

УДК 624.012.45.04

**ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ ЛЕГКОГО ТОНКОСТЕННОГО ХОЛОДНОГНУТОГО СТЕРЖНЯ
ПРИ ЦЕНТРАЛЬНОМ СЖАТИИ С УЧЕТОМ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ
В ВИДЕ ИСКАЖЕНИЯ СЕЧЕНИЯ****Р.В. КИБИСОВ, В.И. НАУМЕНКО***(Представлено: канд. техн. наук, доц. В.Н. КИСЕЛЁВ)*

Сравнение жесткого и нежесткого C-образных профилей, для определения более выгодного сечения с целью экономии материалов. Методика расчета сечений. Сравнение результатов. Анализ влияния элемента жесткости на стенке профиля на его несущую способность.

Введение. Локальная форма потери устойчивости стенки и/или полки профиля не приводит к исчерпанию несущей способности конструктивного элемента. После потери устойчивости по этой форме профиль продолжает нести возрастающую нагрузку, хотя и с меньшей жесткостью.

Учитывая это обстоятельство, было решено рассмотреть вопрос оптимизации сечений тонкостенных профилей с учетом потери устойчивости в виде искажения сечения. В основу оптимизации положено отыскание максимальных напряжений при потере устойчивости в виде искажения сечения и соответствующих им параметров сечения профиля.

Методика ТКП ЕН 1993-1-1; 1-3; 1-5, основывающаяся на теории закритической работы пластин, применима для расчета на внецентренное сжатие сечений простой формы без элементов жесткости на полках и стенках. При наличии в сечении элементов жесткости трудоемкость расчета значительно возрастает.

Кроме того, эта методика не имеет четких алгоритмов оценки критических напряжений потери устойчивости в виде искажения сечения, а также игнорирует взаимодействие смежных элементов сечения и его влияние на устойчивость сечения в целом.

Метод прямого определения несущей способности лишен вышеперечисленных недостатков. Он имеет ясную методику оценки формы потери устойчивости в виде искажения сечения, которая является определяющей для большинства профилей с элементами жесткости. В расчет вводится полная площадь поперечного сечения. В то же время учитывается взаимодействие элементов сечения профиля. После определения критических сил потери устойчивости методом конечных полос можно напрямую определить расчетную несущую способность стержня при центральном сжатии и изгибе, и использовать ее в стандартной формуле Североамериканского стандарта.

Таким образом, метод прямого определения несущей способности является на сегодняшний день оптимальным для расчета стержней из тонкостенных холодногнутох профилей на внецентренное сжатие.

Расчет следует производить в формате LRFD, являющимся аналогом метода расчета по предельным состояниям, применяемого в отечественных нормах и ТКП ЕН 1993-1-1; 1-3; 1-5.

Условия и методика расчета. В качестве метода решения задачи был выбран «Метод прямого определения несущей способности». Этот метод обладает рядом преимуществ, делающих его применимым для оптимизации сечений тонкостенных профилей.

Были смоделированы сечения профилей со следующими геометрическими параметрами:

- высота сечения $h = 200; 250; 300$ мм;
- ширина полки $b = 50-130$ мм;
- размер отгиба $c = 15; 20; 25$ мм;
- толщина профиля $t = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5$ мм.

Исследовалось два вида сечений профилей: с элементом жесткости (жесткое) и без него (нежесткое) (рисунок).

Анализ упругой стадии работы производился в пакете CUFSM. Следуя методике «Прямого метода определения несущей способности» для случая внецентренного сжатия определялись отдельно номинальная несущая способность при центральном сжатии P_{nd} и номинальная несущая способность при изгибе M_{nd} . Для этого сначала в пакете CUFSM определялись критическая сила для потери устойчивости при искажении сечения P_{crd} и критический момент для потери устойчивости при искажении сечения M_{crd} . Затем по известным формулам в пакете MathCAD производилось вычисление величин P_{nd} и M_{nd} .

