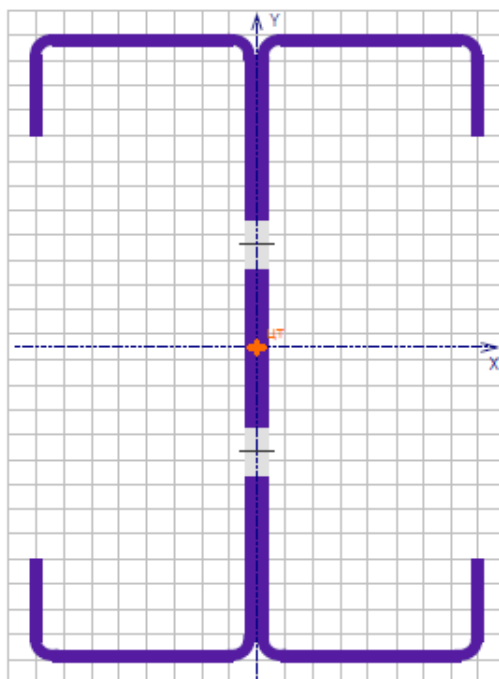




Колонна фахверка


C 250x80x40x2,5 ECCS L

Характеристики сечения нетто



Наименование характеристики	Обозн.	Значение Ед.изм.
Площадь поперечного сечения	A	21,663 см <sup>2</sup>
Момент инерции относительно оси x - x	I <sub>x</sub>	2130,372 см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения для верхнего волокна	W <sub>хв</sub>	170,435 см <sup>3</sup>
Момент сопротивления сечения для нижнего волокна	W <sub>хн</sub>	170,424 см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси x - x	i <sub>x</sub>	9,917 см
Момент инерции относительно оси y - y	I <sub>y</sub>	386,296 см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения относительно оси y - y	W <sub>y</sub>	48,287 см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси y - y	i <sub>y</sub>	4,223 см

Рисунок 2.3.24 – Результаты расчёта в Excel. Характеристики сечения нетто

	Delta Engineering Software	CFSteel 4.3	страница 6	
	http://www.CFSteel.ru mailto:deltaing@mail.ru	User СП260	28.04.2022	

Колонна фахверка				
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Статус	Пункт (формула) СП 260
Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{эф} R_y \gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,640 < 1	✓	7.7.4
Расчёт на поперечную силу	$Q / Q_{ав} \leq 1$	0,084 < 1	✓	7.7.6
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_1}{A_1 R_y \gamma_c} + \frac{M_{x1}}{W_{x1} R_y \gamma_c} + \frac{\sigma_1 \cdot N_1}{W_{y1} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,737 < 1	✓	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)	$\frac{N}{\psi_y A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{yx} \frac{M_x}{\chi_{1x} W_{эф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,746 < 1	✓	7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)	$\frac{N}{\psi_y A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{yx} \frac{M_x}{\chi_{1x} W_{эф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,740 < 1	✓	7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.101)	$\left( \frac{N}{\psi_y A_{эф} R_y \gamma_c} \right)^{2,0} + \left( \frac{\sigma_1 N + M_x \gamma_c}{\chi_{1x} W_{эф} R_y \gamma_c} \right)^{2,0} \leq 1$	0,840 < 1	✓	7.7.10.4

Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	N	40,000 кН		
Расчётный изгибающий момент	M <sub>x</sub>	3200,000 кН·см		
Площадь эффективного сечения	A <sub>эф</sub>	15,877 см <sup>2</sup>		
Расчётный момент сопротивления сечения	W <sub>x</sub>	170,052 см <sup>3</sup>		
Расчётное сопротивление стали	R <sub>y</sub>	333 Н/мм <sup>2</sup>		
Коэффициент условий работы	γ <sub>c</sub>	1		

Расчёт на поперечную силу				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260

Рисунок 2.3.25,а – Результаты расчёта в Excel. *Результаты проверок (начало)*

Элементы

Расчётная поперечная сила	$Q$	12,000 кН	
Расчётная высота стенки	$s_w$	247,5 мм	7.7.6
Расчётная толщина	$t$	2,5 мм	
Условная гибкость стенки	$\bar{\lambda}_{wv}$	1,378	7.7.6
Расчётное сопротивление стали сдвигу	$R_s$	116 Н/мм <sup>2</sup>	7.7.6
Расчётная несущая способность сечения от действия поперечной силы	$Q_w$	143,697 кН	(7.7.9)

Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом

Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_1$	22,000 кН		
Изгибающий момент в ветви относительно её оси	$M_{1x0}$	1760,000 кН·см		
Расстояние от центра тяжести сечения из спаренных профилей до центра тяжести эффективного сечения отдельной ветви	$e_1$	0,895 см		
Расчётная площадь сечения ветви	$A_1$	7,938 см <sup>2</sup>		
Расчётный момент сопротивления сечения ветви	$W_{1x0ef}$	85,022 см <sup>3</sup>		
Расчётный момент сопротивления сечения ветви	$W_{1y0ef}$	17,768 см <sup>3</sup>		
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	333 Н/мм <sup>2</sup>		
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	1		

Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)

Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	$N$	40,000 кН		
Изгибающий момент	$M$	3200,000 кН·см		
Эксцентриситет	$e_N$	0,000 см		7.7.2.3
Площадь эффективного сечения	$A_{ef}$	15,877 см <sup>2</sup>		
Расчётный момент сопротивления сечения	$W_{ef}$	170,052 см <sup>3</sup>		

Рисунок 2.3.25,б – Результаты расчёта в Excel. *Результаты проверок (продолжение)*

Элементы

Геометрическая длина элемента	L	8,000 м	
Расчётная длина относительно оси x - x	$l_{ex}$	8,000 м	
Расчётная длина относительно оси y - y	$l_{ey}$	2,000 м	
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	$L_{от}$	4,000 м	
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	$L_{отл}$	2,000 м	
Приведённая гибкость относительно оси x - x	$\bar{\lambda}_x$	0,878	7.7.8.1
Приведённая гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,519	7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси x - x		a	7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси y - y		b	7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\varphi_x$	0,755	7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\varphi_y$	0,877	7.7.8.1
Критическая сила для крутильной формы потери устойчивости	$N_{от}$	906,661 кН	7.7.8.4
Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии	$M_{от}$	31235,691 кН·см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{от}$	0,426	7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b	7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{от}$	0,912	7.7.9.2
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1	
Коэффициент взаимодействия	k	1,043	
Расчётное сопротивление стали	$R_s$	333 Н/мм <sup>2</sup>	

Рисунок 2.3.25,в – Результаты расчёта в Excel. *Результаты проверок (продолжение)*

Элементы

Кoeffициент условий работы	$\gamma_c$	1		
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	N	40,000 кН		
Изгибающий момент	M	3200,000 кН·см		
Эксцентриситет	$e_N$	0,000 см		7.7.2.3
Площадь эффективного сечения	$A_{ef}$	15,877 см <sup>2</sup>		
Расчётный момент сопротивления сечения	$W_{ef}$	170,052 см <sup>3</sup>		
Геометрическая длина элемента	L	8,000 м		
Расчётная длина относительно оси x - x	$l_{ex}$	8,000 м		
Расчётная длина относительно оси y - y	$l_{ey}$	2,000 м		
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	$L_{crT}$	4,000 м		
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	$L_{crLT}$	2,000 м		
Приведённая гибкость относительно оси x - x	$\bar{\lambda}_x$	0,878		7.7.8.1
Приведённая гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,519		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси x - x		a		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси y - y		b		7.7.8.1
Кoeffициент устойчивости при центральном сжатии	$\varphi_x$	0,755		7.7.8.1
Кoeffициент устойчивости при центральном сжатии	$\varphi_y$	0,877		7.7.8.1
Критическая сила для крутильной формы потери устойчивости	$N_{crT}$	906,661 кН		7.7.8.4
Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии	$M_{cr}$	31235,691 кН·см		Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{crT}$	0,426		7.7.9.2

Рисунок 2.3.25,г – Результаты расчёта в Excel. *Результаты проверок (продолжение)*

Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b	7.7.9.2	
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{ст}$	0,912	7.7.9.2	
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1		
Коэффициент взаимодействия	k	1,056		
Расчётное сопротивление стали	$R_s$	333 Н/мм <sup>2</sup>		
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	1		
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.101)				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	N	40,000 кН		
Изгибающий момент	$M_{y(x)}$	3200,000 кН·см		
Эксцентриситет	$e_N$	0,000 см		7.7.2.3
Площадь эффективного сечения	$A_{эф}$	15,877 см <sup>2</sup>		
Расчётный момент сопротивления сечения	$W_{y(x)ef}$	170,052 см <sup>3</sup>		
Геометрическая длина элемента	L	8,000 м		
Расчётная длина относительно оси x - x	$l_{ex}$	8,000 м		
Расчётная длина относительно оси y - y	$l_{ey}$	2,000 м		
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	$L_{крт}$	4,000 м		
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	$L_{крт}$	2,000 м		
Приведённая гибкость относительно оси x - x	$\bar{\lambda}_x$	0,878		7.7.8.1
Приведённая гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,519		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси x - x		a		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси y - y		b		7.7.8.1

Рисунок 2.3.25,д – Результаты расчёта в Excel. *Результаты проверок (продолжение)*

*Элементы*

Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\varphi_x$	0,755	7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	$\varphi_y$	0,877	7.7.8.1
Критическая сила при крутильной форме потери устойчивости	$N_{crT}$	906,661 кН	7.7.8.4
Критическая сила при изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{crTF}$	906,661 кН	7.7.8.5
Условная гибкость при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\bar{\lambda}_T$	0,764	7.7.8.3
Кривая потери устойчивости при крутильной/изгибно-крутильной форме		a	7.7.8.3
Коэффициент устойчивости при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\varphi_T$	0,820	7.7.8.3
Расчётный понижающий коэффициент	$\varphi$	0,755	
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	31235,691 кН·см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,426	7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b	7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,912	7.7.9.2
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	333 Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	1	

Рисунок 2.3.25,е – Результаты расчёта в Excel. *Результаты проверок (окончание)*

Сжатие с изгибом [СП260]

Наименование элемента: Колонна фахверка

Длина элемента L: 8 м

Расчётное осевое усилие сжатия N: 40 кН К-т условий работы (уст-ть)  $V_c$ : 1

Расчётный момент (устойчивость) M: 3200 кН·см К-т условий работы (прочность)  $V_c$ : 1

Расчётный момент (прочность) M: 3200 кН·см Q: 12 кН  Проверка прочности

Ввод расчётной длины:  Ввод к-тов приведения длины:

Расчётная длина относительно оси x - x  $l_{efx}$ : 8 м К-т приведения длины  $\mu_x$ : 1

Расчётная длина относительно оси y - y  $l_{efy}$ : 2 м К-т приведения длины  $\mu_y$ : 1

Расчётная длина: крутильная форма  $L_{crT}$ : 4 м  Устойчивость плоской формы изгиба

Расчётная длина: плоская форма изгиба  $L_{crLT}$ : 2 м  $M_{cr}$ : 0 кН·см

Потеря устойчивости плоской формы изгиба

Граничные условия

Коэффициент закрепления концов от поворота вокруг оси элемента  $k_T$ : 1

Коэффициент стеснения деформации концов элемента  $k_w$ : 1

Коэффициент  $C_1$ : 1,14

Коэффициент  $C_2$ : 0

Отдельная ветвь элемента Шаг объединения ветвей  $l_1$ : 0,5 м

Уровень приложения нагрузки...

Эпюра моментов ... Эпюра моментов ...

