

Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей в среде «SCAD Office»¹

*К.т.н., доцент В. В. Юрченко**

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

Сегодня на отечественный рынок металлоконструкций активно импортируются легкие строительные конструкции из тонкостенных холодногнутых профилей, которые нашли широкое применение в строительной индустрии в каркасных зданиях и сооружениях различного назначения [6].

Характерными чертами легких стальных тонкостенных конструкций являются: малая металлоемкость, высокая технологичность и приспособленность для изготовления на потоковых автоматизированных линиях, транспортировки, а также для конвейерно-блочных и других ускоренных методов монтажа; высокая степень заводской готовности, возможность комплектной поставки целых модульных зданий или их несущих элементов.

Использование легких стальных конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей в строительной практике имеет, безусловно, целый ряд преимуществ, обусловленных, прежде всего, легкостью этих конструкций, и связанным с этим понижением транспортных расходов, сокращением сроков строительства, минимальным использованием строительных машин. В качестве недостатков можно отметить более высокую вероятность повреждения таких конструкций при транспортировании, погрузочно-разгрузочных работах и на монтаже.

Внедрение в практику строительства конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей является актуальным и экономически обоснованным. Известен ряд областей применения, где эффективность каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей является наиболее высокой, а именно: жилые одноэтажные здания, в т.ч. коттеджи, здания административного и торгово-бытового назначения, крытые спортивные сооружения, торгово-выставочные павильоны, автомастерские, автозаправочные станции, бескрановые производственные цеха, склады, ангары, фермы, овощехранилища, оранжереи, теплицы [2].

Однако широкое использование конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей отечественного производства задерживается, прежде всего, из-за несовершенства отечественной нормативной базы и недостаточного опыта экономического и надежного проектирования таких конструкций.

Деформирование и распределение напряжений в обычных стержнях и в тонкостенных стержнях открытого профиля существенно различаются, поскольку для последних не выполняются (полностью или частично) гипотеза плоских сечений Эйлера-Бернулли и принцип локальности действия взаимно уравновешенной системы сил Сен-Венана. В тонкостенных стержнях открытого профиля происходит значительная деформация сечений, что существенно отображается на условиях их работы под нагрузкой [8, 9].

При нагружении тонкостенного стержня открытого профиля из-за стеснения деформации сечения появляются дополнительные секториальные напряжения, которые вносят значительный вклад в суммарные напряжения, существенно увеличивая или же уменьшая их. Именно недостаточной изученностью вопроса относительно влияния стесненного кручения на несущую способность конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей можно объяснить тот факт, что в Рекомендациях [1], разработанных ЦНИИПСК им. Мельникова, было резко ограничено расчетное сопротивление стали, принятое в размере 75% (в некоторых случаях 80%) от нормативной границы текучести.

Статический анализ и определение внутренних усилий в элементах конструкции из тонкостенных холодногнутых стержней открытого профиля при учете стесненного кручения является сложной задачей. В современных вычислительных программных комплексах используются типы конечных элементов, которые позволяют учесть до шести степеней свободы в узлах стержневой системы, соответствующие линейным перемещениям и поворотам в этих узлах как жестких тел. В то же время, теория тонкостенных стержней открытого профиля требует введения седьмой степени свободы в узлах, примыкающих к тонкостенному стержню [7, 14]. Эта седьмая степень свободы и отвечает за деформационную составляющую узлового перемещения (рис. 1).

Расчет конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля может выполняться при использовании оболочечных конечных элементов. Однако это требует тщательного выбора сетки конечных элементов, с помощью которой описываются элементы конструкции. При этом, соответственно, количество узлов и элементов увеличивается по сравнению со стержневой аппроксимацией на несколько порядков [14].

¹ С глубокой признательностью Э.З. Криксунову и А.В. Перельмутеру (SCAD Soft, Киев) за советы и конструктивные замечания относительно данной работы

