

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ХОЛОДНО ФОРМОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ СОГЛАСНО ЕВРОКОДУ 3 И НОРМАМ СЕВЕРНОЙ АМЕРИКИ

Дергачев М.Г., Надольский В.В., канд. техн. наук (БНТУ)

Аннотация. Несмотря на ряд технологических и эксплуатационных преимуществ перед горячекатаными конструкциями применение конструкций из холодноформованных элементов в настоящее время нельзя назвать интенсивным. Основные причины – это недостаточная изученность, специфические особенности работы элементов под нагрузкой и отсутствие нормативных документов. Введение Еврокода 3 на территории Республики Беларусь сыграло благоприятную роль при внедрении эффективных конструктивных решений. В статье выполнен сравнительный анализ методов определения эффективных характеристик сечения по Еврокоду 3 и нормам Северной Америки.

Введение

Стальные холодноформованные элементы – это элементы, изготовленные путем изгиба или прокатывания плоского стального листа таким образом, чтобы полученная новая форма выдерживала большую нагрузку, чем плоский лист [1].

Конструкции из холодноформованных элементов хорошо зарекомендовали себя при строительстве универсальных производственных зданий, малоэтажных жилых и гражданских зданий, логистических центров.

Среди преимуществ холодноформованных конструкций следует отметить легкий вес, быстроту изготовления, высокую скорость строительства, всесезонность монтажа. К недостаткам можно отнести более сложную работу тонкостенных элементов под нагрузкой в сравнении с горячекатаным прокатом, что требует высокой квалификации проектировщиков.

Основными факторами, сдерживающими применение холодноформованных тонкостенных конструкций, являются недостаточная изученность, специфические особенности работы элементов под нагрузкой и отсутствие нормативных документов.

В статье рассмотрены теоретические основы расчета эффективных характеристик сечений, уделено внимание особенностям работы тонкостенных элементов. Приведены результаты сравнительного анализа методов определения эффективных характеристик, которые реализованы в нормативных документах.

Нормативное обеспечение

В 1940 году в США было принято решение о разработке стандартов в области холодноформованных конструкций. Первый документ вышел в 1946 году под названием Specification for the Design of Light Gage Steel Structural

Members. Последняя редакция этого документа AISI S100-12 "North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members" [2] вышла в 2012 году (с исправлениями документ переиздан в 2014 году) при поддержке Американского института чугуна и стали (AISI).

В Европе к разработке данного стандарта [3, 4] приступили позже и за основу были приняты исследования американских ученых [5]. Первый прообраз нормативного документа по расчету холодноформованных элементов был разработан при поддержке организации European Convention for Constructional Steelwork (ECCS) в 1987 году [6]. Эти документы легли в основу европейского стандарта EN 1993-1-3 (Еврокода) [3].

Закритическая стадия работы пластин и понятие о приведенной (эффективной) ширине

Критические напряжения потери местной устойчивости для холодноформованных элементов, как правило, составляют очень малую долю от предела текучести, что не позволяет в полной мере использовать прочностные характеристики материала.

Экспериментально и теоретически установлена возможность увеличения нагрузки на холодноформованный элемент после потери местной устойчивости [7]. В этом случае рассматривают закритическую стадию работы, при которой часть поперечного сечения (стенки и/или полки) теряет устойчивость. Такой подход позволяет учесть значительный резерв сопротивления.

До критических напряжений потери местной устойчивости сжимающие напряжения, как правило, распределяются по сечению линейно. Увеличение сжимающих напряжений за пределы критических значений приводит к нелинейному перераспределению напряжений по поперечному сечению пластины. На примере прямоугольной пластины, подкрепленной с двух сторон, нелинейность распределения напряжений заключается в уменьшении напряжений в средней части пластины и увеличении на крайних участках. Сжимающие напряжения на крайних участках будут увеличиваться до тех пор, пока не достигнут предела текучести стали.

На основании этого явления Т. Карман в 1932 году предложил экспериментально-теоретический метод расчета пластин в закритической стадии, основанный на предположении, что в момент разрушения напряжения на краях пластины достигли предела текучести и уравниваются полной нагрузкой. В это же время средняя искривленная часть пластины считается ненапряженной, т.е. неэффективной.