Ослабление

Выбрать... d: 18 мм  $a_1$ : 83,3 мм  $a_2$ : 83,3 мм

Сечение

Выбрать... C 250x80x40x2,5 ECCS L

Сталь

Группа стандартов: EN

Стандарт: EN 10147

Сталь: S350GD

$R_{yH}$ : 350 Н/мм<sup>2</sup>  $R_{tH}$ : 420 Н/мм<sup>2</sup>

Вычислить Закрыть Справка

Рисунок 2.3.26 – Ввод исходных данных (вычисление коэффициентов взаимодействия  $k_{ij}$  по Методу 2)

а) Эпюра моментов

$\psi$ : 0,75  $(-1 \leq \psi \leq 1)$

$a_h = M_h / M_s$ : 0  $(-1 \leq a_h \leq 1)$

Распределённая нагрузка

Сосредоточенная нагрузка

б) Эпюра моментов

$\psi$ : 0  $(-1 \leq \psi \leq 1)$

$a_h = M_h / M_s$ : 0  $(-1 \leq a_h \leq 1)$

Распределённая нагрузка

Сосредоточенная нагрузка

Рисунок 2.3.27 - Ввод данных для вычисления коэффициентов: а) –  $C_{m,x}$ ; б) –  $C_{m,LT}$  (Таблица В.5 [1])




Результаты

Общие данные | Характеристики полного сечения | Характеристики эффективного сечения | Характеристики эффективного сечения (изгиб)


**Колонна фахверка**

Длина элемента	L	8,000 м
Расчётное осевое усилие сжатия	N	40,00 кН
Расчётный изгибающий момент (расчёт на устойчивость)	M	3200,00 кН·см
Расчётный изгибающий момент (расчёт на прочность)	M	3200,00 кН·см
Расчётная длина относительно оси x - x	$l_{efx}$	8,000 м
Расчётная длина относительно оси y - y	$l_{efy}$	2,000 м
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	$L_{crT}$	4,000 м
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	$L_{cr,LT}$	2,000 м
Коэффициент закрепления концов от поворота вокруг оси элемента	k	1
Коэффициент стеснения деформации концов элемента	$k_w$	1
Коэффициент	$C_1$	1,140
Коэффициент	$C_2$	0,000

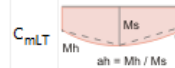
Уровень приложения поперечной нагрузки



Вид эпюры моментов



Вид эпюры моментов



Шаг объединения ветвей

$l_1$	0,500 м
-------	---------

Коэффициент условий работы (расчёт на устойчивость)

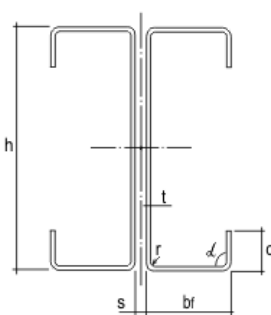
$\gamma_c$	1
------------	---

Коэффициент условий работы (расчёт на прочность)

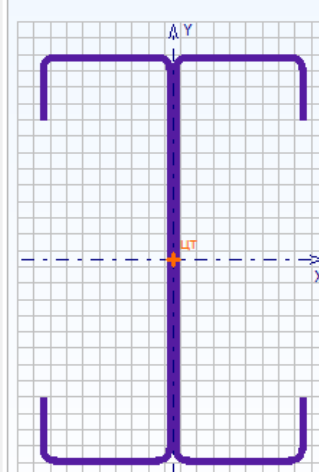
$\gamma_c$	1
------------	---

**Сечение**

C 250x80x40x2,5  
ECCS L



h	250,0 мм
t	2,5 мм
b	80,0 мм
c	40,0 мм
r	5,0 мм
$t_{coat}$	0,00 мм
S	0,0 мм



Excel | Закрывать | Справка

Рисунок 2.3.28 – Результаты расчёта. Общие данные (вычисление коэффициентов взаимодействия  $k_{ij}$  по Методу 2)

Результаты			
Характеристики эффективного сечения (изгиб)   Характеристики сечения нетто   Результаты расчёта			
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (с
Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{эф} R_y \gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,640 < 1	✓ 7.7.4
Расчёт на поперечную силу	$Q / Q_w \leq 1$	0,084 < 1	✓ 7.7.6
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_i}{A_i R_y \gamma_c} + \frac{M_{i20}}{W_{i20} R_y \gamma_c} + \frac{e_i \cdot N_i}{W_{i30} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,737 < 1	✓
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)	$\frac{N}{\phi_x A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{хиз} \frac{M_x}{\chi_{из} W_{эф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,686 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)	$\frac{N}{\phi_y A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{yиз} \frac{M_x}{\chi_{из} W_{эф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,703 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.101)	$\left( \frac{N}{\phi A_{эф} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} + \left( \frac{e_y N + M_y(x)}{\chi_{из} W_{эф} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} \leq 1$	0,840 < 1	✓ 7.7.10.4

Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	N	40,000	кН	
Изгибающий момент	M	3200,000	кН·см	
Эксцентриситет	e <sub>N</sub>	0,000	см	7.7.2.3
Площадь эффективного сечения	A <sub>эф</sub>	15,877	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения	W <sub>эф</sub>	170,052	см <sup>3</sup>	
Геометрическая длина элемента	L	8,000	м	
Расчётная длина относительно оси x - x	l <sub>эфx</sub>	8,000	м	
Расчётная длина относительно оси y - y	l <sub>эфy</sub>	2,000	м	
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	L <sub>срТ</sub>	4,000	м	
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	L <sub>срЛТ</sub>	2,000	м	
Приведённая гибкость относительно оси x - x	λ <sub>x</sub>	0,878		7.7.8.1
Приведённая гибкость относительно оси y - y	λ <sub>y</sub>	0,519		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси x - x		a		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси y - y		b		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ <sub>x</sub>	0,755		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ <sub>y</sub>	0,877		7.7.8.1
Критическая сила для крутильной формы потери устойчивости	N <sub>срТ</sub>	906,661	кН	7.7.8.4
Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии	M <sub>ср</sub>	31235,691	кН·см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	λ <sub>ЛТ</sub>	0,426		7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b		7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	χ <sub>ЛТ</sub>	0,912		7.7.9.2
Метод определения коэффициентов взаимодействия		2		
Коэффициент взаимодействия	k	0,947		
Расчётное сопротивление стали	R <sub>y</sub>	333	Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	γ <sub>c</sub>	1		

Excel | Закрыть | Справка

Результаты			
Характеристики эффективного сечения (изгиб)   Характеристики сечения нетто   Результаты расчёта			
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (с)
Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{ef} R_y \gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,640 < 1	✓ 7.7.4
Расчёт на поперечную силу	$Q / Q_w \leq 1$	0,084 < 1	✓ 7.7.6
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_i}{A_i R_y \gamma_c} + \frac{M_{i20}}{W_{i20} R_y \gamma_c} + \frac{e_i \cdot N_i}{W_{i30} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,737 < 1	✓
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.99)	$\frac{N}{\phi_x A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,686 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)	$\frac{N}{\phi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,703 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.101)	$\left( \frac{N}{\phi_x A_{ef} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} + \left( \frac{e_y N + M_y(x)}{\chi_{LT} W_{y,ef} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} \leq 1$	0,840 < 1	✓ 7.7.10.4

Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (7.100)				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	N	40,000	кН	
Изгибающий момент	M	3200,000	кН·см	
Эксцентриситет	e <sub>N</sub>	0,000	см	7.7.2.3
Площадь эффективного сечения	A <sub>ef</sub>	15,877	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения	W <sub>ef</sub>	170,052	см <sup>3</sup>	
Геометрическая длина элемента	L	8,000	м	
Расчётная длина относительно оси x - x	l <sub>efx</sub>	8,000	м	
Расчётная длина относительно оси y - y	l <sub>efy</sub>	2,000	м	
Расчётная длина при крутильной форме потери устойчивости	L <sub>crT</sub>	4,000	м	
Расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	L <sub>crLT</sub>	2,000	м	
Приведённая гибкость относительно оси x - x	λ <sub>x</sub>	0,878		7.7.8.1
Приведённая гибкость относительно оси y - y	λ <sub>y</sub>	0,519		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси x - x		a		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости относительно оси y - y		b		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ <sub>x</sub>	0,755		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ <sub>y</sub>	0,877		7.7.8.1
Критическая сила для крутильной формы потери устойчивости	N <sub>crT</sub>	906,661	кН	7.7.8.4
Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии	M <sub>cr</sub>	31235,691	кН·см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	λ <sub>LT</sub>	0,426		7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b		7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	χ <sub>LT</sub>	0,912		7.7.9.2
Метод определения коэффициентов взаимодействия		2		
Коэффициент взаимодействия	k	0,997		
Расчётное сопротивление стали	R <sub>y</sub>	333	Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	γ <sub>c</sub>	1		

Рисунок 2.3.29 – Результаты расчёта. *Результаты проверки* (вычисление коэффициентов взаимодействия  $k_{ij}$  по Методу 2)

### 2.3.3. Сжатый с изгибом элемент из спаренных С-образных профилей по ЕС3

**Задание:** Выполнить проверку устойчивости сжато-изгибаемого элемента из спаренных С-образных профилей. Исходные данные взяты из Примера L документа Worked Examples According to EN 1993-1-3 Eurocode 3, Part 1.3 / ECCS TC 7, № 123 [10].

The example shows a check of an end-wall column. The cross-section consists of two C-sections arranged back-to-back, mutually connected by pairs of bolts located in thirds of the web height. The column is a simply supported beam, loaded by a compressive axial load and three transversal loads acting as intermediate girts connected to the outer flanges. The compressive axial load simulates the reaction from the roof (Figure 2.3.30). The transversal loads simulate either the wind pressure or the wind suction on the end-wall (for simplicity are considered as being the same).

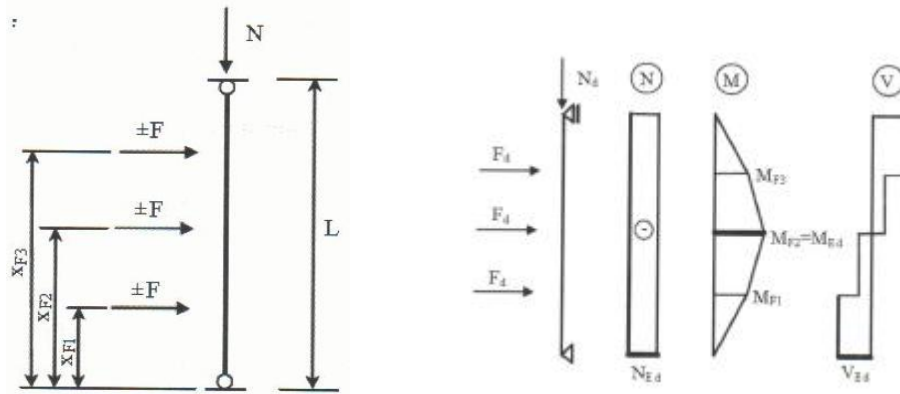


Figure 2.3.30 – System, loading, internal forces and moments

Column height  $L = 8 \text{ m}$ , distance  $x_{F1} = 2 \text{ m}$ ,  $x_{F2} = 4 \text{ m}$ ,  $x_{F3} = 6 \text{ m}$ , distance of girts  $g = 2 \text{ m}$ , distance of flange bracing  $f = 4 \text{ m}$ . Compressive load  $N_{Ed} = 40 \text{ kN}$ , transversal loads  $F_d = 8 \text{ kN}$ , max. bending moment  $M_{Ed} = 32 \text{ kNm}$ .

Table 2.3.13 - Buckling lengths and factors [10]

Description	Symbol	Unit	Value
Buckling length about the y-y axis	$L_{cr,y}$	m	8
Buckling length about the z-z axis	$L_{cr,z}$	m	2
Torsional buckling length	$L_{cr,T}$	m	4
Lateral torsional buckling length (outer flanges in compression)	$L_{cr,LT}$	m	2
Lateral torsional buckling length (inner flanges in compression)	$L_{cr,LT}$	m	4
Buckling length factor related to rotation at the end section about the axis z-z	k		1
Buckling length factor related to end section warping	$k_w$		1
Factor (outer flanges in compression)	$C_1$		1,141
Factor (inner flanges in compression)	$C_1$		1,879
Factor (both cases)	$C_2$		0

Profile dimensions (Figure 2.3.31):  $h = 250 \text{ mm}$ ,  $t = 2,5 \text{ mm}$  (without zinc coating),  $b_f = 80 \text{ mm}$ ,  $c = 40 \text{ mm}$ ,  $r = 5 \text{ mm}$ .

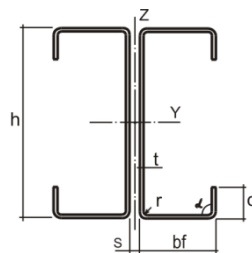


Figure 2.3.31 - Profile dimensions

Элементы

Nominal value of basic yield strength (S350GD+Z275)  $f_{yb} = 350 \text{ N/mm}^2$ , partial factor for resistance of members where failure is caused by global buckling  $\gamma_{M1} = 1,0$ .

*Solution:* The gross-section and effective section properties from [10] and CFSteel calculation results are summarized in Table 2.3.14.

Table 2.3.14 - Gross-section and effective section properties

Description	Symbol	Unit	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Area of section	$A_g$	$\text{cm}^2$	23,463	23,463	0
Moment of inertia	$I_y$	$\text{cm}^4$	2161,9	2162,1	0
Moment of inertia	$I_z$	$\text{cm}^4$	386,3	386,3	0
Radius of gyration	$i_y$	cm	9,599	9,599	0
	$i_z$	cm	4,058	4,058	0
Torsion constant	$I_t$	$\text{cm}^4$	0,4872	0,4872	0
Warping constant (sharp corners)	$I_w$	$\text{cm}^6$	74458	74457,7	0
<i>Effective section (axial compression)</i>					
Area of section	$A_{eff}$	$\text{cm}^2$	15,743	15,747	0,03

*Effective cross-section - bending about y - y axis*

Effective area of the compression flange with an edge stiffener

*Step 1:* Effective cross-section for spring stiffness of the stiffener  $K=\infty$  based on the maximum compressive stress  $\sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M0} = 350 \text{ N/mm}^2$

Description	Symbol	Unit	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
<i>Flange (double supported compression element)</i>					
Plate slenderness	$\bar{\lambda}_p$		0,63	0,63	0
Reduction factor	$\rho$		1	1	0
Effective widths	$b_{eff,1}$	mm	32,5	32,5	0
	$b_{eff,2}$	mm	32,5	32,5	0
<i>Lip (outstand compression element)</i>					
Buckling factor	$k\sigma$		0,73	0,73	0
Plate slenderness	$\bar{\lambda}_p$		0,74	0,74	0
Reduction factor	$\rho$		1	1	0
Effective width	$c_{eff}$	mm	32,5	32,5	0

*Step 2:* Reduced strength for effective area of stiffener from *Step 1* due to distortional buckling

Description	Symbol	Unit	Clause	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
<i>Effective cross-sectional properties of the edge stiffener (clause 5.5.3.2 [4])</i>						
Effective area	$A_s$	$\text{mm}^2$		187,03	187,04	0
Distance between the midline of the web and axis of stiffener	$z_s$	mm		10,07	10,07	0
Effective moment of inertia	$I_s$	$\text{mm}^4$		29589,36	29589,90	0
<i>Spring stiffness of the effective edge stiffener (clause 5.5.3.1(5)[4])</i>						
Spring stiffness	$K$	$\text{N/mm}^2$		0,630	0,630	0
Elastic critical buckling stress of the effective edge stiffener	$\sigma_{cr,s}$	$\text{N/mm}^2$	5.5.3.2(7)	668,83	668,79	0
Slenderness ratio	$\bar{\lambda}_d$		5.5.3.2(11)	0,72	0,72	0
Reduction factor	$\chi_d$			0,95	0,95	0
Reduced thickness	$t_{s,red}$	mm		2,37	2,37	0

Table 2.3.15 - Effective area of the compression web

Description	Symbol	Unit	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Plate slenderness	$\bar{\lambda}_p$		0,87	0,88	1,1

Элементы

Reduction factor	$\rho$		1	1	0
Effective height	$h_{eff}$	The web is fully effective			

Table 2.3.16 – Section properties of effective cross-section (bending)

Description	Symbol	Unit	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Area of section	$A_{eff}$	cm <sup>2</sup>	23,2642	23,2651	0
Centre of gravity	$z_{eff}$	mm	122,78	122,78	0
Second moment of area	$I_{yeff}$	cm <sup>4</sup>	2135,7764	2135,9127	0
Section modulus	$W_{yeff1}$	cm <sup>4</sup>	173,95	172,21	1,0
	$W_{yeff2}$	cm <sup>4</sup>	171,25	169,56	1,0
Distance of centroids (gross section – effective cross-section)	$e_N$	mm	0,97	0,97	0

Comparison of results of the cross-section strength and buckling resistance according to [10] and CFSteel are shown in Table 2.3.17.

