

Сравнительный анализ методик расчета тонкостенных стальных балок С-образного профиля по отечественным и зарубежным нормам

А.А. Решетников, В.Ю. Корнет, Д.А. Леонова

Донской государственной технической университет

Аннотация: Рассмотрены и представлены два метода расчета работы на изгиб тонкостенных стальных балок С-образного профиля. Раскрыты особенности расчета редуцированного сечения, показаны основные этапы расчета и расхождение методов. Представлена таблица с расчетами эффективного момента сопротивления балки С-образного профиля по обоим методам при работе на изгиб.

Ключевые слова: металлоконструкции, легкие стальные тонкостенные конструкции, тонкостенные балки, редуцированное сечение, работа на изгиб, С-образный профиль, эффективное сечение, эффективная площадь, эффективный момент сопротивления.

При эксплуатации конструкции действующие в её элементах усилия все время изменяются вслед за изменением нагрузок. Для обеспечения надежной работы элемента необходимо выполнить его расчет на такие сочетания внешних нагрузок, какие вызывают самые большие усилия в этом элементе за весь период эксплуатации здания или сооружения [1]. Задача определения усилий от заданных нагрузок решается по известным правилам строительной механики и не представляет затруднений, если величины этих нагрузок известны. Трудность здесь состоит в том, что это будущие нагрузки и мы можем предсказать их величину лишь с той или иной степенью вероятности [2]. Кроме того, для расчета элемента ЛСТК необходимо знать геометрические характеристики эффективного сечения, механические характеристики металла, из которого будет выполнен этот элемент [3], а мы можем назначить лишь марку стали или сплава с ожидаемыми, но не конкретными значениями механических характеристик.

Эффективное сечение у ЛСТК обуславливается легкостью такой конструкции. С одной стороны, значительная экономия материала, с другой стороны такое сечение подвергается потери местной устойчивости раньше

потери общей устойчивости. В связи с этим было принято у ЛСТК определять геометрические характеристики эффективного сечения [4].

Расчет несущих конструкций зданий и сооружений на прочность сводится к расчету по первой группе предельных состояний, которая включает в себя все факторы, приводящие к полной непригодности конструкции к эксплуатации [5, 6]. На примере профиля С-образного сечения работающего на изгиб [7] мы рассмотрели два относительно похожих метода расчета сечений тонкостенных конструкций по СП 260.13330.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов» и по Cold-Formed Steel Design, 4th Ed Wei-Wen Yu and Roger LaBoube [8] базирующийся на The 1996 AISI Specification (American Iron and Steel Institute). Оба метода сводятся к поиску редуцированного сечения. Дело в том, что тонкие пластины при работе на сжатие имеют свойство терять местную устойчивость раньше, чем общую. При работе на изгиб верхние волокна балки работают на сжатие, нижние – на растяжение[9]. Разумеется, расчет направлен на поиск характеристик такого сечения, которое будет с большой вероятностью удовлетворять ожидания.

Для определения редуцированного сечения в обоих методах используют коэффициент редукиции и обозначают его буквой ρ . Тогда:

$$b_{ef} = \rho b;$$

$$c_{ef} = \rho c;$$

$$t_{ef} = \rho t$$

где, ρ – коэффициент редукиции;

b – ширина пластины между элементами жесткости;

c – ширина свеса пластины;

t – толщина пластины;

b_{ef} , c_{ef} , t_{ef} – расчетные (эффективные) значения соответственно.

Следует отметить, что для определения геометрических характеристик, и для работы с сечением в целом, AISI SPECIFICATION диктует учитывать радиусы закругления. В то время как СП 260.13330.2016 уходит от учета радиусов закругления, и лишь в малых случаях регламентирует ими не пренебрегать:

$$r \leq 5t \text{ и } r \leq 0,10b_p^*$$

* – минимальный радиус закругления для тонкостенных профилей равен 4мм.

