

УДК 624.

**ЖУКА, МУЗДАК АБАЛДА ФОРМАГА КЕЛТИРИЛГЕН ЭЛЕМЕНТЕРДИН,  
ЕВРОКОД 3 ТУН НЕГИЗИНДЕГИ НАТЫЙЖАЛУУ КЕНДИК ЫКМАСЫ**

**МЕТОД ЭФФЕКТИВНОЙ ШИРИНЫ ДЛЯ ТОНКОСТЕННЫХ  
ХОЛОДНОФОРМОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОГЛАСНО ТРЕБОВАНИЯМ  
ЕВРОКОДА 3**

**EFFECTIVE WIDTH METHOD FOR THIN-WALLED COLD-FORMED  
ELEMENTS IN ACCORDANCE WITH EUROCODE 3**

**Абдыкалыков Данияр**, магистрант, Эл аралык инновациялык технологиялар  
университети, МУИТ, [abdykalykov\\_17@mail.ru](mailto:abdykalykov_17@mail.ru)  
Abdykalykov Daniyar, graduate student, International University of Innovation  
Technologies, [abdykalykov\\_17@mail.ru](mailto:abdykalykov_17@mail.ru)

*Каралып жатан конструкциялар бул - муздак абалда формага келтирилген элементтерден турат. Бир катар технологиялык жана эксплуатациялык жактан ысык абалда чоюлган конструкциялардан артыкчылыгына карабастан, колдонулушу боюнча артта калууда. Мунун негизги себептери: жетишсиз изилденбегендиги, элементтин жугу менен иштөө озгочолугу жана ченемдик документтердин жоктугу. Бул изилдөө натыйжалуу кесилиш озгочолукторун эсептөө жана кесилиш болукторунун туруктуулугун жоготууну эске алууга багытталган. Кесилиш болукторунун натыйжалуу озгочолукторун аныктоо учун Еврокод (EN 1993) жана Тундук американын стандарттары салыштырылды.*

***Ачык создор:** жука профиль, муздак абалда формага келтирилген профиль, натыйжалуу болум касиеттери, жергиликтүү туруктуулугун жоготуу, цинк менен капталган профиль.*

*Рассматриваются конструкции из холодноформованных элементов, применение которых в настоящее время нельзя назвать интенсивным, несмотря на ряд технологических и эксплуатационных преимуществ перед горячекатаными конструкциями, особенно в определенных областях. Показаны основные причины этого: недостаточная изученность, специфические особенности работы элементов под нагрузкой, отсутствие нормативных документов. В данном исследовании акцент сделан на расчете эффективных характеристик сечения, учитывающих потерю устойчивости частей сечения (традиционный*

отечественный термин местная устойчивость) и формы сечения. Проведен сравнительный анализ методов определения эффективных характеристик сечения согласно требованиям Еврокода (EN 1993) и норм Северной Америки.

**Ключевые слова:** тонкостенные профили, холодноформованные профили, эффективные характеристики сечения, закритическая работа пластин, потеря местной устойчивости, потеря устойчивости формы сечения, оцинкованные профили, элементы жесткости.

*Despite a series of technological and service advantages, compared to hot rolled structures, especially in certain fields, the use of cold formed structural elements now cannot be called intense. The main reason is insufficient knowledge about this kind of specific structural elements, features of work elements under load and the absence of normative documents. In the article emphasis is placed on the calculation of the effective cross-section characteristics, taking into account the plate buckling (traditional domestic term – local buckling) and distortional (cross-section) buckling. A comparative analysis of the methods of determining effective cross-section according to the requirements of Eurocode (EN 1993) and North American standards are carried out.*

**Keywords:** thin-walled elements, cold-formed elements, effective sections, post-critical strength of thin plates, local buckling, distortional buckling, galvanized elements, stiffeners.

**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]. Особенностью холодноформованных элементов является небольшая толщина в сравнении с горячекатаным прокатом. Например, американский стандарт [2] распространяется на элементы толщиной от 0,378 до 25,4 мм, европейский стандарт [3] – на элементы толщиной от 0,5 до 15 мм и на соединения толщиной от 0,5 до 4 мм. К сталям предъявляется дополнительное требование – пригодность для профилирования [3].

Конструкции из холодноформованных элементов хорошо зарекомендовали себя при строительстве универсальных производственных зданий, малоэтажных жилых и гражданских зданий, логистических центров, магазинов и торговых павильонов, надстроек и пристроек существующих зданий и сооружений.