Table 2.3.17 - Comparison of results according to [10] and CFSteel

Description	Symbol	Unit	Value [10]	Value CFSteel	Discrepancy, %
Shear force (clause 6.1.5)					
Relative web slenderness	$\bar{\lambda}_w$		1,38	1,4	1,4
Shear buckling strength	$f_{bv}$	N/mm <sup>2</sup>	121,94	120	1,6
Shear resistance	$V_{b,Rd}$	kN	150,90	148,67	1,5
Ratio			0,08	0,081	1,3
Combined compression and bending at the cross-section with the maximal bending moment (clause 6.1.9)					
Design resistance of a cross-section for axial compression	$N_{c,Rd}$	kN	551,00	551,142	0,03
Ratio			0,61	0,61	0
Flexural buckling about the y-y axis					
Elastic critical force	$N_{cr,y}$	kN	700,14	700,18	0
Non-dimensional slenderness about the y - y axis	$\bar{\lambda}_y$		0,89	0,89	0
Reduction factor	$\chi$		0,74	0,74	0
Design buckling resistance of a compression member (flexural buckling about the y – y axis)	$N_{b,Rd,y}$	kN	409,04	409,11	0,02
Flexural buckling about the z-z axis					
Elastic critical force	$N_{cr,z}$	kN	2001,65	2001,80	0
Non-dimensional slenderness about the z - z axis	$\bar{\lambda}_z$		0,52	0,52	0
Reduction factor	$\chi$		0,87	0,87	0
Design buckling resistance of a compression member (flexural buckling about the z – z axis)	$N_{b,Rd,z}$	kN	481,10	481,20	0,02
Torsional buckling					
Elastic critical force for torsional buckling	$N_{cr,T}$	kN	924,29	924,27	0
Non-dimensional slenderness	$\bar{\lambda}_T$		0,77	0,77	0
Reduction factor for torsional buckling	$\chi$		0,74	0,74	0
Design buckling resistance of a compression member (torsional buckling)	$N_{b,Rd,T}$	kN	408,57	408,64	0
Lateral-torsional buckling – outer flanges in compression					
Elastic critical moment for lateral-torsional buckling	$M_{cr}$	kNm	318,69	318,70	0
Non-dimensional slenderness	$\bar{\lambda}_{LT}$		0,43	0,43	0
Reduction factor for lateral-torsional buckling	$\chi$		0,91	0,91	0
Design buckling resistance moment	$M_{b,Rd}$	kNm	54,69	54,20	0,9
Lateral-torsional buckling – inner flanges in compression					
Elastic critical moment for lateral-torsional buckling	$M_{cr}$	kNm	133,18	133,18	0
Non-dimensional slenderness	$\bar{\lambda}_{LT}$		0,67	0,67	0

Reduction factor for lateral-torsional buckling	$\chi$		0,8	0,8	0
Design buckling resistance moment	$M_{b,Rd}$	kNm	47,94	47,58	0,8
Bending and axial compression (clause 6.2.5)					
Ratio (outer flanges in compression)			0,81	0,81	0
Ratio (inner flanges in compression)			0,88	0,88	0

Perform calculations by alternative method in accordance with clause 6.3.3 EN 1993-1-1[3].

Members which are subjected to combined bending and axial compression should satisfy

6.3.3(4):

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{yEd}}{\chi_{LT} M_{yRk} / \gamma_{M1}} \leq 1,$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{yEd}}{\chi_{LT} M_{yRk} / \gamma_{M1}} \leq 1.$$

Characteristic value of resistance to compression (Table 6.7 [3])

$$N_{Rk} = f_y A_{eff} = 35 \cdot 15,747 = 551,145 \text{ kN}.$$

Characteristic value of resistance to bending moment (Table 6.7 [3])

$$M_{y,Rk} = f_y W_{eff,y} = 35 \cdot 169,558 = 5934,53 \text{ kNcm}.$$

*Flexural buckling about the y-y axis:*

Elastic critical force

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{3,14^2 \cdot 21000 \cdot 2162,08}{800^2} = 699,47 \text{ kN}$$

Non-dimensional slenderness about the y-y axis (clause 6.3.1.2 [3])

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{15,747 \cdot 35}{699,47}} = 0,888$$

Imperfection factor  $\alpha=0,21$  (Table 6.3 [4], Table 6.1 [3]).

$$\Phi = 0,5 \left( 1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right) = 0,5(1 + 0,21(0,888 - 0,2) + 0,888^2) = 0,967.$$

Reduction factor (clause 6.3.1.2 [3])

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,967 + \sqrt{0,967^2 - 0,888^2}} = 0,741.$$

*Flexural buckling about the z-z axis:*

Elastic critical force

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 EI_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{3,14^2 \cdot 21000 \cdot 386,333}{200^2} = 1999,77 \text{ kN}$$

Non-dimensional slenderness about the z-z axis (clause 6.3.1.2 [3])

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{15,747 \cdot 35}{1999,77}} = 0,523$$

Imperfection factor  $\alpha=0,34$  (Table 6.3 [4], Table 6.1 [3]).

$$\Phi = 0,5 \left( 1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right) = 0,5(1 + 0,34(0,523 - 0,2) + 0,523^2) = 0,692.$$

Reduction factor (clause 6.3.1.2 [3])

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,692 + \sqrt{0,692^2 - 0,523^2}} = 0,873.$$

*Elastic torsional buckling force*

$$N_{cr,T} = \frac{A}{I_y + I_z} \left( GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{L_T^2} \right) = \frac{23,463}{2162,08 + 386,333} \left( 8076,9 \cdot 0,4872 + \frac{3,14^2 \cdot 21000 \cdot 74457,67}{400^2} \right) = 922,66 \text{ kN.}$$

*Lateral-torsional buckling – inner flanges in compression (positive bending moment)*

*Elastic critical moment for lateral-torsional buckling:*

Factors  $C_1$  and  $C_2$  are taken as in [10]:  $C_1 = 1,879$ ,  $C_2 = 0$ .

Coordinate of the point of load application which relates to shear centre  $z_g = -0,5 h = -125,0 \text{ mm} = -12,5 \text{ cm}$  (stabilising load).

Elastic critical moment for lateral-torsional buckling [26]

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(L_{cr,LT})^2} \left( \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(L_{cr,LT})^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - (C_2 z_g) \right) = 1,879 \cdot \frac{3,14^2 \cdot 21000 \cdot 386,333}{400^2} \left( \sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \frac{74457,67}{386,333} + \frac{400^2 \cdot 8076,9 \cdot 0,4872}{3,14^2 \cdot 21000 \cdot 386,333} + (0(-12,5))^2} - (0(-12,5)) \right) = 13299,37 \text{ kNcm.}$$

Non-dimensional slenderness for lateral-torsional buckling (clause 6.3.2.2 [3])

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,eff} f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{169,558 \cdot 35}{13299,37}} = 0,668.$$

Imperfection factor  $\alpha_{LT} = 0,34$  (clause 6.2.4, Table 6.3 [3,4]).

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left( 1 + \alpha(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) = 0,5(1 + 0,34(0,668 - 0,2) + 0,668^2) = 0,803.$$

Reduction factor (clause 6.3.2.2 [3])

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,803 + \sqrt{0,803^2 - 0,668^2}} = 0,801.$$

*Calculation of interaction factors  $k_{yy}$  and  $k_{zy}$  according to Method 1:*

$$\alpha_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} = 1 - \frac{0,4872}{2162,083} = 0,9998.$$

$C_{my,0}$  according to case 1 Table A.2 [3]:

$$C_{my,0} = 0,79 + 0,21\psi + 0,36(\psi - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 0,79 + 0,21 \cdot 0 + 0,36(0 - 0,33) \frac{40}{699,47} = 0,783$$

Elastic critical moment for lateral-torsional buckling for the pure bending case [26]

$$M_{cr,0} = \sqrt{\frac{\pi^2 E I_z}{(L_{cr,LT})^2} \left( GI_T + \frac{\pi^2 EI_w}{(L_{cr,LT})^2} \right)} = \sqrt{\frac{3,14^2 \cdot 21000 \cdot 386,333}{400^2} \left( 8076,9 \cdot 0,4872 + \frac{3,14^2 \cdot 21000 \cdot 74457,67}{400^2} \right)} = 7080,86 \text{ kNcm}$$

Non-dimensional slenderness for lateral-torsional buckling due to uniform bending moment

$$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{W_{y,com} eff f_y}{M_{cr,0}}} = \sqrt{\frac{169,558 \cdot 35}{7080,86}} = 0,915.$$



$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A_{eff}}{W_{eff,y}} = \frac{3200}{40} \frac{15,747}{169,558} = 7,43.$$

According to [26]:

$$\lambda_{lim} = 0,2\sqrt{C_1}^4 \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)} = 0,2\sqrt{1,879}^4 \sqrt{\left(1 - \frac{40}{1999,77}\right)\left(1 - \frac{40}{922,66}\right)} = 0,270.$$

$$\bar{\lambda}_0 > \lambda_{lim}$$

Therefore:

$$C_{my} = C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \frac{\alpha_{LT} \sqrt{\varepsilon_y}}{1 + \alpha_{LT} \sqrt{\varepsilon_y}} = 0,783 + (1 - 0,783) \frac{0,9998\sqrt{7,43}}{1 + 0,9998\sqrt{7,43}} = 0,942$$

$$C_{mLT} = C_{my}^2 \frac{\alpha_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 0,942^2 \frac{0,9998}{\sqrt{\left(1 - \frac{40}{1999,77}\right)\left(1 - \frac{40}{922,66}\right)}} = 0,917.$$

$C_{mLT} < 1$  therefore  $C_{mLT} = 1$  (table A.1 [3])

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = \frac{1 - \frac{40}{699,47}}{1 - 0,741 \frac{40}{699,47}} = 0,984,$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = \frac{1 - \frac{40}{1999,77}}{1 - 0,873 \frac{40}{1999,77}} = 0,997.$$

Interaction factors (clause 6.3.3 [3])

$$k_{yy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 0,942 \cdot 1 \frac{0,984}{1 - \frac{40}{699,47}} = 0,983,$$

$$k_{zy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 0,942 \cdot 1 \frac{0,997}{1 - \frac{40}{699,47}} = 0,996.$$

Interaction formulae (clause 6.3.3 [3])

$$\frac{40}{0,741 \cdot 551,145/1} + 0,983 \frac{3200}{0,801 \cdot 5934,53/1} = 0,760 < 1,$$

$$\frac{40}{0,873 \cdot 551,145/1} + 0,996 \frac{3200}{0,801 \cdot 5934,53/1} = 0,753 < 1.$$

*Lateral-torsional buckling – outer flanges in compression (negative bending moment)*

Elastic critical moment for lateral-torsional buckling:

According to [10]  $L_{cr,LT} = 2000$  mm,  $C_1 = 1,14$ ,  $C_2 = 0$ ,  $\psi = 0,75$

Elastic critical moment for lateral-torsional buckling [26]

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(L_{cr,LT})^2} \left( \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(L_{cr,LT})^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - (C_2 z_g) \right) =$$

$$= 1,14 \cdot \frac{3,14^2 \cdot 21000 \cdot 386,333}{200^2} \left( \sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \frac{74457,67}{386,333} + \frac{200^2 \cdot 8076,9 \cdot 0,4872}{3,14^2 \cdot 21000 \cdot 386,333}} \right) = 31812 \text{ kNcm.}$$

Non-dimensional slenderness for lateral-torsional buckling (clause 6.3.2.2 [3])

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,eff} f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{169,558 \cdot 35}{31812}} = 0,432.$$

Imperfection factor  $\alpha_{LT} = 0,34$  (clause 6.2.4, Table 6.3 [3,4]).