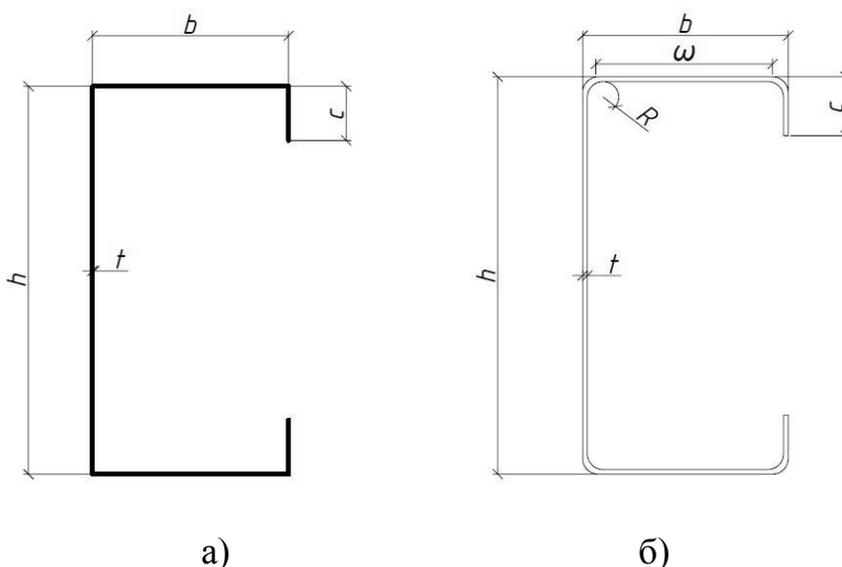


Рис.1 – параметры сечения профиля: а) по СП 260.13330.2016; б) по Cold-Formed Steel Design

Коэффициент редукиции определяется для каждой из пластин отдельно через значение условия гибкости по формуле:

$$\lambda_p = \frac{b}{23,4t\sqrt{k_\sigma}} - \text{для СП 260.13330.2016}$$

$$\lambda = (1,052/\sqrt{k})(\omega/t)(\sqrt{f/E}) - \text{для Cold-Formed Steel Design}$$

где, k_σ и k – коэффициенты, зависящие от граничных условий и характера напряжений в пластине;

ε – модуль деформации;

ω – ширина полки, за вычетом радиусов закругления;

f – расчетное сопротивление стали;

E – модуль упругости стали.

После происходит сравнение условия гибкости с предельным значением для обоих методов:

$$\lambda_p(\lambda) \leq 0,673, \text{ тогда } \rho = 1$$

$$\lambda_p(\lambda) > 0,673, \text{ тогда}$$

$$\rho = \frac{\lambda_p - 0,188}{\lambda_p^2} - \text{ для СП 260.13330.2016}$$

$$\rho = (1 - 0,22/\lambda)/\lambda - \text{ для Cold-Formed Steel Design}$$

После определения редуцированных значений пластины полки и пластины свеса полки методы в определении полного эффективного сечения расходятся.

По мнению СП 260.13330.2016 необходимо рассматривать уменьшение толщины пластины полки и пластины свеса полки. Делать это надо посредством коэффициента снижения несущей способности χ_d вследствие потери устойчивости формы сечения ребра. Для определения уменьшенной толщины предлагают следующую формулу:

$$t_{red} = t A_{s,red} / A_s \text{ где,}$$

A_s – эффективная площадь поперечного сечения краевого отгиба

$$A_s = t(b_{e2} + c_{ef});$$

$A_{s,red}$ – уменьшенная эффективная площадь элемента жесткости с учетом плоской формы потери устойчивости

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{R_{yH}}{\sigma_{com}} \leq A_s \text{ где,}$$

σ_{com} – сжимающее напряжение вдоль центральной оси элемента жесткости от нагрузки, действующей на конструкцию, рассчитанное для эффективного поперечного сечения.