В последнее время холодноформованные элементы начали активно применяться в ограждающих конструкциях (термопанели, сэндвич-панели), в конструкциях вентилируемых фасадов и кровель. 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. Также особого внимания требуют вопросы обеспечения коррозионной стойкости и сопротивления огневому воздействию.

Основными факторами, сдерживающими применение холодноформованных тонкостенных конструкций, являются недостаточная изученность, специфические особенности работы элементов под нагрузкой, отсутствие нормативных документов. Уровень подготовки проектировщиков в этом направлении остается низким. Как следствие, попытки применения данного вида конструкций зачастую сопровождаются ошибками на стадии проектирования и возведения.

Нами рассмотрены теоретические основы учета закритической стадии работы элемента после потери местной устойчивости посредством расчета эффективных характеристик сечений, уделено внимание особенностям работы тонкостенных элементов. Приведены результаты сравнительного анализа методов определения эффективных характеристик, которые реализованы в нормативных документах. Наиболее актуальным и имеющим практическое значение представляется сравнение моделей сопротивления по EN 1993-1-5 [4] и AISI S100-12 [2] (нормы Северной Америки).

**Нормативное обеспечение.** В 1940 году в США 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 приступили позже, за основу были приняты исследования американских ученых [5]. Первый прообраз нормативного документа по расчету холодноформованных элементов 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]. Следует отметить, что параллельно проводились исследования в каждой стране, в результате этого в европейских странах действовали нормативные документы, касающиеся холодноформованных конструкций. СНиП II-23-81 «Стальные конструкции» и актуализированные нормативные документы России, Украины и Кыргызстана не рассматривают особенности проектирования конструкции из холодноформованных тонкостенных элементов, что является причиной столь позднего развития холодноформованных тонкостенных конструкций на территории стран бывшего СССР.

**Особенности работы.** К особенностям тонкостенных элементов можно отнести:

- разнообразные формы потери устойчивости и возможные их комбинации (взаимодействие). Для холодноформованных элементов выделяют три основных типа потери устойчивости: местная (local buckling), устойчивость формы поперечного сечения (distortional buckling) и общая (global buckling). При этом к общей относятся изгибная (flexural), крутильная (torsional) и изгибно-крутильная (flexural-torsional) формы потери устойчивости;

- склонность сечений к кручению. Основные виды холодноформованных элементов имеют несимметричное сечение. В этом случае центр сдвига не совпадает с центром тяжести сечения. Если нагрузка не приложена в центре сдвига, чтобы обеспечить изгиб без кручения, любое отклонение от этой оси вызывает кручение элемента [6];

- смятие, искривление, потеря устойчивости стенки элементов в местах приложения локальной нагрузки;

- чувствительность к начальным несовершенствам. Различают следующие виды наиболее характерных несовершенств холодноформованных элементов: геометрические несовершенства, остаточные напряжения и изменение свойств стали при изготовлении (в местах закругления происходит увеличение предела текучести и (незначительно) временного сопротивления стали [1]);

- работа только в упругой стадии, что является следствием предрасположенности элемента к потере устойчивости (особенность сечения класса 4);

- нетрадиционные и более сложные узловые соединения;

- закритическая стадия работы элемента при потере местной устойчивости.

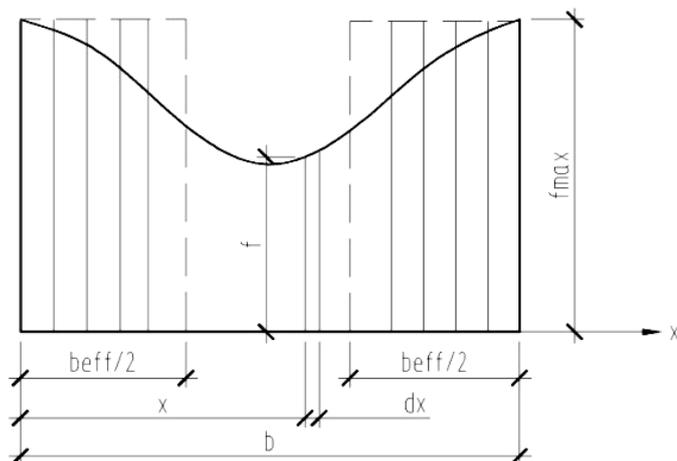
Далее более подробно рассмотрены особенности метода эффективных характеристик применительно к учету закритической стадии работы элемента при потере местной устойчивости и потере устойчивости формы сечения.