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left( 1 + \alpha(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) = 0,5(1 + 0,34(0,432 - 0,2) + 0,432^2) = 0,63.$$

Reduction factor (clause 6.3.2.2 [3])

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,63 + \sqrt{0,63^2 - 0,432^2}} = 0,910.$$

Calculation of interaction factors  $k_{yy}$  and  $k_{zy}$  according to Method 1

$$\alpha_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} = 1 - \frac{0,4872}{2162,083} = 0,9998.$$

$C_{my,0}$  according to case 1 Table A.2 [3]:

$$\begin{aligned} C_{my,0} &= 0,79 + 0,21\psi + 0,36(\psi - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} \\ &= 0,79 + 0,21 \cdot 0,75 + 0,36(0,75 - 0,33) \frac{40}{699,47} = 0,957 \end{aligned}$$

Elastic critical moment for lateral-torsional buckling for the pure bending case [26]

$$\begin{aligned} M_{cr,0} &= \sqrt{\frac{\pi^2 E I_z}{(L_{cr,LT})^2} \left( GI_T + \frac{\pi^2 EI_w}{(L_{cr,LT})^2} \right)} = \\ &= \sqrt{\frac{3,14^2 \cdot 21000 \cdot 386,333}{200^2} \left( 8076,9 \cdot 0,4872 + \frac{3,14^2 \cdot 21000 \cdot 74457,67}{200^2} \right)} = 27904,3 \text{ kNcm} \end{aligned}$$

Non-dimensional slenderness for lateral-torsional buckling due to uniform bending moment

$$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{W_{y,com} eff f_y}{M_{cr,0}}} = \sqrt{\frac{169,558 \cdot 35}{27904,3}} = 0,461.$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A_{eff}}{W_{eff,y}} = \frac{3200}{40} \frac{15,747}{169,558} = 7,43.$$

According to [26]:

$$\begin{aligned} \lambda_{lim} &= 0,2 \sqrt{C_1}^4 \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)} = 0,2 \sqrt{1,14}^4 \sqrt{\left(1 - \frac{40}{1999,77}\right) \left(1 - \frac{40}{922,66}\right)} = 0,210. \\ \bar{\lambda}_0 &> \lambda_{lim} \end{aligned}$$

Therefore:

$$C_{my} = C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \frac{\alpha_{LT} \sqrt{\varepsilon_y}}{1 + \alpha_{LT} \sqrt{\varepsilon_y}} = 0,957 + (1 - 0,957) \frac{0,9998 \sqrt{7,43}}{1 + 0,9998 \sqrt{7,43}} = 0,988.$$

$$C_{mLT} = C_{my}^2 \frac{\alpha_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 0,988^2 \frac{0,9998}{\sqrt{\left(1 - \frac{40}{1999,77}\right) \left(1 - \frac{40}{922,66}\right)}} = 1,008$$

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = \frac{1 - \frac{40}{699,47}}{1 - 0,741 \frac{40}{699,47}} = 0,984,$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = \frac{1 - \frac{40}{1999,77}}{1 - 0,873 \frac{40}{1999,77}} = 0,997.$$

Interaction factors (clause 6.3.3 [3])

$$k_{yy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 0,988 \cdot 1,008 \frac{0,984}{1 - \frac{40}{699,47}} = 1,039,$$

$$k_{zy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 0,988 \cdot 1,008 \frac{0,997}{1 - \frac{40}{699,47}} = 1,053.$$

Interaction formulae (clause 6.3.3 [3])

$$\frac{40}{0,741 \cdot 551,145/1} + 1,039 \frac{3200}{0,910 \cdot 5934,53/1} = 0,714 < 1,$$

$$\frac{40}{0,873 \cdot 551,145/1} + 1,053 \frac{3200}{0,910 \cdot 5934,53/1} = 0,707 < 1.$$

Calculation of interaction factors  $k_{yy}$  and  $k_{zy}$  according to Method 2

$$k_{yy} = C_{m,y} \left( 1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \leq C_{m,y} \left( 1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$$

According to case 1 Table B.3 [3]:  $C_{m,y} = 0,6 + 0,4\psi = 0,9$

$$k_{yy} = 0,9 \left( 1 + 0,6 \cdot 0,888 \frac{40}{0,741 \cdot 551,145/1} \right) = 0,947 < 0,953$$

$$k_{zy} = \left( 1 - \frac{0,05 \bar{\lambda}_z}{(C_{m,LT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} \right) \geq \left( 1 - \frac{0,05}{(C_{m,LT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} \right)$$

According to case 3 Table B.3 [3]:  $C_{m,LT} = 0,9 + 0,1 \cdot 0 = 0,9$

$$k_{zy} = \left( 1 - \frac{0,05 \cdot 0,523}{(0,9 - 0,25) 0,873 \cdot 551,145/1} \frac{40}{\gamma_{M1}} \right) = 0,997 > 0,993$$

Interaction formulae

$$\frac{40}{0,741 \cdot 551,145/1} + 0,947 \frac{3200}{0,910 \cdot 5934,53/1} = 0,659 < 1,$$

$$\frac{40}{0,873 \cdot 551,145/1} + 0,997 \frac{3200}{0,910 \cdot 5934,53/1} = 0,674 < 1.$$

The comparison of the results obtained above, with the results obtained by CFSteel are given in Table 2.3.18.

Table 2.3.18 - Comparison of the calculations results according to clause 6.3.3 [3]

Description	Symb ol	Unit	Obtained results	Value CFSteel	Discrep ancy, %
-------------	------------	------	---------------------	------------------	--------------------

Элементы

Characteristic value of resistance to compression	$N_{Rk}$	kN	551,145	551,142	0
Characteristic value of resistance to bending moment	$M_{Rk}$	kNcm	5934,53	5934,53	0
Flexural buckling about the y-y axis					
Elastic critical force	$N_{cr,y}$	kN	699,47	700,18	0,1
Non-dimensional slenderness about the y-y axis	$\bar{\lambda}_y$		0,888	0,887	0,1
Reduction factor	$\chi_y$		0,741	0,742	0,1
Flexural buckling about the z-z axis					
Elastic critical force	$N_{cr,z}$	kN	1999,77	2001,80	0,1
Non-dimensional slenderness about the z-z axis	$\bar{\lambda}_z$		0,523	0,525	0,4
Reduction factor	$\chi_z$		0,873	0,873	0
<i>Inner flanges in compression</i>					
Lateral-torsional buckling					
Elastic critical moment for laneral-torsional buckling	$M_{cr}$	kNcm	13299,37	13318,17	0,1
Non-dimensional slenderness for lateral-torsional buckling	$\bar{\lambda}_{LT}$		0,668	0,668	0
Reduction factor for lateral-torsional buckling	$\chi_{LT}$		0,801	0,802	0,1
Interaction factors $k_{yy}$ and $k_{zy}$					
Parameter	$C_{my,0}$		0,783	0,783	0
Elastic critical moment for laneral-torsional buckling for the pure bending case	$M_{cr,0}$	kNcm	7080,86	7087,90	0,1
Non-dimensional slenderness for lateral-torsional buckling due to uniform bending moment	$\bar{\lambda}_0$		0,915	0,915	0
Elastic torsional buckling force	$N_{cr,T}$	kN	922,66	924,27	0,2
Parameter	$C_{my}$		0,942	0,942	0
Parameter	$C_{mLT}$		0,917	0,916	0
Parameter	$\mu_y$		0,984	0,985	0,1
Parameter	$\mu_z$		0,997	0,997	0
Interaction factor	$k_{yy}$		0,983	0,984	0,1
Interaction factor	$k_{zy}$		0,996	0,996	0
Interaction formulae (6.61) 6.3.3(4) [3]			0,760	0,759	0
Interaction formulae (6.61) 6.3.3(4) [3]			0,753	0,753	0
<i>Outer flanges in compression</i>					
Lateral-torsional buckling					
Elastic critical moment for laneral-torsional buckling	$M_{cr}$	kNcm	31812	31842,2	0,1
Non-dimensional slenderness for lateral-torsional buckling	$\bar{\lambda}_{LT}$		0,432	0,432	0
Reduction factor for lateral-torsional buckling	$\chi_{LT}$		0,910	0,913	0,3
Interaction factors $k_{yy}$ and $k_{zy}$ <i>Method 1</i>					
Parameter	$C_{my,0}$		0,957	0,956	0
Elastic critical moment for laneral-torsional buckling for the pure bending case	$M_{cr,0}$	kNcm	27904,3	27931,8	0,1
Non-dimensional slenderness for lateral-torsional buckling due to uniform bending moment	$\bar{\lambda}_0$		0,461	0,461	0
Elastic torsional buckling force	$N_{cr,T}$	kN	922,66	924,27	0,2
Parameter	$C_{my}$		0,988	0,988	0
Parameter	$C_{mLT}$		1,008	1,008	0
Parameter	$\mu_y$		0,984	0,985	0,1
Parameter	$\mu_z$		0,997	0,997	0
Interaction factor	$k_{yy}$		1,039	1,041	0,2
Interaction factor	$k_{zy}$		1,053	1,054	0,1
Interaction formulae (6.61) 6.3.3(4) [3]			0,714	0,712	0,2
Interaction formulae (6.61) 6.3.3(4) [3]			0,707	0,705	0,3
Interaction factors $k_{yy}$ and $k_{zy}$ <i>Method 2</i>					
Interaction factor	$k_{yy}$		0,947	0,947	0
Interaction factor	$k_{zy}$		0,997	0,997	0
Interaction formulae (6.61) 6.3.3(4) [3]			0,659	0,657	0,3
Interaction formulae (6.61) 6.3.3(4) [3]			0,674	0,672	0,3

На Рисунке 2.3.35 приведён ввод данных в программу для варианта с *сжатými* от изгиба внутренними поясами элемента. На Рисунках 2.3.36 и 2.3.37 представлены фрагменты

результатов работы программы с вычислением коэффициентов взаимодействия  $k_{ij}$  по Методу 1. На Рисунках 2.3.38 – 2.3.42 показаны результаты, передаваемые в Microsoft Excel®.

Сжатие с изгибом [EC3 CEN EC]

Наименование элемента:

Длина элемента L:  м

Расчётное осевое усилие сжатия  $N_{Ed}$ :  кН      Поперечная сила  $V_{Ed}$ :  кН

Момент для расчёта на устойчивость  $M_{bEd}$ :  кН·см

Момент для расчёта на прочность  $M_{sEd}$ :  кН·см       Выполнить проверку прочности

Вводить расчётные длины:       Вводить к-ты приведения длины:

Расчётная длина относительно оси у-у  $L_{cr,y}$ :  м      Коэф-т приведения  $k_y (L_{cr,y}/L)$ :

Расчётная длина относительно оси z-z  $L_{cr,z}$ :  м      Коэф-т приведения  $k_z (L_{cr,z}/L)$ :

Расчётная длина: крутильная форма  $L_{cr,T}$ :  м

Расчётная длина: плоская форма изгиба  $L_{cr,LT}$ :  м       Устойчивость плоской формы изгиба

Потеря устойчивости плоской формы изгиба

Закрепление на концах

Коэффициент закрепления концов от поворота из плоскости изгиба  $k$ :

Коэффициент закрепления опорных сечений от искажения  $k_w$ :

Коэффициент  $C_1$ :       Коэффициент  $C_2$ :

Уровень приложения нагрузки ...

Эпюра моментов ...

Предельная гибкость  $\lambda_u$ :

Ослабление

Выбрать ...

Сечение

Выбрать...