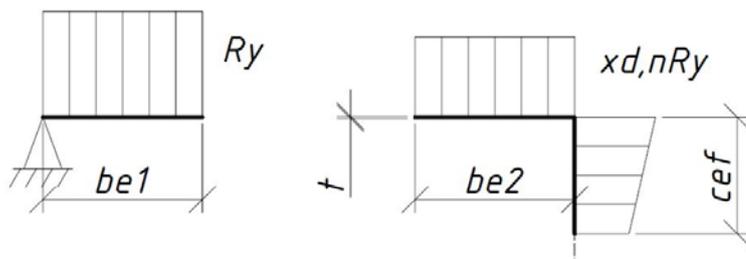


Рис. 2 – Схема к этапу с учетом x_d при n итераций.

Последним этапом проводится итерация, т.е. уточнение, коэффициента снижения несущей способности вследствие потери устойчивости формы сечения повторяя предыдущие расчеты, но с $x_d R_y$ и далее $x_{d,n} R_y$ до тех пор, пока не выполнится следующие условие:

$$x_{d,n} \approx x_{d,(n-1)}, \text{ но } x_{d,n} \leq x_{d,(n-1)}$$

Принимают эффективное поперечное сечение ребра жесткости размерами b_2 и c_{ef} и толщиной t_{red} , уменьшенной в соответствии с x_d .

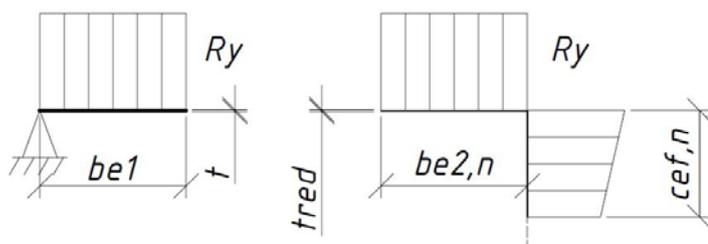


Рис. 3 – Окончательное сечение.

По мнению Cold-Formed Steel Design после определения редуцированного значения пластины полки и пластины свеса полки необходимо определить редуцированную длину пластины стенки. Эффективную длину предлагают определить аналогично пластин полки и свеса, но по мнению AISI SPECIFICATION эту длину необходимо разделить на два участка:

2009 «Профили стальные гнутые для легких стальных конструкций». Расчеты были произведены автоматизированным методом с помощью электронных таблиц Microsoft Excel [10].

Таблица 1 – Сортамент

h, мм	b, мм	c, мм	t, мм	СП 260.13330.2016		Cold-Formed Steel Design		кг на м.п.
				$A_{ef}, \text{мм}^2$	$W_{ef}, \text{см}^3$	$A_{ef}, \text{мм}^2$	$W_{ef}, \text{см}^3$	
100	50	14	1,2	253,95	7,60	234,81	7,60	2,03
			2	448,91	14,62	396,23	13,35	3,32
			3	684,00	22,55	582,16	19,50	4,87
120	50	14	1,2	276,95	9,61	258,81	9,68	2,21
			2	487,44	18,39	436,23	16,95	3,63
			3	743,95	28,56	642,16	24,82	5,34
160	60	18	1,2	341,10	14,53	336,83	16,27	2,86
			2	616,79	30,13	564,77	28,19	4,70
			3	942,11	47,01	835,91	41,67	6,94
180	60	18	1,2	364,24	17,07	360,83	19,11	3,05
			2	655,40	35,09	604,77	33,03	5,02
			3	1000,42	54,75	895,91	48,89	7,41

Исходя из расчетов по обоим методам можно заключить, что при расчете по СП 260.13330.2016 идет меньший расход стали, чем по Cold-Formed Steel Design. С обратной стороны по СП 260.13330.2016 будет меньший запас прочности. Также стоит заметить, что при меньшем сечении профиля и меньшей толщине листа геометрические характеристики, рассчитанные по обоим методам схожи, а при большем профиле по Cold-Formed Steel Design момент сопротивления превышает СП 260.13330.2016.