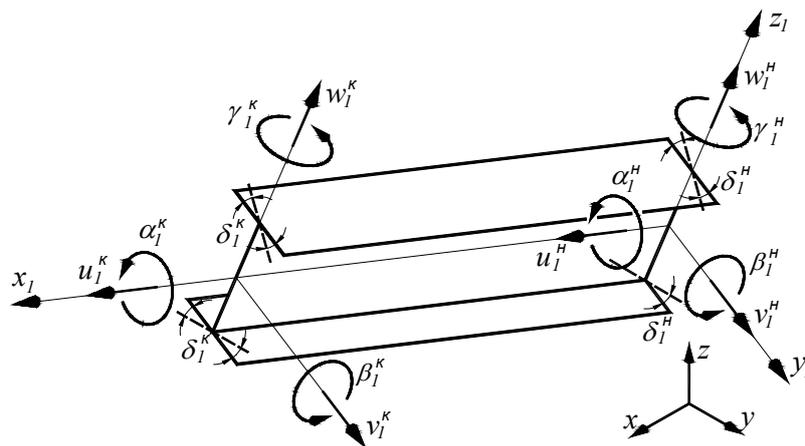
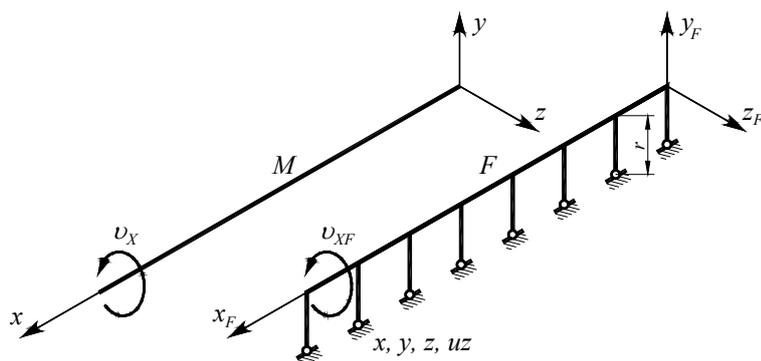


Рисунок 1. Конечно-элементная модель тонкостенного стержня [14]

Для расчета стержневых конструкций, состоящих из тонкостенных стержней открытого профиля, с использованием вычислительного комплекса SCAD [10], можно воспользоваться аппроксимацией каждого стержня двумя стержнями (основным и фиктивным), которые рассматриваются в классической постановке, то есть такими, которые соответствуют теории Бернулли-Эйлера для стержней сплошного сечения, и поэтому не требуют введения в расчетную схему каких-либо дополнительных степеней свободы. Между перемещениями поперечных сечений основного и фиктивного стержней устанавливается связь, обеспечивающая равенство углов поворотов сечений относительно их продольной оси: $\theta_x = \theta_{xF}$. Кроме того, на перемещения фиктивного стержня накладывается система внешних связей (рис. 2). Подробно о принципах построения бистержневой модели конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля изложено в книге [12]. Там же показано, что построенная бистержневая модель энергетически эквивалентна исходному тонкостенному стержню.



$$EI_{yF} = \frac{EI_{\omega}}{r^2}$$

$$\theta_x = \theta_{xF}$$

$$M_{yF} = -EI_{yF} (\omega_F)''$$

$$B = M_{yF} r$$

$$M_{\omega} = Q_{zF} r$$

Рисунок 2. Бистержневая модель тонкостенного стержня

При таком подходе внутренние усилия в фиктивном стержне можно интерпретировать как обобщенные усилия в исходном тонкостенном стержне, возникающие при стесненном кручении. А именно, бимомент B и момент стесненного кручения M_{ω} совпадают с точностью до множителя r соответственно с изгибающим моментом M_{yF} и поперечной силой Q_{zF} , которые возникают в фиктивном стержне.

Исследованию проблемы устойчивости несущих элементов из тонкостенных холодногнутых профилей посвящены работы [4, 5, 16].

Критические напряжения для различных форм потери устойчивости тонкостенного стержня открытого профиля могут быть определены с использованием оболочечной модели в среде вычислительного комплекса SCAD [10], реализующего метод конечных элементов. При этом задача устойчивости рассматривается в своей классической постановке как для упругой системы в предположении, что все приложенные к конструкции внешние нагрузки (а соответственно, и внутренние усилия) увеличиваются пропорционально одному и тому же параметру λ . Те значения параметра λ , при котором матрица жесткости конструкции впервые перестает быть положительно определенной, является критическим, а соответствующее значение параметра λ является коэффициентом запаса устойчивости [13, 19]. Так, решение задачи упругого выпучивания С-образного тонкостенного стержня выполнено в работе [11] и представлено на рис. 3.

Как видно из рис. 3, кроме привычных местной и общей форм потери устойчивости (по изгибной и изгибно-крутильной формам), рассматривается также специальная форма потери устойчивости (т.н. потеря устойчивости формы поперечного сечения или же потеря устойчивости вследствие искажения поперечного сечения), которая характерна для тонкостенных стержней открытого профиля.