Сталь

Группа стандартов:

Стандарт:

Сталь:

$f_y$ :  Н/мм<sup>2</sup>       $f_u$ :  Н/мм<sup>2</sup>



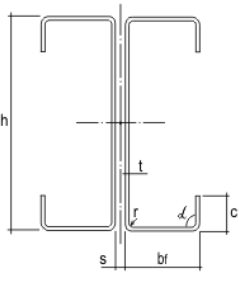
Комментарии

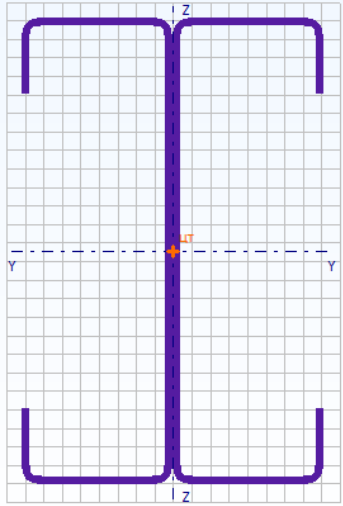
Рисунок 2.3.35 – Ввод данных (сжаты от изгиба внутренние пояса элемента)

**Результаты**

Общие данные | Характеристики полного сечения | Характеристики эффективного сечения | Характеристики эффективного сечения (изгиб) | Характеристики сечения нетто

**Верификационный расчёт Example L ECCS TC7**

Длина элемента	L	8,000 м
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_{Ed}$	40,00 кН
Расчётный изгибающий момент (расчёт на устойчивость)	$M_{bEd}$	3200,00 кН·см
Расчётный изгибающий момент (расчёт на прочность)	$M_{sEd}$	3200,00 кН·см
Расчётная длина относительно оси y - y	$L_{cr,y}$	8,000 м
Расчётная длина относительно оси z - z	$L_{cr,z}$	2,000 м
Расчётная длина: кручение	$L_{cr,T}$	4,000 м
Параметры для расчёта на устойчивость плоской формы изгиба		
Расчётная длина: устойчивость плоской формы изгиба	$L_{cr,LT}$	4,000 м
Коэффициент закрепления концов от поворота из плоскости изгиба	k	1
Коэффициент закрепления опорных сечений от искажения сечения	$k_w$	1
Коэффициент	$C_1$	1,879
Коэффициент	$C_2$	0,000
Уровень приложения поперечной нагрузки		
		
Вид эпюры моментов		
Предельная гибкость	$\lambda_u$	200,0
<b>Сечение</b>		
C 250x80x40x2,5		
ECCS L		
		
	h	250,0 мм
	t	2,5 мм
	b	80,0 мм
	c	40,0 мм
	r	5,0 мм
	$t_{coat}$	0,00 мм
	S	0,0 мм
<b>Ослабление сечения отверстиями</b>		
Стенка		
Диаметр отверстия	d	18,0 мм
	$a_1$	83,3 мм
	$a_2$	83,3 мм



Excel | Закрыть | Справка

Рисунок 2.3.36 - Результаты расчёта. Общие данные

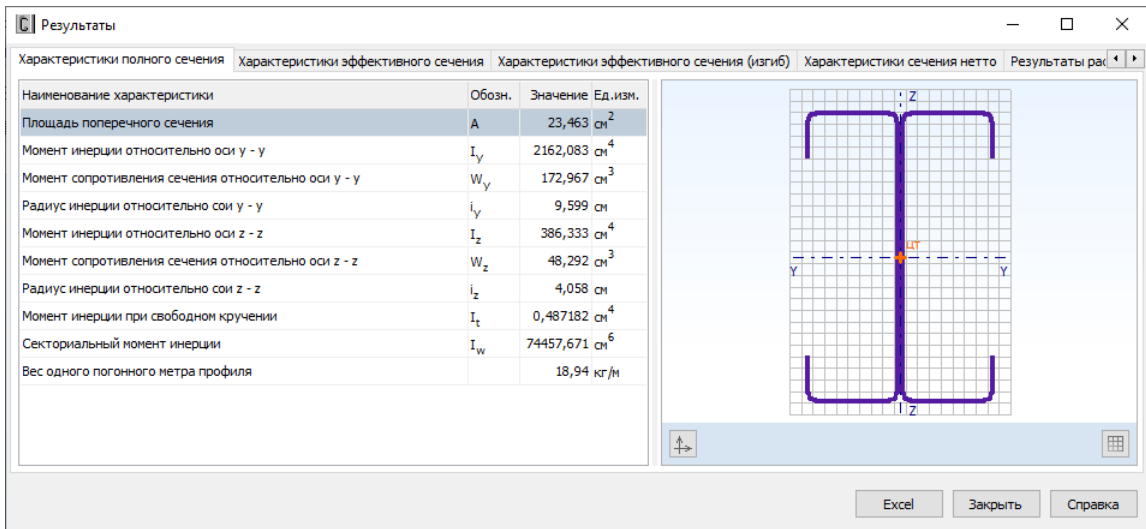


Рисунок 2.3.37 – Результаты расчёта. *Характеристики полного сечения*

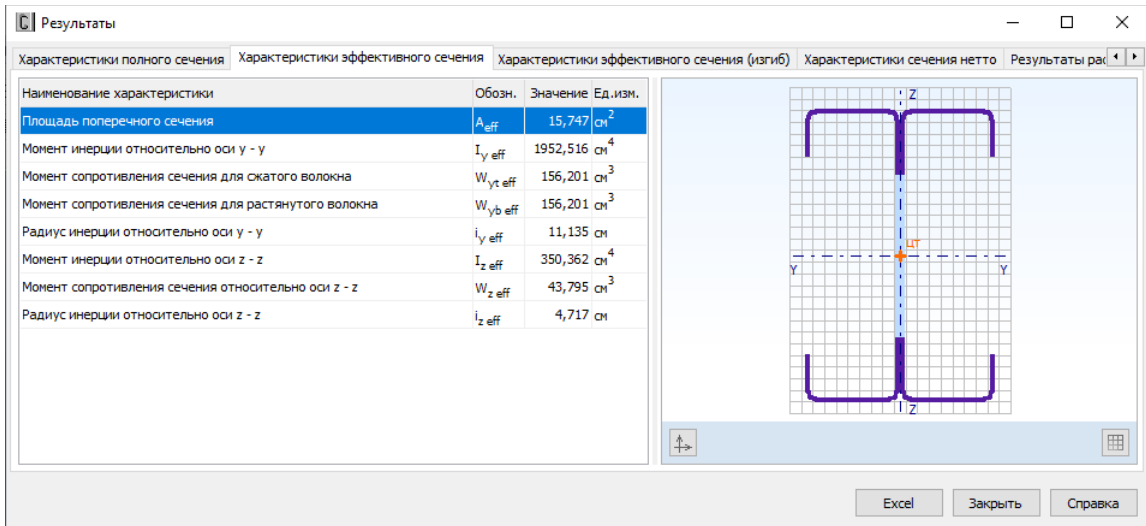


Рисунок 2.3.38 – Результаты расчёта. *Характеристики эффективного сечения (сжатие)*

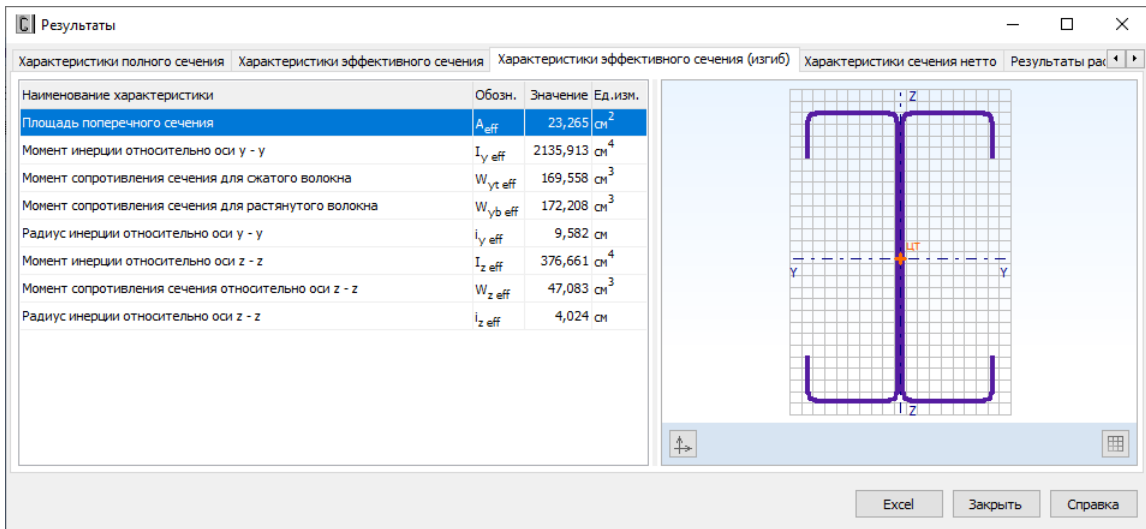


Рисунок 2.3.39 – Результаты расчёта. *Характеристики эффективного сечения (изгиб)*

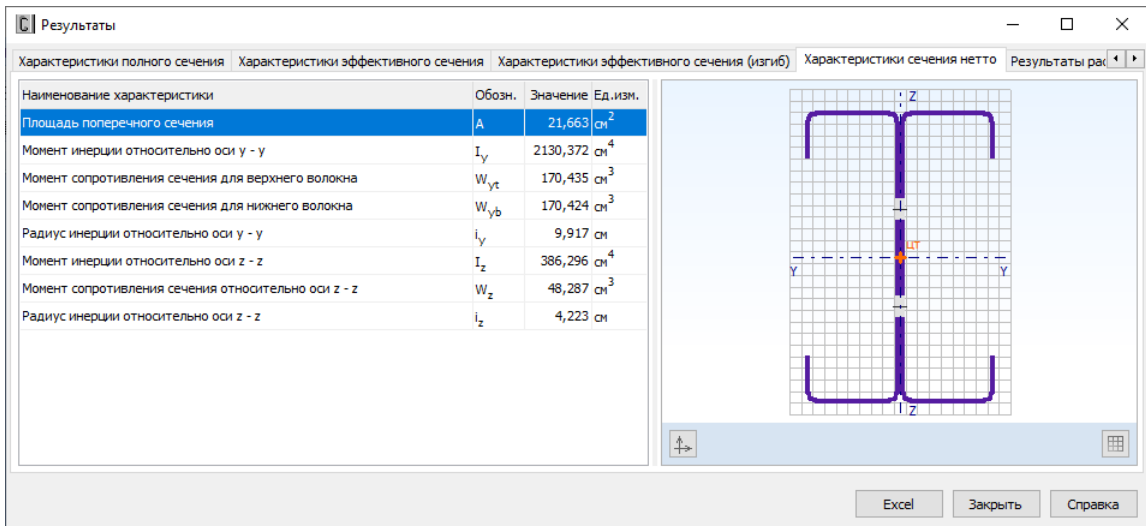


Рисунок 2.3.40 – Результаты расчёта. *Характеристики сечения нетто*



Результаты			
Характеристики эффективного сечения   Характеристики эффективного сечения (изгиб)   Характеристики сечения нетто   Результаты расчёта			
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd,net}} + \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{M_{c,Rd,net}} \leq 1$	0,737 < 1	✓ 6.1.9
Расчёт на поперечную силу	$V_{Ed}/N_{b,Rd} \leq 1$	0,081 < 1	✓ 6.1.5
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{yRk}/\gamma_{M1}} \leq 1$	0,759 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{yRk}/\gamma_{M1}} \leq 1$	0,753 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия	$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}}\right)^{0,5} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}}\right)^{0,5} \leq 1$	0,884 < 1	✓ 6.2.5
Проверка гибкости элемента	$\lambda_{max} \leq \lambda_u$	83,3 < 200	✓

Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_{Ed}$	40,00	кН	
Площадь сечения нетто	$A_n$	21,663	см <sup>2</sup>	
Предел текучести	$f_y$	350	Н/мм <sup>2</sup>	
Частный коэффициент	$\gamma_{M2}$	1,250		
Расчётная несущая способность сечения нетто при центральном сжатии	$N_{c,Rd,net}$	606,58	кН	
Расчётный изгибающий момент (расчёт на прочность)	$M_{s,Ed}$	3200,00	кН·см	
Несущая способность поперечного сечения нетто при изгибе	$M_{c,Rd,net}$	4771,88	кН·см	6.1.9

Excel    Закрыть    Справка

Результаты			
Характеристики эффективного сечения   Характеристики эффективного сечения (изгиб)   Характеристики сечения нетто   Результаты расчёта			
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd,net}} + \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{M_{c,Rd,net}} \leq 1$	0,737 < 1	✓ 6.1.9
Расчёт на поперечную силу	$V_{Ed}/N_{b,Rd} \leq 1$	0,081 < 1	✓ 6.1.5
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{yRk}/\gamma_{M1}} \leq 1$	0,759 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{yRk}/\gamma_{M1}} \leq 1$	0,753 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия	$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}}\right)^{0,5} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}}\right)^{0,5} \leq 1$	0,884 < 1	✓ 6.2.5
Проверка гибкости элемента	$\lambda_{max} \leq \lambda_u$	83,3 < 200	✓

Расчёт на поперечную силу				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчётная поперечная сила	$V_{Ed}$	12,00	кН	
Расчётная высота стенки	$s_w$	247,5	мм	6.1.5
Расчётная толщина	$t$	2,5	мм	
Условная гибкость стенки	$\bar{\lambda}_W$	1,398		6.1.5
Расчётное сопротивление стали сдвигу	$f_{bv}$	120	Н/мм <sup>2</sup>	6.1.5
Расчётная несущая способность сечения от действия поперечной силы	$V_{b,Rd}$	148,67	кН	(6.8)

Excel    Закрыть    Справка

Результаты			
Характеристики эффективного сечения		Характеристики сечения нетто	
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,red,net}} + \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{M_{c,red,net}} \leq 1$	0,737 < 1	✓ 6.1.9
Расчёт на поперечную силу	$V_{Ed}/N_{b,Rd} \leq 1$	0,081 < 1	✓ 6.1.5
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1$	0,759 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1$	0,753 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия	$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{p,red}}\right)^{0,5} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{p,red}}\right)^{0,5} \leq 1$	0,884 < 1	✓ 6.2.5
Проверка гибкости элемента	$\lambda_{max} \leq \lambda_u$	83,3 < 200	✓

Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_{Ed}$	40,00	кН	
Расчётный изгибающий момент	$M_{Ed}$	3200,00	кН·см	
Эксцентриситет	$e_N$	0,000	см	6.1.3
Геометрическая длина элемента	$L$	8,000	м	
Расчётная длина относительно оси y - y	$L_{cr,y}$	8,000	м	
Расчётная длина относительно оси z - z	$L_{cr,z}$	2,000	м	
Условная гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,887		
Условная гибкость относительно оси z - z	$\bar{\lambda}_z$	0,525		
Редукционный коэффициент при изгибной форме потери устойчивости	$\chi$	0,742		6.3.1 EN 1993-1-1
Площадь полного сечения	$A$	23,463	см <sup>2</sup>	
Площадь эффективного сечения (сжатие)	$A_{eff}$	15,747	см <sup>2</sup>	
Предел текучести	$f_y$	350	Н/мм <sup>2</sup>	
Частный коэффициент	$\gamma_{M1}$	1,000		
Нормативное значение сопротивления сжатию	$N_{Rk}$	551,14	кН	
Редукционный коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,802		6.3.2 EN 1993-1-1
Расчётный момент сопротивления сечения	$W$	169,558	см <sup>3</sup>	
Нормативное значение сопротивления изгибающему моменту	$M_{Rk}$	5934,53	кН·см	
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1		
Коэффициент взаимодействия	$k$	0,984		Annex A EN 1993-1-1