При увеличении толщины листа Cold-Formed Steel Design закладывает больший запас прочности в сечение профиля.

Отметим общий признак для тонкостенных профилей. Сравним расход стали для профиля 160 мм с толщиной листа 1,2 мм и для профиля 100 мм с толщиной листа 2 мм. Моменты сопротивления сечения для обоих профилей близки по своему значению, но в меньшем сечении перерасход стали на 16% больше. Такую тенденцию можем заметить во всех схожих ситуациях. Это говорит о том, что выгоднее использовать большее сечение, но с меньшей толщиной листа.

Литература

1. Горев В.В., Уваров Б.Ю., Филиппов В.В. и др. Металлические конструкции. В 3т. Т.1. Элементы конструкций: Учеб. для строит. вузов - М., Высш. шк. - 2004. – 551 с.
2. Василькин А.А., Рахманов Э.К. Системотехника оптимального проектирования элементов строительных конструкций // Инженерный вестник Дона, 2013, №4, URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2203.
3. Виноградов С.Н., Таранцев К.В. Конструирование и расчёт элементов тонкостенных сосудов: учеб. пособие. –Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 136 с.
4. Van Amsterdam, E Construction Methods for Civil Engineering. - 2nd Edition. Soft Cover, 2014. - 260 p.
5. Горицкий В.М., Диагностика металлов. - М.: Metallurgizdat, 2004. - 408 с.
6. Вернези Н.Л. Метод оценки прочности металла неразрушающим способом с использованием априорной информации // Инженерный вестник Дона. - 2013. - №3, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1898



7. Скачков С.В. Геометрические характеристики тонкостенных элементов С-образного поперечного сечения // Инженерный вестник Дона, 2017, №3, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4321.

8. Wei-Wen Yu, Roger A. LaBoube Cold-Formed Steel Design. - 4th Edition изд. - Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010. - 528 p.

9. Беленя Е.И. Металлические конструкции. Издание 6-е, переработанное и дополненное изд. М.: Стройиздат, 1986. 560 с.

10. W.J. DeCoursey / Statistics and Probability for Engineering Applications with Microsoft® Excel. – 2003 – 400 p. – Elsevier Science (USA).

References

1. Gorev V.V., Uvarov B.Ju., Filippov V.V. i dr. Metallicheskie konstrukcii V 3t. T.1. Jelementy konstrukcij [Metal constructions. In 3T. T.1. Elements of constructions] Ucheb. dlja stroit. vuzov M., Vyssh. shk, 2004. 551 p.

2. Vasil'kin A.A, Rahmanov Je.K. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4, URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2203.

3. Vinogradov S.N., Tarancev K.V. Konstruirovanie i raschjot jelementov tonkostennyh sosudov [Design and calculation of elements of thin-walled vessels] ucheb. posobie. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2004. 136 p.

4. Van Amsterdam, E Construction Methods for Civil Engineering. 2nd Edition. Soft Cover, 2014. 260 p.

5. Gorickij V.M. Diagnostika metallov [Diagnostics of metals] M. Metallurgizdat, 2004. 408 p.

6. Vernezi N.L. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013. №3, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1898

7. Skachkov S.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №3, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4321.



8. Wei-Wen Yu, Roger A. LaBoube Cold-Formed Steel Design. 4th Edition изд. Hoboken, New Jersey John Wiley & Sons, Inc., 2010, 528 p.
9. Belenja E.I. Metallicheskie konstrukcii [Metal constructions] Izdanie 6-e, pererabotannoe i dopolnennoe izd. M. Strojizdat, 1986. 560 p.
10. W.J. DeCoursey Statistics and Probability for Engineering Applications With Microsoft® Excel. 2003, 400 p. Elsevier Science (USA).