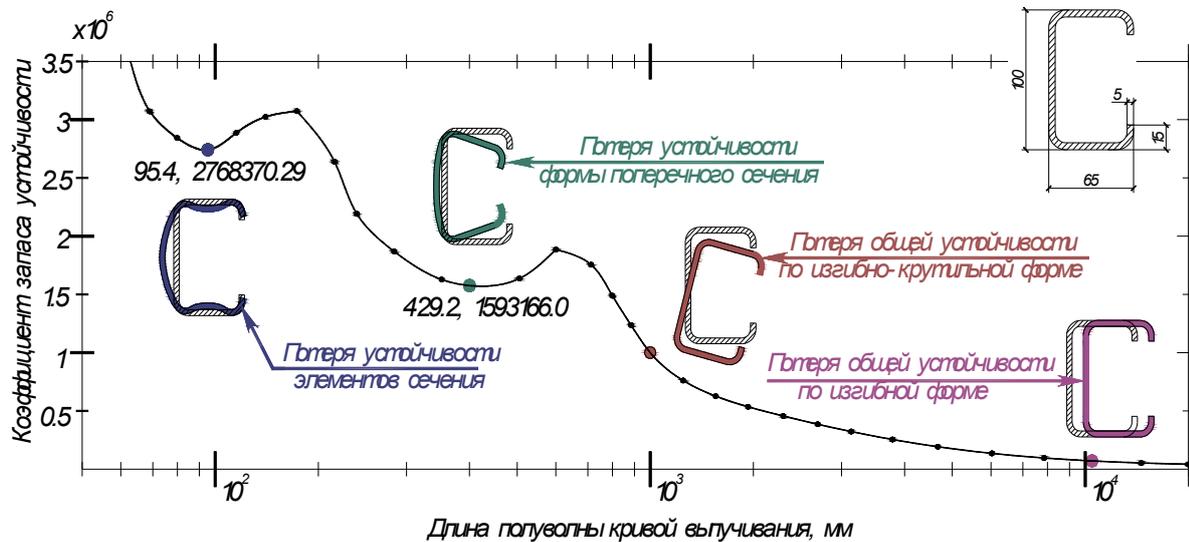


Рисунок 3. Решение задачи устойчивости С-образного тонкостенного стержня с использованием оболочечной модели

Характерной особенностью несущих элементов из тонкостенных холодногнутых профилей является возможность их закритической работы (после потери местной устойчивости сжатых элементов сечения, а также после потери устойчивости формы поперечного сечения). Потеря местной устойчивости тонкой подкрепленной пластины, представляющей собой элемент сечения, приводит к неравномерному распределению нормальных напряжений в сечении такой пластины, которое характеризуется концентрацией нормальных напряжений возле подкрепленных краев пластины, т.е. фактически, в местах сопряжения тонких пластин, из которых состоит сечение (рис. 4). При вычислении несущей способности поперечного сечения тонкостенного элемента используется концепция «эффективной ширины» элемента [18] (рис. 5), впервые предложенная фон Карманом еще в 1932 году [20].

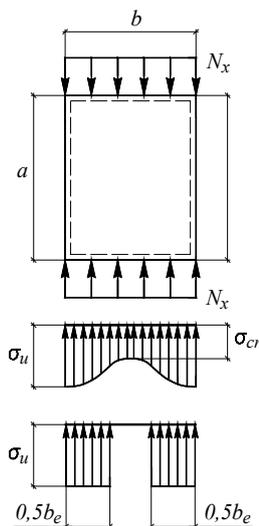


Рисунок 4. Неравномерное распределение нормальных напряжений в сечении пластины вследствие потери устойчивости

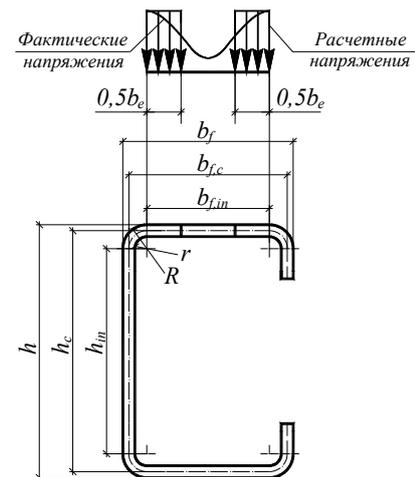


Рисунок 5. Эффективная ширина сжатой полки С-образного элемента

В более полной мере вопрос расчета и проектирования несущих элементов из тонкостенных холодногнутых сечений открытого профиля отражен в Европейских нормах проектирования [17]. Они регламентируют выполнять проверки прочности и устойчивости таких элементов с использованием эффективных (уменьшенных) размеров сечений, учитывающих как возможность местной потери устойчивости сжатых элементов сечения, так и потерю устойчивости формы поперечного сечения (рис. 6, 7).