Excel    Закрыть    Справка

Результаты							
Характеристики эффективного сечения		Характеристики эффективного сечения (изгиб)		Характеристики сечения нетто		Результаты расчёта	
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) EN 1993-1-3				
Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,red,net}} + \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{M_{c,red,net}} \leq 1$	0,737 < 1	✓ 6.1.9				
Расчёт на поперечную силу	$V_{Ed}/N_{b,Rd} \leq 1$	0,081 < 1	✓ 6.1.5				
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1$	0,759 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1				
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1$	0,753 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1				
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия	$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{p,red}}\right)^{0,5} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{p,red}}\right)^{0,5} \leq 1$	0,884 < 1	✓ 6.2.5				
Проверка гибкости элемента	$\lambda_{max} \leq \lambda_u$	83,3 < 200	✓				
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)</b>							
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3			
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_{Ed}$	40,00	кН				
Расчётный изгибающий момент	$M_{Ed}$	3200,00	кН·см				
Эксцентриситет	$e_N$	0,000	см	6.1.3			
Геометрическая длина элемента	$L$	8,000	м				
Расчётная длина относительно оси y - y	$L_{cr,y}$	8,000	м				
Расчётная длина относительно оси z - z	$L_{cr,z}$	2,000	м				
Условная гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,887					
Условная гибкость относительно оси z - z	$\bar{\lambda}_z$	0,525					
Редукционный коэффициент при изгибной форме потери устойчивости	$\chi$	0,873		6.3.1 EN 1993-1-1			
Площадь полного сечения	$A$	23,463	см <sup>2</sup>				
Площадь эффективного сечения (сжатие)	$A_{eff}$	15,747	см <sup>2</sup>				
Предел текучести	$f_y$	350	Н/мм <sup>2</sup>				
Частный коэффициент	$\gamma_{M1}$	1,000					
Нормативное значение сопротивления сжатию	$N_{Rk}$	551,14	кН				
Редукционный коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,802		6.3.2 EN 1993-1-1			
Расчётный момент сопротивления сечения	$W$	169,558	см <sup>3</sup>				
Нормативное значение сопротивления изгибающему моменту	$M_{Rk}$	5934,53	кН·см				
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1					
Коэффициент взаимодействия	$k$	0,996		Annex A EN 1993-1-1			
		Excel	Закрывать	Справка			

Результаты			
Характеристики эффективного сечения		Характеристики сечения нетто	
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd,net}} + \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{M_{c,Rd,net}} \leq 1$	0,737 < 1	✓ 6.1.9
Расчёт на поперечную силу	$V_{Ed}/N_{b,Rd} \leq 1$	0,081 < 1	✓ 6.1.5
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1$	0,759 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1$	0,753 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия	$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}}\right)^{0,5} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}}\right)^{0,5} \leq 1$	0,884 < 1	✓ 6.2.5
Проверка гибкости элемента	$\lambda_{max} \leq \lambda_u$	83,3 < 200	✓

Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (п.6.2.5)				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_{Ed}$	40,00	кН	
Расчётный изгибающий момент	$M_{Ed}$	3200,00	кН·см	
Эксцентриситет	$e_N$	0,000	см	
Геометрическая длина элемента	$L$	8,000	м	
Расчётная длина относительно оси y - y	$L_{cr,y}$	8,000	м	
Расчётная длина относительно оси z - z	$L_{cr,z}$	2,000	м	
Условная гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,887		
Условная гибкость относительно оси z - z	$\bar{\lambda}_z$	0,525		
Предел текучести	$f_y$	350	Н/мм <sup>2</sup>	
Частный коэффициент	$\gamma_{M1}$	1,000		
Расчётная несущая способность по изгибной форме потери устойчивости относительно оси y - y	$N_{yb,Rd}$	409,11	кН	
Расчётная несущая способность по изгибной форме потери устойчивости относительно оси z - z	$N_{zb,Rd}$	481,20	кН	
Расчётная несущая способность по крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{bTF,Rd}$	408,64	кН	
Расчётная несущая способность сжатого элемента (по изгибной, крутильной или изгибно-крутильной форме поте	$N_{b,Rd}$	408,64	кН	6.2.5
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	13318,17	кН·см	
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,668		
Редукционный коэффициент	$\chi_{LT}$	0,802		6.3.2 EN 1993-1-1
Расчётный момент сопротивления сечения	$W$	169,558	см <sup>3</sup>	
Расчётная несущая способность элемента при изгибе	$M_{b,Rd}$	4757,86	кН·см	6.2.4 EN 1993-1-3, 6.3.2 EN 1993-1-1

Рисунок 2.3.41 - Результаты расчёта. *Результаты проверок*




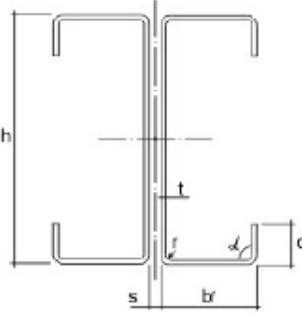
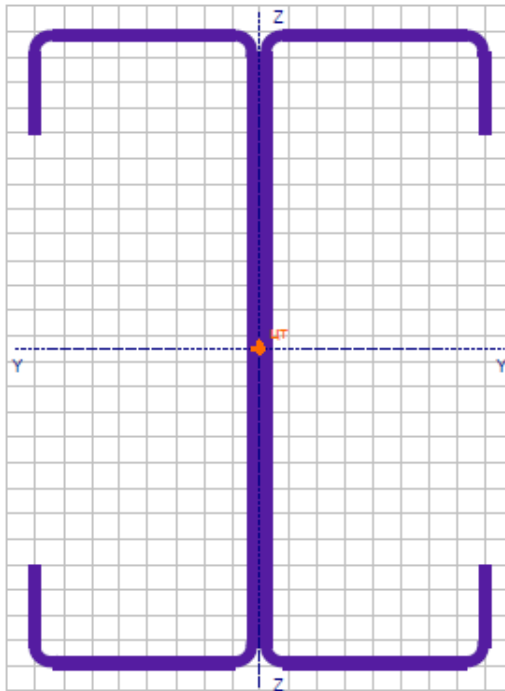
 Delta Engineering Software <a href="http://www.CFSteel.ru">http://www.CFSteel.ru</a> <a href="mailto:deltaing@mail.ru">mailto:deltaing@mail.ru</a>	CFSteel 4.3		страница 1
	User		
	EC3 CEN EC	12.01.2022	
<b>Верификационный расчёт Example L ECCS TC7</b>			
Длина элемента	L	8,000 м	
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_{Ed}$	40,00 кН	
Расчётный изгибающий момент (расчёт на устойчивость)	$M_{bEd}$	3200,00 кН·см	
Расчётный изгибающий момент (расчёт на прочность)	$M_{sEd}$	3200,00 кН·см	
Расчётная длина относительно оси y - y	$L_{cr,y}$	8,000 м	
Расчётная длина относительно оси z - z	$L_{cr,z}$	2,000 м	
Расчётная длина: кручение	$L_{cr,T}$	4,000 м	
Параметры для расчёта на устойчивость плоской формы изгиба			
Расчётная длина: устойчивость плоской формы изгиба	$L_{cr,LT}$	4,000 м	
Коэффициент закрепления концов от поворота из плоскости изгиба	k	1	
Коэффициент закрепления опорных сечений от искажения сечения	$k_w$	1	
Коэффициент	$C_1$	1,879	
Коэффициент	$C_2$	0,000	
Уровень приложения поперечной нагрузки			
Вид эпюры моментов			
Предельная гибкость	$\lambda_d$	200,0	
<b>Сечение</b>			
C 250x80x40x2,5			
ECCS L			
	h	250,0 мм	
	t	2,5 мм	
	b	80,0 мм	
	c	40,0 мм	
	r	5,0 мм	
	$t_{coat}$	0,00 мм	
	S	0,0 мм	
<b>Ослабление сечения отверстиями</b>			
Стенка			
Диаметр отверстия	d	18,0 мм	
	$a_1$	83,3 мм	
	$a_2$	83,3 мм	
<b>Сталь</b>			
Группа стандартов	EN		
Стандарт	EN 10147		
Сталь	S350GD		
Предел текучести	$f_y$	350 Н/мм <sup>2</sup>	
Предел прочности	$f_u$	420 Н/мм <sup>2</sup>	
Модуль упругости	E	210000 Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент Пуассона	$\nu$	0,3	

Рисунок 2.3.42 – Результаты расчёта в Excel. Исходные данные



Верификационный расчёт Example L ECCS TC7

C 250x80x40x2,5 ECCS L



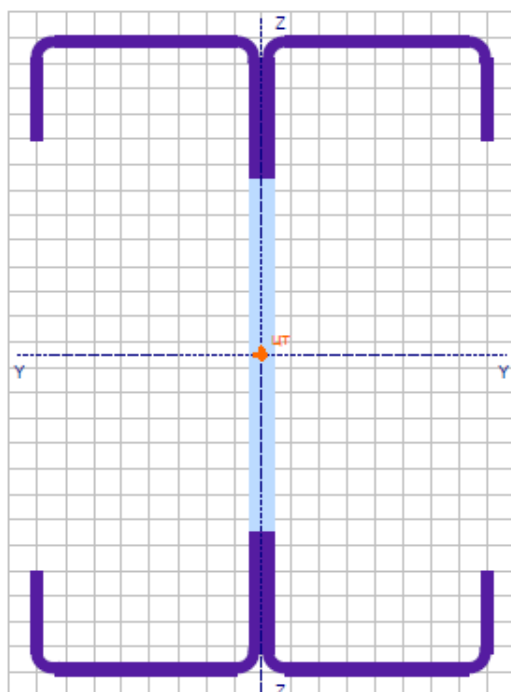
Наименование характеристики	Обозн.	Значение Ед.изм.
Площадь поперечного сечения	A	23,463 см <sup>2</sup>
Момент инерции относительно оси y - y	I <sub>y</sub>	2162,083 см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения относительно оси y - y	W <sub>y</sub>	172,967 см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси y - y	i <sub>y</sub>	9,599 см
Момент инерции относительно оси z - z	I <sub>z</sub>	386,333 см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения относительно оси z - z	W <sub>z</sub>	48,292 см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси z - z	i <sub>z</sub>	4,058 см
Момент инерции при свободном кручении	I <sub>t</sub>	0,487182 см <sup>4</sup>
Секториальный момент инерции	I <sub>w</sub>	74457,671 см <sup>6</sup>
Вес одного погонного метра профиля		18,94 кг/м

Рисунок 2.3.43 – Результаты расчёта в Excel.  
 Геометрические характеристики полного сечения



Верификационный расчёт Example L ECCS TC7

C 250x80x40x2,5 ECCS L



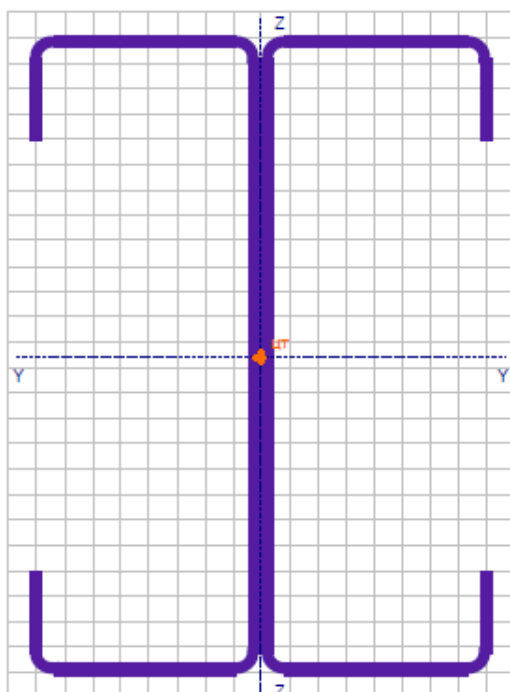
Наименование характеристики	Обозн.	Значение Ед.изм.
Площадь поперечного сечения	$A_{eff}$	15,747 см <sup>2</sup>
Момент инерции относительно оси y - y	$I_{y\,eff}$	1952,516 см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения для сжатого волокна	$W_{yt\,eff}$	156,201 см <sup>3</sup>
Момент сопротивления сечения для растянутого волокна	$W_{yb\,eff}$	156,201 см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси y - y	$i_{y\,eff}$	11,135 см
Момент инерции относительно оси z - z	$I_{z\,eff}$	350,362 см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения относительно оси z - z	$W_{z\,eff}$	43,795 см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси z - z	$i_{z\,eff}$	4,717 см

Рисунок 2.3.44 – Результаты расчёта в Excel. Геометрические характеристики эффективного сечения (сжатие)