**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 достижения значений 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 (рисунок 1). Сжимающие напряжения на крайних участках будут увеличиваться до тех пор, пока не достигнут предела текучести стали.



**Рисунок 1. – Распределение напряжений по сечению сжатой пластины**

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 уравновешивают полную нагрузку. 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:

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

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 1933 году Е.Е. Sechler провел серию опытов, с целью проверить справедливость гипотезы Т. Кармана. Результаты показали, что отношение частей сечения  $b_{eff} / b$  зависит не только от  $\sigma_{cr} / f_y$ , но также от отношения полной ширины сечения к его толщине ( $b/t$ ). В 1946 году Г. Винтер экспериментальным путем уточнил формулу (1):

$$\frac{b_{eff}}{b} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{max}}} \left( 1 - 0.25 \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{max}}} \right) \quad (2)$$

где  $\sigma_{max}$  – максимальные краевые напряжения в пластине, которые могут быть меньше, чем предел текучести.

С 1946 по 1968 год расчет эффективных характеристик проводился в соответствии с формулой (2). За это время было накоплено множество экспериментальных данных, которые позволили ее уточнить. В нормах [4] она приняла вид:

$$\frac{b_{eff}}{b} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{max}}} \left( 1 - 0.22 \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{max}}} \right) \quad (3)$$

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]. В соответствии с этим методом сечение рассматривается как набор отдельных пластин с различными условиями опирания по контуру. Для каждой пластины определяются эффективные участки, способные воспринимать нагрузку. Не эффективные участки исключаются из поперечного сечения.

**Эффективная ширина пластины согласно ТКП EN 1993-1-5.** Согласно ТКП EN 1993-1-5 [4] эффективная ширина пластины выражена через коэффициент потери устойчивости  $\rho$  в следующем виде:

$$b_{eff} = \rho b, \quad (4)$$

$$\text{где: } \rho = \frac{1 - 0.22 / \sqrt{\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{cr}}}}{\sqrt{\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{cr}}}} = \frac{1 - 0.22\lambda}{\lambda} \leq 1 \quad (5)$$

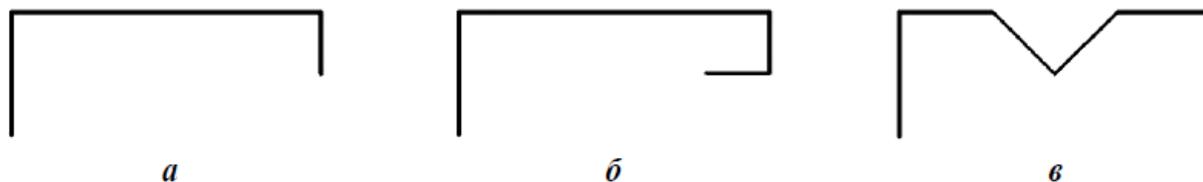
где,  $\lambda$  – условная гибкость пластины

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{\sigma_{max} [12(1-\nu^2)(w/t)^2]}{K\pi^2 E}} = \left( \frac{1.052}{\sqrt{K}} \right) \left( \frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{max}}{E}} \quad (6)$$

Следует отметить, что коэффициенты редуцирования откорректированы на основании эмпирических данных, что ограничивает широкое применение этого метода и требует уточнения для отдельных видов напряженно-деформируемого состояния. Также этот метод отличается повышенной трудоемкостью. Преимущество учета закритической стадии работы пластин демонстрируется на следующем примере. Для равномерно сжатой пластины шириной 400 мм и толщиной 1,2 мм на основании классической формулы равновесия пластины [5] критическое напряжение равно 6,67 МПа, при этом значение критической силы составит 3,2 кН. На основании формул (4), (5), (6) для предела текучести стали 350 МПа эффективная ширина сечения пластины составит 52 мм, при этом сжимающая сила равна 21,84 кН. То есть

значение силы, при которой напряжения на устойчивых (эффективных) частях пластины достигнут предела текучести, превышает значение критической силы потери устойчивости в 6,8 раз.