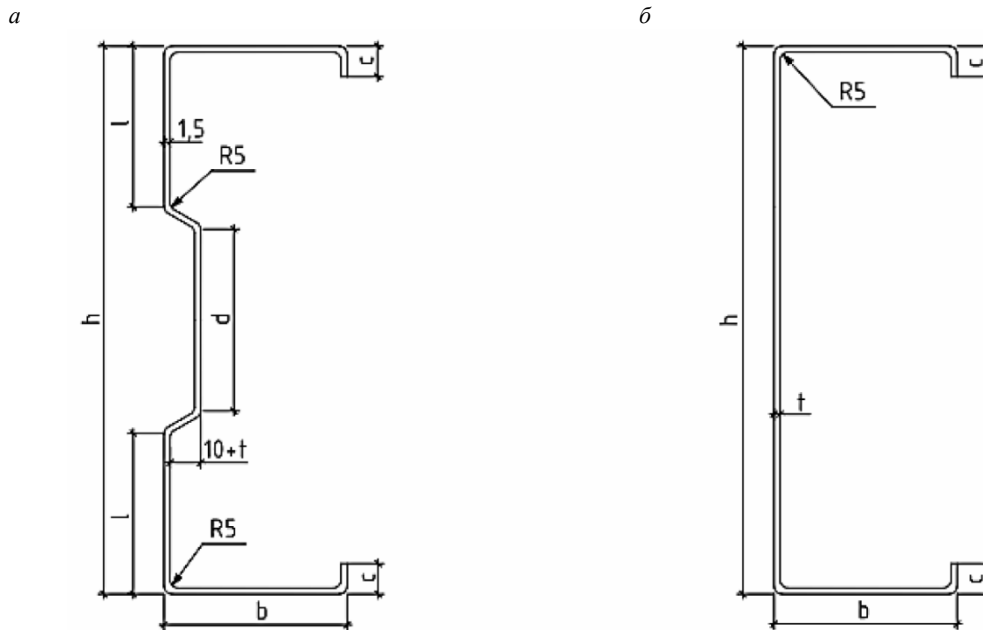


Рис. Сечения жесткого(а) и нежесткого(б) С - образного профилей

На основании полученных результатов для выявления оптимальных параметров сечения профилей строились графики следующего вида:

$$\sigma_{nd} = f\left(\frac{b}{t}\right), \quad \sigma_{nd} = f\left(\frac{b}{h}\right), \quad \sigma_{nd} = f\left(\frac{c}{b}\right),$$

где σ_{nd} – напряжение при потере устойчивости в виде искажения сечения.

Интенсивность прироста геометрических характеристик профиля опережает прирост несущей способности для всех исследованных величин полок. Учитывая это, а также то обстоятельство, что при исследовании максимальных значений несущей способности для случаев центрального сжатия и изгиба, соответствующие геометрические параметры сечений профилей были близки, было решено далее при оптимизации сечений профилей опираться на результаты расчета только для случая центрального сжатия.

Согласно нормам Eurocode 3, ч. 1–3, и AISI Specification, для профилей с одиночным отгибом должно выполняться условие $\frac{b}{t} \leq 60$.

В таблице 1 приведены значения оптимальных параметров b/t и b/h .

Таблица 1

Максимальные значения напряжений потери устойчивости в виде искажения, сечения и соответствующие им параметры b/t и b/h

h , мм	c , мм	t , мм	Несущая способность при центр. сжатии P_{nd} , кН	Напряжения по сечению σ_{nd} , $\frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$	b , мм	$\frac{b}{t}$	$\frac{b}{h}$
1	2	3	4	5	6	7	8
		1,0	57,72	16,70	55	55	0,275
200	15	1,5	110,11	20,70	60	40	0,3
		2,0	169,00	23,94	60	30	0,3
		1,0	42,58	11,96	65	65	0,325
200*	15	1,5	78,63	15,46	70	47	0,35
		2,0	129,20	18,36	65	33	0,325
		1,0	58,90	13,83	60	60	0,24
250	20	1,5	113,20	17,60	70	47	0,28