Классическое решение Т. Кармана позволяет определить отношение части ширины сечения b_{eff} , которая воспринимает напряжения, равные пределу текучести, к полной ширине сечения b , которая воспринимает критические напряжения потери местной устойчивости, в следующем виде:

$$\frac{b_{\text{eff}}}{b} = \sqrt{\frac{y_{\text{cr}}}{f_y}}. \quad (1)$$

Следует отметить, что часть сечения шириной b_{eff} принято называть эффективной частью сечения пластины, то есть та часть сечения, которая не теряет местную устойчивость при напряжениях, равных пределу текучести.

В нормах [4] формула (1) приняла вид

$$\frac{b_{\text{eff}}}{b} = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{cr}}}{\sigma_{\text{max}}}} \left(1 - 0,22 \sqrt{\frac{\sigma_{\text{cr}}}{\sigma_{\text{max}}}} \right). \quad (2)$$

Отмеченные рассуждения лежат в основе метода эффективной (редуцированной, приведенной) ширины. В иностранных нормативных документах этот метод является основным при расчете элементов на местную устойчивость и устойчивость формы сечения [8].

Учет потери устойчивости формы сечения при расчете холодноформованных элементов

Для предотвращения потери местной устойчивости наиболее эффективным методом является уменьшение ширины тонкостенного элемента или его подкрепление по свободной стороне посредством элемента жесткости. Под элементом жесткости понимают одинарные или двойные отгибы на свесах сечения либо промежуточные гофры.

Сопротивление потере устойчивости формы сечения основано на допущении, что элемент жесткости ведет себя как сжатый стержень с непрерывным частичным раскреплением [5]. В расчетной схеме это раскрепление представлено в виде упруго-податливой связи (пружины).

Жесткость этой связи должна определяться путем приложения единичной нагрузки u на единицу длины. Жесткость связи K можно определить по формуле

$$K = \frac{u}{\delta}, \quad (3)$$

где δ – перемещение элемента жесткости от единичной нагрузки u , действующей в центре тяжести эффективной части поперечного сечения $b_{\text{eff}2}$.

После определения жесткости связи K определяются критические напряжения потери устойчивости элемента жесткости в упругой стадии:

$$y_{cr,s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s}, \quad (4)$$

где I_s – момент инерции эффективного сечения элемента жесткости, определенный по эффективной площади A_s .

Используя критические напряжения потери устойчивости элемента жесткости определяют коэффициент снижения несущей способности вследствие потери устойчивости формы сечения χ_d в зависимости от относительной гибкости λ_d :

$$\chi_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{y_{cr,s}}}. \quad (5)$$

Таким образом, учет влияния элемента жесткости сводится к определению его эффективных размеров, а также к определению коэффициента снижения несущей способности вследствие потери устойчивости формы сечения (т.е. элемента жесткости) χ_d . Потерю устойчивости формы сечения учитывают путем уменьшения толщины элемента жесткости, умножая ее полное значение на коэффициент χ_d .

Сравнение методик определения эффективных характеристик по EN и AISI

Поскольку американские стандарты в части тонкостенных элементов легли в основу европейских стандартов, методики определения эффективных характеристик имеют одну теоретическую базу, которой является метод приведенной ширины.

Главные отличия между американским и европейским стандартом:

1. Расчетная ширина элемента сечения w .

При определении эффективных характеристик по AISI S100-12 [2] сразу учитываются углы сгиба. При этом считается, что местной потере устойчивости подвержены прямолинейные участки сечения w , заключенные между углами сгиба. Как и ТКП EN [3] AISI S100-12 лимитирует максимальное отношение прямолинейных участков к их толщине (см. пункт B1.1).

2. Учет потери устойчивости формы сечения.

При расчете по ТКП EN [3] потеря устойчивости формы сечения учитывалась путем уменьшения толщины элемента жесткости. При расчете по AISI S100-12 потеря устойчивости формы сечения учитывается путем дополнительного уменьшения ширины элемента жесткости. При этом возможны два варианта:

- отношение прямолинейной части сжатой полки w к ее толщине t не превышает $0,328S$, где S определяется в соответствии с формулой Eq.B4-7 [2].

В этом случае потеря устойчивости формы сечения исключена, и элемент жесткости рассчитывается как равномерно сжатая пластина с односторонним подкреплением;

- отношение прямолинейной части сжатой полки w к ее толщине t превышает $0,328S$, где S определяется в соответствии с формулой Eq.B4-7 [2]. В этом случае в соответствии с формулами Eq.B4-8 и Eq.B4-10 [2] необходимо определить предельный и фактический моменты инерции элемента жесткости. Затем коэффициент, равный отношению этих моментов, дополнительно умножается на эффективную ширину элемента жесткости. При этом эффективная ширина элемента жесткости также определяется как для равномерно сжатой пластины с односторонним подкреплением.