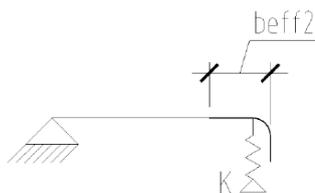
**Учет потери устойчивости формы сечения при расчете холодноформованных элементов.** Для предотвращения потери местной устойчивости наиболее эффективным методом является уменьшение ширины тонкостенного элемента или его подкрепление по свободной стороне посредством элемента жесткости. Элементы жесткости – это одинарные (а) или двойные (б) отгибы на свесах сечения либо промежуточные гофры (в) (рис. 2).



**Рисунок 2. – Типы элементов жесткости**

Для обеспечения устойчивости элемента жесткости, его размеры должны находиться в пределах, указанных в [3, п. 5.2]. Наличие элементов жесткости в сечении позволяет повысить величину нагрузки, которую может воспринять тонкостенный элемент. При этом возможно возникновение потери устойчивости формы сечения. Данный тип потери устойчивости характеризуется тем, что устойчивость теряют непосредственно элементы жесткости.

Определение сопротивления 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 упругоподатливой связи (пружины) (рис. 3).

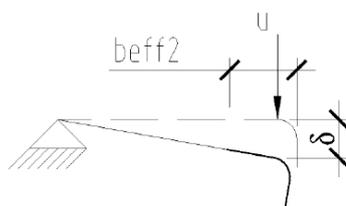


**Рисунок 3. – Эквивалентная схема раскрепления элемента жесткости**

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

$$K = \frac{u}{\delta} \quad (7)$$

где  $\delta$  – перемещение элемента жесткости от единичной нагрузки  $u$ , действующей в центре тяжести эффективного части поперечного сечения  $b_{eff2}$  (рис. 4).



**Рисунок 4. – Определение жесткости связи**

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

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} \quad (8)$$

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

Используя критические напряжения потери устойчивости элемента жесткости определяют коэффициент снижения несущей способности вследствие потери устойчивости формы сечения  $\chi_d$  в зависимости от относительной гибкости  $\lambda_d$ :

$$\chi_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,s}}} \quad (9)$$

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)  $\chi_d$ . Потерю устойчивости формы сечения учитывают путем уменьшения толщины элемента жесткости, умножая ее полное значение на коэффициент  $\chi_d$ .

**Особенности применения метода приведенной ширины в соответствии с EN.** В соответствии с [3] все типы сечений классифицируются в зависимости от предрасположенности их частей к потере местной устойчивости. Как правило, сечение тонкостенных холодноформованных элементов относится к классу 4, то есть потеря местной устойчивости или устойчивости формы сечения наступает до достижения напряжениями предела текучести. Приняв такое предположение, основной задачей расчета становится определение эффективного (редуцированного) сечения.

Говоря об эффективном сечении элемента, проектировщик или исследователь должен понимать, что «эффективное сечение» не отображает реального распределения напряжений в сечении элемента и служит лишь инструментом, который позволяет определить несущую способность конструкции.

Распределение сжимающих напряжений для одного и того же сечения может быть различно, при разном характере работы элемента (изгиб, сжатие). Соответственно и геометрические характеристики сечения будут различаться для разного типа напряженного

состояния. Для асимметричного сечения геометрические характеристики будут даже зависеть от знака действия момента. Поэтому важно рассчитывать эффективные характеристики для каждого конкретного случая. Также при расчете эффективных характеристик следует учитывать наличие отверстий, причем для разного типа напряженного состояния может быть разное критичное расположение отверстий.

Документ [3] распространяется на холодноформованные элементы с сечением, отношение «ширины к толщине» которых находится в диапазоне, приведенном в [3, таблица 5.1]. Для приведенных значений накоплен достаточный опыт и выполнена проверка испытаниями. Допускается использование элементов с отношением размеров, превышающих приведенные величины. Но в этом случае их прочность и жесткость должны быть подтверждены результатами испытаний либо более обоснованными расчетами [3].