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
		2,0	179,90	20,78	70	35	0,28
		1,0	45,64	10,74	70	70	0,28
250*	20	1,5	92,14	13,84	80	53	0,32
		2,0	144,10	16,30	80	40	0,32
		1,5	115,30	15,23	80	53	0,267
300	20	2,0	181,20	18,01	80	40	0,267
		2,5	255,00	20,32	80	32	0,267
		1,5	89,35	11,37	95	63	0,317
300*	20	2,0	145,10	13,63	100	50	0,333
		2,5	207,30	15,65	100	40	0,333

Примечание: 200*, 250*, 300* – профили без элемента жесткости на стенке.

При малой величине полки жесткость соединения полка/стенка мала, что и обуславливает низкие значения напряжений. При чрезмерно большой ширине полки важное значение имеет размер отгиба, обеспечивающего ее устойчивость. Если величина отгиба недостаточна, то большая ширина полки также обуславливает низкие напряжения потери устойчивости.

При увеличении высоты профиля величина напряжений потери устойчивости в виде искажения сечения уменьшается. Очевидно, более гибкая стенка обеспечивает и меньшую крутильную жесткость соединения стенка/полка.

Согласно нормам Eurocode 3, ч. 1–3, и AISISpecification для обеспечения достаточной жесткости и предотвращения преждевременной потери устойчивости отгибов должно соблюдаться соотношение

$$0,2 < \frac{c}{h} < 0,6.$$

Данные, иллюстрирующие эффект увеличения размера отгиба для исследованных профилей, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Прирост несущей способности при увеличении размера отгиба

Наименование профиля	Размер отгиба <i>c</i> , мм	<i>c/b</i>	Площадь сечения, см ²	Прирост площади, %	Несущая способность <i>P_{nd}</i> , кН	Прирост несущей способности, %
1	2	3	4	5	6	7
200-1,0	15	0,273	3,46	2,9	57,72	0,43
	20	0,364	3,56		57,97	
200-1,5	15	0,25	5,32	2,8	109,98	0,12
	20	0,333	5,47		110,11	
200-2,0	15	0,25	7,06	2,8	169,00	0,47
	20	0,333	7,26		169,80	
200-1,0*	15	0,23	3,56	2,8	42,58	16,70
	20	0,308	3,66		49,72	
200-1,5*	15	0,214	5,46	2,7	84,40	13,50
	20	0,286	5,61		95,82	
200-2,0*	15	0,231	7,04	2,8	129,20	11,90
	20	0,308	7,24		144,60	
250-1,0	15	0,25	4,06	2,5	57,13	0,70
	20	0,333	4,16		57,52	

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
250-1,5	15	0,214	6,37	2,4	112,34	0,74
	20	0,286	6,52		113,17	
250-2,0	15	0,214	8,46	2,4	175,20	2,68
	20	0,286	8,66		179,90	
250-1,0*	15	0,188	4,16	2,2	40,84	11,80
	20	0,286	4,25		45,64	
250-1,5*	15	0,188	6,51	2,3	79,73	-
	20	0,25	6,66		116,82	
250-2,0*	15	0,188	8,64	2,3	125,75	14,60
	20	0,25	8,84		144,06	
300-1,5	20	0,25	7,57	2,0	115,30	0,43
	25	0,312	7,72		115,80	
300-2,0	20	0,25	10,06	2,0	181,20	1,00
	25	0,312	10,26		183,00	
300-2,5	20	0,25	12,55	2,0	255,00	1,00
	25	0,312	12,80		257,60	
300-1,5*	20	0,21	7,86	1,9	89,35	13,30
	25	0,263	8,00		101,20	
300-2,0*	20	0,2	10,64	1,9	145,10	12,00
	25	0,25	10,84		162,50	
300-2,5*	20	0,2	13,75	1,9	207,30	11,20
	25	0,25	13,50		230,60	

Анализируя данные таблицы 2 можно заключить, что прирост несущей способности в процентах за счет увеличения размера отгиба больше для профилей без элемента жесткости на стенке. В среднем для исследованных нежестких профилей увеличение площади на 2–3% вследствие увеличения отгиба приводило к увеличению несущей способности на 12–17%. Для жестких профилей при той же величине прироста площади сечения прирост несущей способности был несущественным и составлял 0,12–2,7%.