Для численного сравнения двух методов были взяты несколько типоразмеров C-образных профилей с элементами жесткости в виде одинарного отгиба. В статье не рассматриваются вопросы, связанные с оценкой уровня надежности моделей сопротивления, поэтому частные коэффициенты безопасности были исключены из расчетных формул. Для возможности сопоставления результатов анализа, прочностные характеристики стали приняты равными между собой.

Результаты вычислений сведены в таблицу.

Сравнение эффективных характеристик по EN и AISI

Характеристика	EN	AISI	EN/AISI	EN	AISI	EN/AISI	EN	AISI	EN/AISI
	16x47x150x41x16x1,0			6x47x150x47x6x1,0			10x37x195x37x10x1,0		
Полная площадь, мм ²	255,4	49,8	1,022	241,9	236,3	1,024	273,6	268	1,021
Конечное значение коэффициента χ_d	0,633/0,697	-	-	0,331	-	-	0,532	-	-
Эффективная площадь, мм ²	117,7	138,4	0,85	91,9	99,2	0,93	99,9	111,9	0,89

Заключение

С введением в 2009 году Еврокодов на территории Беларуси появилась возможность нормативно закреплённого расчета холодноформованных элементов. Но уровень подготовки проектировщиков в этом направлении остается низким. Часто встречается, что в конструкции используют тонкостенный элемент, а его расчет ведут по СНиП II-23-81 без учета эффективных характеристик. Это приводит к тому, что реальная несущая способность сечения гораздо ниже планируемой.

Стоит отметить, что одним из минусов Еврокодов является отсутствие ярко выраженной инженерной методики расчетов, которую можно увидеть в СНиП. Существующие пояснительные книги, методички, публикации пока не переведены на русский язык.

Чтобы у проектировщиков появились доступные алгоритмы, была проведена настоящая работа. Рассмотрены основные особенности работы тонкостенных элементов. Проанализированы методики определения эффективных характеристик по EN и AISI. Расчет показал разницу в значениях от 10 до 20%.

Стоит заметить, что для рассмотренного частного случая (центрально-сжатого стержня) определение эффективных характеристик является менее трудоемким по методу, приведенному в AISI.

Также следует отметить условность данного анализа расчетных методик на основании только сравнения эффективных характеристик сечений. Для точного анализа необходимо сравнение сопротивления элементов, что в данной статье не рассмотрено и требует дополнительно изучения.

Литература. 1. Yu W.-W. Cold-formed steel design: fourth edition / Wei-Wen Yu, R.A. LaBoube. – New York: John Wiley & Sons Inc., 2010. – 491 с. 2. AISI S100-12. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. – Washington: American Iron and Steel Institute, 2014. – 174 с. 3. ТКП EN 1993-1-3-2009* (02250). Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов (EN 1993-1-3:2006, EN 1993-1-3:2006/AC:2009, IDT). – Минск: Минстройархитектуры, 2014. – 119 с. 4. ТКП EN 1993-1-5-2009* (02250). Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-5. Пластинчатые элементы конструкций. (EN 1993-1-5:2006, EN 1993-1-5:2006/AC:2009, IDT). – Минск: Минстройархитектуры, 2014. – 51 с. 5. Семко В.А. Расчет несущих и ограждающих конструкций из стальных холодноформованных профилей в соответствии с Еврокодом 3 / В.А. Семко. – Киев. Украинский Центр Стального Строительства (УЦСС), 2015. – 143 с. 6. Dubina D. Design of Cold-formed Steel Structures / Dan Dubina, Viorel Ungureanu, Raffaele Landolfo. – Mem Martins: ECCS, 2012. – 654 с. 7. Нехаев Г.А. Легкие металлические конструкции / Г.А. Нехаев. – Тула: ООО «ПрофСтальПроект», 2012. – 90 с. 8. Гарифуллин М.Р., Ватин Н.И. Устойчивость тонкостенного холодногнутого профиля при изгибе – краткий обзор публикаций / М.Р. Гарифуллин, Н.И. Ватин. – Санкт-Петербург, 2014. – 57 с.