Верификационный расчёт Example L ECCS TC7


C 250x80x40x2,5 ECCS L



Наименование характеристики	Обозн.	Значение Ед.изм.
Площадь поперечного сечения	$A_{eff}$	23,265 см <sup>2</sup>
Момент инерции относительно оси y - y	$I_{y\,eff}$	2135,913 см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения для сжатого волокна	$W_{yt\,eff}$	169,558 см <sup>3</sup>
Момент сопротивления сечения для растянутого волокна	$W_{yo\,eff}$	172,208 см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси y - y	$i_{y\,eff}$	9,582 см
Момент инерции относительно оси z - z	$I_{z\,eff}$	376,661 см <sup>4</sup>
Момент сопротивления сечения относительно оси z - z	$W_{z\,eff}$	47,083 см <sup>3</sup>
Радиус инерции относительно оси z - z	$i_{z\,eff}$	4,024 см

Рисунок 2.3.45 – Результаты расчёта в Excel. Геометрические характеристики эффективного сечения (изгиб)



	<b>Delta Engineering Software</b>	<b>CFSteel 4.3</b>	страница 6	
	http://www.CFSteel.ru	User		
	mailto:deltaing@mail.ru	EC3 CEN EC	12.01.2022	

**Верификационный расчёт Example L ECSS TC7**

Проверка	Расчётное неравенство	Значение		Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd,net}} + \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{M_{c,Rd,net}} \leq 1$	0,737 < 1	✓	6.1.9
Расчёт на поперечную силу	$V_{Ed}/V_{d,Rd} \leq 1$	0,081 < 1	✓	6.1.5
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_{y1} N_{Rk1} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{yRk1} / \gamma_{M1}} \leq 1$	0,759 < 1	✓	6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_x N_{Rk1} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{yRk1} / \gamma_{M1}} \leq 1$	0,753 < 1	✓	6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия	$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{R,Rd}}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{R,Rd}}\right)^{0,2} \leq 1$	0,884 < 1	✓	6.2.5
Проверка гибкости элемента	$\lambda_{max} \leq \lambda_U$	83,3 < 200	✓	

**Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом**

Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_{Ed}$	40,00	кН	
Площадь сечения нетто	$A_n$	21,663	см <sup>2</sup>	
Предел текучести	$f_y$	350	Н/мм <sup>2</sup>	
Частный коэффициент	$\gamma_{M2}$	1,250		
Расчётная несущая способность сечения нетто при центральном сжатии	$N_{c,Rd,net}$	606,58	кН	
Расчётный изгибающий момент (расчёт на прочность)	$M_{z,Ed}$	3200,00	кН·см	
Несущая способность поперечного сечения нетто при изгибе	$M_{c,Rd,net}$	4771,88	кН·см	6.1.9

**Расчёт на поперечную силу**

Рисунок 2.3.46,а – Результаты расчёта в Excel. Проверки (начало)

Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчётная поперечная сила	$V_{Ed}$	12,00 кН		
Расчётная высота стенки	$s_w$	247,5 мм		6.1.5
Расчётная толщина	$t$	2,5 мм		
Условная гибкость стенки	$\bar{\lambda}_w$	1,398		6.1.5
Расчётное сопротивление стали сдвигу	$f_{bv}$	120 Н/мм <sup>2</sup>		6.1.5
Расчётная несущая способность сечения от действия поперечной силы	$V_{b,Rd}$	148,67 кН		(6.8)
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)</b>				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_{Ed}$	40,00 кН		
Расчётный изгибающий момент	$M_{Ed}$	3200,00 кН·см		
Эксцентриситет	$e_N$	0,000 см		6.1.3
Геометрическая длина элемента	$L$	8,000 м		
Расчётная длина относительно оси y - y	$L_{cr,y}$	8,000 м		
Расчётная длина относительно оси z - z	$L_{cr,z}$	2,000 м		
Условная гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,887		
Условная гибкость относительно оси z - z	$\bar{\lambda}_z$	0,525		
Редукционный коэффициент при изгибной форме потери устойчивости	$\chi$	0,742		6.3.1 EN 1993-1-1
Площадь полного сечения	$A$	23,463 см <sup>2</sup>		
Площадь эффективного сечения (сжатие)	$A_{eff}$	15,747 см <sup>2</sup>		
Предел текучести	$f_y$	350 Н/мм <sup>2</sup>		
Частный коэффициент	$\gamma_{M1}$	1,000		
Нормативное значение сопротивления сжатию	$N_{Rk}$	551,14 кН		
Редукционный коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,802		6.3.2 EN 1993-1-1
Расчётный момент сопротивления сечения	$W$	169,558 см <sup>3</sup>		

Рисунок 2.3.46,б – Результаты расчёта в Excel. Проверки (продолжение)

Нормативное значение сопротивления изгибающему моменту	$M_{Rk}$	5934,53 кН·см		
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1		
Коэффициент взаимодействия	$k$	0,984		Annex A EN 1993-1-1
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)</b>				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_{Ed}$	40,00 кН		
Расчётный изгибающий момент	$M_{Ed}$	3200,00 кН·см		
Эксцентриситет	$e_N$	0,000 см		6.1.3
Геометрическая длина элемента	$L$	8,000 м		
Расчётная длина относительно оси $y - y$	$L_{cr,y}$	8,000 м		
Расчётная длина относительно оси $z - z$	$L_{cr,z}$	2,000 м		
Условная гибкость относительно оси $y - y$	$\lambda_y$	0,887		
Условная гибкость относительно оси $z - z$	$\lambda_z$	0,525		
Редукционный коэффициент при изгибной форме потери устойчивости	$\chi$	0,873		6.3.1 EN 1993-1-1
Площадь полного сечения	$A$	23,463 см <sup>2</sup>		
Площадь эффективного сечения (сжатие)	$A_{eff}$	15,747 см <sup>2</sup>		
Предел текучести	$f_y$	350 Н/мм <sup>2</sup>		
Частный коэффициент	$\gamma_{M1}$	1,000		
Нормативное значение сопротивления сжатию	$N_{Rk}$	551,14 кН		
Редукционный коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,802		6.3.2 EN 1993-1-1
Расчётный момент сопротивления сечения	$W$	169,558 см <sup>3</sup>		
Нормативное значение сопротивления изгибающему моменту	$M_{Rk}$	5934,53 кН·см		

Рисунок 2.3.46,в – Результаты расчёта в Excel. Проверки (продолжение)

Метод определения коэффициентов взаимодействия		1		
Коэффициент взаимодействия	k	0,996		Annex A EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (п.6.2.5)				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_{Ed}$	40,00 кН		
Расчётный изгибающий момент	$M_{Ed}$	3200,00 кН·см		
Эксцентриситет	$e_N$	0,000 см		
Геометрическая длина элемента	L	8,000 м		
Расчётная длина относительно оси y - y	$L_{cr,y}$	8,000 м		
Расчётная длина относительно оси z - z	$L_{cr,z}$	2,000 м		
Условная гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,887		
Условная гибкость относительно оси z - z	$\bar{\lambda}_z$	0,525		
Предел текучести	$f_y$	350 Н/мм <sup>2</sup>		
Частный коэффициент	$\gamma_{M1}$	1,000		
Расчётная несущая способность по изгибной форме потери устойчивости относительно оси y - y	$N_{y0,Rd}$	409,11 кН		
Расчётная несущая способность по изгибной форме потери устойчивости относительно оси z - z	$N_{z0,Rd}$	481,20 кН		
Расчётная несущая способность по	$N_{DTF,Rd}$	408,64 кН		
Расчётная несущая способность сжатого элемента (по изгибной, крутильной или изгибно-крутильной форме потери устойчивости)	$N_{b,Rd}$	408,64 кН		6.2.5
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	13318,17 кН·см		

Рисунок 2.3.46,г – Результаты расчёта в Excel. Проверки (продолжение)

## Элементы

Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,668	
Редукционный коэффициент	$\chi_{LT}$	0,802	6.3.2 EN 1993-1-1
Расчётный момент сопротивления сечения	$W$	169,558 см <sup>3</sup>	
Расчётная несущая способность элемента при изгибе	$M_{b,Rd}$	4757,86 кН·см	6.2.4 EN 1993-1-3, 6.3.2 EN 1993-1-1

Проверка гибкости элемента				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Максимальная гибкость	$\lambda_{max}$	83,3		
Предельная гибкость	$\lambda_u$	200,0		

Рисунок 2.3.46,д – Результаты расчёта в Excel. Проверки (окончание)

На Рисунках 2.3.47 и 2.3.48 приведён ввод данных в программу для варианта с *сжатыми от изгиба наружными поясами* элемента и вычислением коэффициентов взаимодействия  $k_{ij}$  по Методу 2. На Рисунке 2.3.49 представлен фрагмент результатов расчёта: *Общие данные*. На Рисунках 2.3.50 и 2.3.51 представлены фрагменты результатов проверок по формулам (6.61) и (6.62) [3].

Сжатие с изгибом [EC3 CEN EC]

Наименование элемента: Верификационный расчёт Example L ECCS TC7

Длина элемента: L = 8 м

Расчётное осевое усилие сжатия:  $N_{Ed}$  = 40 кН    Поперечная сила:  $V_{Ed}$  = 12 кН

Момент для расчёта на устойчивость:  $M_{bEd}$  = 3200 кН·см

Момент для расчёта на прочность:  $M_{sEd}$  = 3200 кН·см     Выполнить проверку прочности

Вводить расчётные длины:     Вводить к-ты приведения длины:

Расчётная длина относительно оси y - y:  $L_{cr,y}$  = 8 м    Коэф-т приведения  $k_y (L_{cr,y} / L)$  = 1

Расчётная длина относительно оси z - z:  $L_{cr,z}$  = 2 м    Коэф-т приведения  $k_z (L_{cr,z} / L)$  = 1

Расчётная длина: крутильная форма:  $L_{cr,T}$  = 4 м

Расчётная длина: плоская форма изгиба:  $L_{cr,LT}$  = 2 м     Устойчивость плоской формы изгиба

Потеря устойчивости плоской формы изгиба

Закрепление на концах

Коэффициент закрепления концов от поворота из плоскости изгиба:  $k$  = 1

Коэффициент закрепления опорных сечений от искажения:  $k_w$  = 1

Коэффициент  $C_1$  = 1,14    Коэффициент  $C_2$  = 0

Уровень приложения нагрузки ..

Эпюра моментов ... Эпюра моментов ...

Предельная гибкость:  $\lambda_u$  = 200

Ослабление

Выбрать ... d = 18 мм     $a_1$  = 83,3 мм     $a_2$  = 83,3 мм

Сечение

Выбрать... C 250x80x40x2,5 ECCS L

Сталь

Группа стандартов: EN

Стандарт: EN 10147

Сталь: S350GD

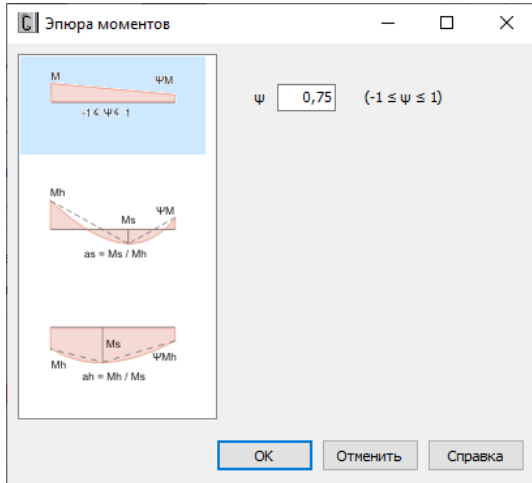
$f_y$  = 350 Н/мм<sup>2</sup>     $f_u$  = 420 Н/мм<sup>2</sup>

Комментарии

Вычислить    Закрывать    Справка

Рисунок 2.3.47 – Ввод исходных данных: сжаты от изгиба наружные пояса элемента (вычисление коэффициентов взаимодействия  $k_{ij}$  по Методу 2)

а)



б)

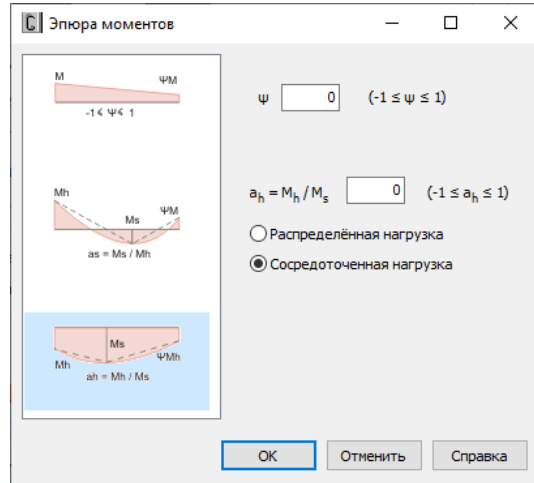


Рисунок 2.3.48 - Ввод данных для вычисления коэффициентов: а) –  $C_{m,x}$ ; б) –  $C_{m,LT}$