Для большинства профилей оптимальная величина отношения $\frac{c}{b}$ находится в пределах от 0,2 до 0,31.

Также следует отметить, что в силу положительного влияния увеличения размера отгибов на несущую способность при искажении сечения рационально было бы применять отгибы больших размеров, чем применяются производителями профилей сегодня, но с соблюдением нормируемого отношения:

$$\frac{c}{t} \leq 50.$$

Влияние элемента жесткости на стенке профиля на его несущую способность. Сравним несущую способность жестких и нежестких профилей. Значения несущей способности взяты в соответствии с точками максимумов на графиках $\sigma_{nd} = f\left(\frac{b}{t}\right)$ для жестких профилей, т.е. для профилей с одинаковой высотой сечения, шириной полки и размером отгиба.

Наличие элементов жесткости на стенке профиля обеспечивает существенное повышение несущей способности и позволяет экономить сталь, причем, чем меньше толщина металла профиля, тем более выражен эффект от элемента жесткости. Расход стали за счет наличия на стенке элемента жесткости больше в среднем на 2–3%.

Следует отметить, что для профилей без элементов жесткости при максимальных величинах полки не достигается несущая способность, которую имеют жесткие профили с минимальными по размеру полками. Если исходить из условия равнопрочности, можно привести пример: несущая способность профиля высотой 250 мм с полкой 110 мм толщиной 1,5 мм составляет 98,8 кН, что равно несущей способности аналогичного жесткого профиля с полкой размером 50 мм.

Расход стали на жесткий профиль в данном случае меньше на 22%.

Заключение. На основании предыдущих таблиц можно составить сортамент, который позволяет рационализировать выбор сечения в соответствии с требуемой несущей способностью. Так, вместо нежесткого профиля 300-100-2,0 (300 мм – высота сечения профиля, 100 мм – ширина полки, 2,0 – толщина профиля) с несущей способностью 162,5 кН при меньшем на 35 % расходе металла можно применить профиль высотой 200-60-2,0 с несущей способностью 169 кН; вместо профиля 300-95-1,5 с $P_{nd} = 101,2$ кН профиль 200-60-1,5 с $P_{nd} = 110,1$ кН при расходе стали меньше на 33,5% и т.д.

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Требуемые оптимальные размеры полки и отгиба для нежестких профилей больше, чем для жестких. Оптимальная ширина полки для жестких профилей составляет $(0,24-0,3)h$, для нежестких – $(0,28-0,33)h$. Оптимальные размеры отгиба $(0,22-0,3)b$.

2. Эффект увеличения несущей способности при увеличении размера отгиба более выражен для нежестких профилей. При прочих равных размерах сечения эффективным способом повышения несущей способности нежестких профилей является увеличение размера отгиба. Рационально было бы выпускать профили с отгибами больших размеров, чем применяются в практике проектирования сегодня.

3. При прочих равных размерах сечения наличие элемента жесткости на стенке профиля обеспечивает существенное повышение несущей способности, причем, чем меньше толщина металла профиля, тем более выражен этот эффект. Экономия стали по сравнению с нежесткими профилями составляет порядка 20%, несущая способность выше на 30–45 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий : технический кодекс установившейся практики ТКП EN 1993-1-1-2009 (02250) / Мин-во арх. и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2009.
2. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Ч. 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов : технический кодекс установившейся практики ТКП EN 1993-1-3-2009 (02250) / Мин-во арх. и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2009.
3. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Ч. 1-5. Пластинчатые элементы конструкций : технический кодекс установившейся практики ТКП EN 1993-1-5-2009 (02250) / Мин-во арх. и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2009.