При определении эффективных геометрических характеристик в соответствии с [3] учитывают следующие аспекты:

1) толщина холодноформованного элемента. Действие EN [3] распространяется на элементы толщиной от 0,5 до 15 мм и на соединения толщиной от 0,5 до 4 мм. Под этой толщиной принимается толщина элемента без учета покрытия [3]. Толщина металла без покрытия равна номинальной толщине листа после холодного формования за вычетом толщины покрытия;

2) срединная линия. В соответствии с EN [3] при определении эффективных геометрических характеристик используется теоретическая ширина элементов. Под теоретической шириной понимают расстояние между точками пересечений срединных линий сечения. Как правило, длина срединной линии равняется длине части сечения (стенки, полки, элемента жесткости) за вычетом либо толщины элемента (для стенки и полки с элементом жесткости), либо половине толщины элемента (для элемента жесткости и полки без элемента жесткости). Изначально радиусы закругления не принимаются в расчет. В результате получают идеализированное сечение, состоящее из прямоугольных элементов.

3) влияние углов закругления. EN [3] позволяет применять приближенную процедуру для определения геометрических характеристик. Допускается не учитывать влияние закруглений углов сгиба на сопротивление сечения, если выполняются условия  $r < 5t$  и  $r < 0,1bp$ , где  $bp$  – это теоретическая ширина сечения,  $r$  – радиус сгиба. Если условия не выполняются, сечение может быть также рассмотрено как состоящее из плоских элементов с острыми углами, но геометрические характеристики должны быть уточнены с помощью понижающих коэффициентов [3]. При определении жесткостных характеристик влияние углов сгиба следует учитывать всегда;

4) предел текучести. При расчете на прочность с учетом местной потери устойчивости предел текучести  $f_y$  принимается как  $f_{yb}$  для случая определения эффективной ширины сжатых элементов согласно [3].

5) эффективные характеристики при расчете на эксплуатационную пригодность. Для оценки эксплуатационной пригодности эффективная ширина сжатого элемента определяется по сжимающему напряжению  $\sigma_{com,Ed,ser}$ , соответствующему проверкам предельных состояний эксплуатационной пригодности.

### **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. Стоит отметить, что в качестве альтернативы методу приведенной ширины американские стандарты допускают использовать метод прямого определения несущей способности (DirectStrengthMethod).

*Главные отличия между американским и европейским стандартом:*

#### 1. Расчетная ширина элемента сечения $w$

При определении эффективных характеристик по американскому стандарту 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 EN [3] AISI S100-12, лимитирует максимальное отношение прямолинейных участков к их толщине [2, п. B1.1].

#### 2. Учет потери устойчивости формы сечения

При расчете по 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 [2, ф. Eq.B4-7]. 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 С-образных профилей с элементами жесткости в виде одинарного отгиба. В данной работе 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
	16×47×150×41×16×1,0			6×47×150×47×6×1,0			10×37×195×37×10×1,0		
Полная площадь, мм <sup>2</sup>	255,4	49,8	1,022	241,9	236,3	1,024	273,6	268	1,021
Конечное значение коэффициента $\gamma_d$	0,633/0,697	–	–	0,331	–	–	0,532	–	–
Эффективная площадь, мм <sup>2</sup>	117,7	138,4	0,85	91,9	99,2	0,93	99,9	111,9	0,89

**Заключение.** По данным Европейской ассоциации легких стальных конструкций, в Швеции и Японии доля производства и внедрения легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) составляет 15 % от общего объема жилого строительства, в США – до 35% в зависимости от региона, в Канаде – около 40%. ЛСТК активно осваивается и в России, а в Кыргызстане строительство из ЛСТК с успехом практикуется компанией «Karkas.kg». Но уровень подготовки проектировщиков в этом направлении остается низким. Часто встречается, что в конструкции используют тонкостенный элемент, а его расчет ведут 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. Существующие пояснительные книги, методички, публикации пока не переведены на русский язык.

Настоящая работа была проведена для освещения и объяснения основных особенностей работы тонкостенных холодноформованных элементов. Акцент сделан на расчете эффективных характеристик сечения, учитывающих потерю устойчивости частей сечения и формы сечения. Выполнен качественный и численный анализ методики определения эффективных характеристик по EN и AISI. Для анализа были рассмотрены холодноформованные швеллерообразные профили. Расчет показал разницу в значениях от 10 до 20%. Заметим, 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. EN 1993-1-3-2009\* (02250). Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Ч. 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. Ч. 1-5. Пластинчатые элементы конструкций. (EN 1993-1-5:2006, EN 1993-1-5:2006/AC:2009, IDT). – Минск: Минстрой архитектуры, 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. Устойчивость тонкостенного холодногнутого профиля при изгибе : краткий обзор публикаций / М.Р. Гарифуллин, Н.И. Ватин. – СПб., 2014. – 57 с.