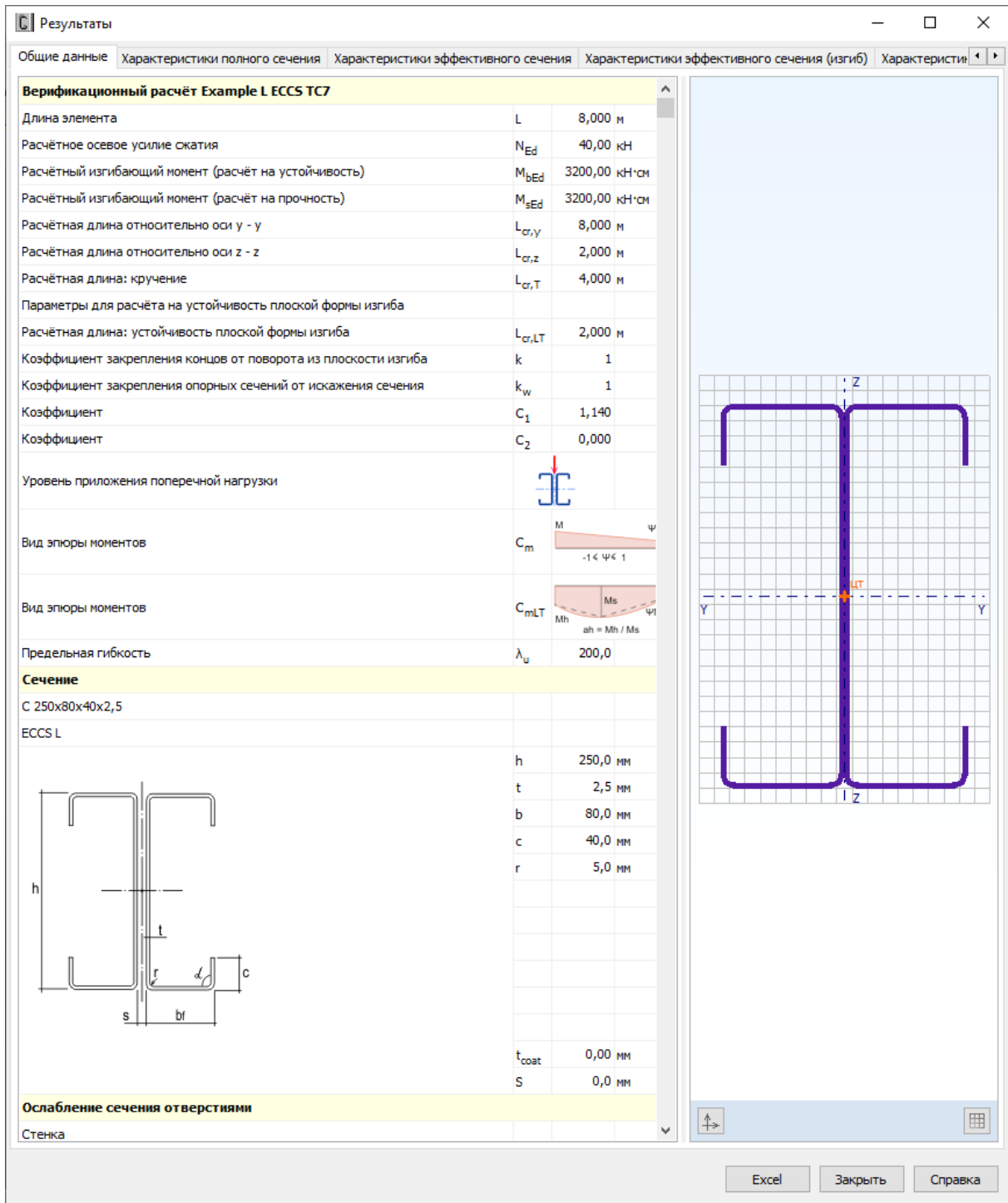


Рисунок 2.3.49 – Результаты расчёта. *Общие данные*  
 (сжаты от изгиба наружные пояса элемента,  
 вычисление коэффициентов взаимодействия  $k_{ij}$  по Методу 2)

Результаты			
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) E
Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd,net}} + \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{M_{c,Rd,net}} \leq 1$	0,737 < 1	✓ 6.1.9
Расчёт на поперечную силу	$V_{Ed}/N_{b,Rd} \leq 1$	0,081 < 1	✓ 6.1.5
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)	$\frac{N_{Ed}}{X_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{X_{LT} M_{yRk}/\gamma_{M1}} \leq 1$	0,657 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)	$\frac{N_{Ed}}{X_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{X_{LT} M_{yRk}/\gamma_{M1}} \leq 1$	0,672 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия	$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}}\right)^{0,5} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}}\right)^{0,5} \leq 1$	0,812 < 1	✓ 6.2.5
Проверка гибкости элемента	$\lambda_{max} \leq \lambda_u$	83,3 < 200	✓

Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_{Ed}$	40,00	кН	
Расчётный изгибающий момент	$M_{Ed}$	3200,00	кН·см	
Эксцентриситет	$e_N$	0,000	см	6.1.3
Геометрическая длина элемента	$L$	8,000	м	
Расчётная длина относительно оси y - y	$L_{cr,y}$	8,000	м	
Расчётная длина относительно оси z - z	$L_{cr,z}$	2,000	м	
Условная гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,887		
Условная гибкость относительно оси z - z	$\bar{\lambda}_z$	0,525		
Редукционный коэффициент при изгибной форме потери устойчивости	$\chi$	0,742		6.3.1 EN 1993-1-1
Площадь полного сечения	$A$	23,463	см <sup>2</sup>	
Площадь эффективного сечения (сжатие)	$A_{eff}$	15,747	см <sup>2</sup>	
Предел текучести	$f_y$	350	Н/мм <sup>2</sup>	
Частный коэффициент	$\gamma_{M1}$	1,000		
Нормативное значение сопротивления сжатию	$N_{Rk}$	551,14	кН	
Редукционный коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,913		6.3.2 EN 1993-1-1
Расчётный момент сопротивления сечения	$W$	169,558	см <sup>3</sup>	
Нормативное значение сопротивления изгибающему моменту	$M_{Rk}$	5934,53	кН·см	
Метод определения коэффициентов взаимодействия		2		
Коэффициент взаимодействия	$k$	0,947		Annex A EN 1993-1-1

Рисунок 2.3.50 – Результаты расчёта. Результаты проверки по формуле (6.61) [3] (вычисление коэффициентов взаимодействия  $k_{ij}$  по Методу 2)



Результаты			
Проверка	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) E
Расчёт на прочность сечения нетто при сжатии с изгибом	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd,net}} + \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{M_{c,Rd,net}} \leq 1$	0,737 < 1	✓ 6.1.9
Расчёт на поперечную силу	$V_{Ed}/N_{b,Rd} \leq 1$	0,081 < 1	✓ 6.1.5
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{yRk}/\gamma_{M1}} \leq 1$	0,657 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{yRk}/\gamma_{M1}} \leq 1$	0,672 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия	$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}}\right)^{0,8} \leq 1$	0,812 < 1	✓ 6.2.5
Проверка гибкости элемента	$\lambda_{max} \leq \lambda_u$	83,3 < 200	✓

Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)				
Параметр	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_{Ed}$	40,00	кН	
Расчётный изгибающий момент	$M_{Ed}$	3200,00	кН·см	
Эксцентриситет	$e_N$	0,000	см	6.1.3
Геометрическая длина элемента	$L$	8,000	м	
Расчётная длина относительно оси y - y	$L_{cr,y}$	8,000	м	
Расчётная длина относительно оси z - z	$L_{cr,z}$	2,000	м	
Условная гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,887		
Условная гибкость относительно оси z - z	$\bar{\lambda}_z$	0,525		
Редукционный коэффициент при изгибной форме потери устойчивости	$\chi$	0,873		6.3.1 EN 1993-1-1
Площадь полного сечения	$A$	23,463	см <sup>2</sup>	
Площадь эффективного сечения (сжатие)	$A_{eff}$	15,747	см <sup>2</sup>	
Предел текучести	$f_y$	350	Н/мм <sup>2</sup>	
Частный коэффициент	$\gamma_{M1}$	1,000		
Нормативное значение сопротивления сжатию	$N_{Rk}$	551,14	кН	
Редукционный коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,913		6.3.2 EN 1993-1-1
Расчётный момент сопротивления сечения	$W$	169,558	см <sup>3</sup>	
Нормативное значение сопротивления изгибающему моменту	$M_{Rk}$	5934,53	кН·см	
Метод определения коэффициентов взаимодействия		2		
Коэффициент взаимодействия	$k$	0,997		Annex A EN 1993-1-1

Рисунок 2.3.51 – Результаты расчёта. Результаты проверки по формуле (6.62) [3] (вычисление коэффициентов взаимодействия  $k_{ij}$  по Методу 2)

# ЛИТЕРАТУРА

1. СП 260.1325800.2016: Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов (с изм. 1 и 2) / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации.– 2016.- 115 с.
2. СП 16.13330.2017: Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\* / Минрегион России.– 2017.- 145 с.
3. EN 1993-1-1:2005 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings / European Committee for Standardization CEN, Brussels, 2005
4. EN 1993-1-3:2004 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting / European Committee for Standardization CEN, Brussels, 2004
5. EN 1993-1-8:2005 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-8: Design of joints / European Committee for Standardization CEN, Brussels, 2005
6. AISC 360-15 Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC, 2015
7. AISI S100-2016 North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, AISI, 2016
8. Commentary on North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, AISI, 2001
9. Рекомендации по проектированию работающих на сдвиг болтовых соединений стальных строительных конструкций / ВНИПИ Промстальконструкция, ЦНИИПроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова, М., 1990, 17 с.
10. Worked Examples According to EN 1993-1-3 Eurocode 3, Part 1.3 / ECCS TC 7, № 123, 2008.- 235 p.
11. Dubina D., Ungureanu V., Landolfo R. Design of Cold-formed Steel Structures / ECCS, 2012.- 654 p.
12. CFSteel v.4.3. Документация. Том I. Руководство пользователя 2022, [Электронный ресурс]. Систем. Требования: Adobe Acrobat Reader, URL: <http://www.cfsteel.ru>
13. Wu, Y., Kulak. G.L. Shear lag in bolted single and double angle tension members / Y. Wu, G.L. Kulak // Structural Engineering Report No.187, June 1993
14. Kulak, G.L., Wu, E.Y. Shear lag in bolted angle tension members / G.L. Kulak, E.Y. Wu // Journal of Structural Engineering, ASCE, 123(9), 1997, pp. 1144-1152
15. Pan, C.L. Prediction of the bolted cold-formed channel sections in tension
16. Teh, L. H., Gilbert, B.P. Net section capacity of cold-reduced sheet steel channel braces bolted at the web / L. H. Teh, B.P. Gilbert // Journal of Structural Engineering, ASCE, 2013, pp. 740-747
17. Bolandim, E.A., Beck, A.T., Malite, M. Bolted connections in cold-formed steel: reliability analysis for rupture in net section / E.A. Bolandim, A.T. Beck, M. Malite // Journal of Structural Engineering, ASCE, 2013, pp. 748-756
18. Ведяков, И.И., Одесский, П.Д., Соловьёв, Д.В. Несущая способность болтовых соединений лёгких конструкций из холодногнутых профилей малых толщин / И.И. Ведяков, П.Д. Одесский, Д.В.Соловьёв // Промышленное и гражданское строительство, 2010.- №3.- С.19-22
19. Maiola, C.H., Malite, M., Gocalves, R. M., Neto, J.M. Structural behavior of bolted connections in cold-formed steel members, emphasizing the shear lag effect / C.H. Maiola, M. Malite, R. M. Gocalves, J.M. Neto // Sixteenth International Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orlando, Florida USA, October 17-18, 2002

20. Panyanouvong M. Bearing strength of cold formed steel bolted connections in truss/thesis for the degree of master of science, University of North Texas, May 2012, 109 p.
21. Wallace J.A., Shuster R.M., LaBoube R.A. Testing of Bolted Cold-Formed Steel Connections in Dearing (With and without Washers). Final Report //Canadian Cold Formed Research Group Department of Civil Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Canada, March, 2001, 33 p
22. EN 1993-1-5:2003 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-5: Plated structures elements / European Committee for Standardisation CEN, Brussels, 2003
23. Heinisuo, M., Kukkonen, J. Design of Cold-Formed Members Following New EN 1993-1-3 / Tampere University of Technology, - 2005,- 21 p.
24. SX022a-EN-EU Calculation of effective section properties for a cold-formed lipped channel section in bending: Calculation sheet / Access steel, 2005, 8 p.
25. Young B., Rasmussen K.J.R. Design of lipped channel columns // Journal of Structural Engineering, Vol.124, No.2, 1998, pp.140-148.
26. Rules for member stability in EN 1993-1-1. Background documentation and design guidelines / European convention for constructional steelwork, ECCS Technical Committee 8 – Stability, № 119, 2006.- 259 p.
27. BlueScope Steel Limited. LYSAGHT Zeds and Cees. User's guide for design and installation professionals, Part 1, 2014
28. Lightweight purlins. Technical Manual /Ruukki, [www.ruukki.com](http://www.ruukki.com), 35 p.
29. Kształtowniki typu Z, C, Σ // Blachy Pruszyński, [www.pruszyński.com.pl](http://www.pruszyński.com.pl), 204 p.
30. SSMA: Steel Stud Manufactures Association. Product Technical Guide, 2014, 72 p.
31. Wei-Wen Yu, LaBoube R.A. Cold-formed steel design // John Wiley & Sons, Inc., Fourth edition, 2010, 491 p.
32. Rules for member stability in EN 1993-1-1. Background documentation and design guidelines / European convention for constructional steelwork, ECCS Technical Committee 8 – Stability, № 119, 2006.- 259 p.