Юрченко В.В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей в среде «SCAD Office»

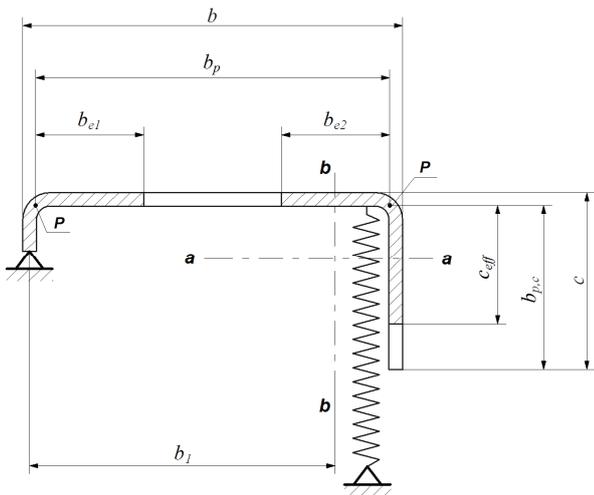


Рисунок 6. Расчетная схема полки с отгибом согласно EC3

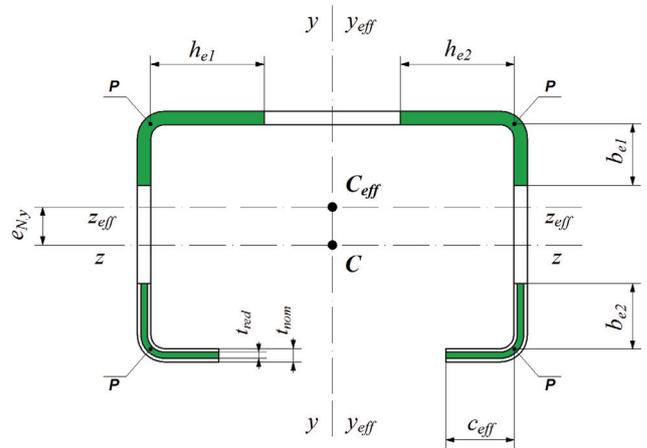


Рисунок 7. Эффективное поперечное сечение С-образного профиля согласно EC3

Ниже приведен расчет каркаса здания из тонкостенных холодногнутых профилей при помощи программы SCAD на примере типового здания склада компании Llentabhallen Sp.z.o.o. (рис. 8).



Рисунок 8. Типовое здание склада компании Llentabhallen Sp.z.o.o.

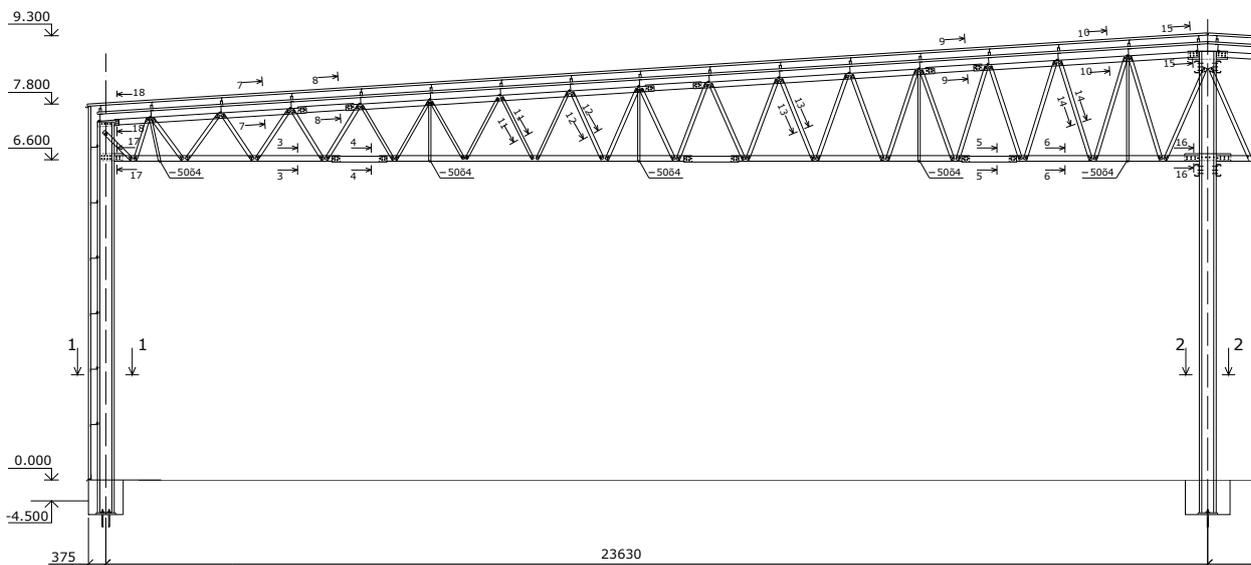


Рисунок 9. Конструктивная схема поперечной рамы каркаса здания

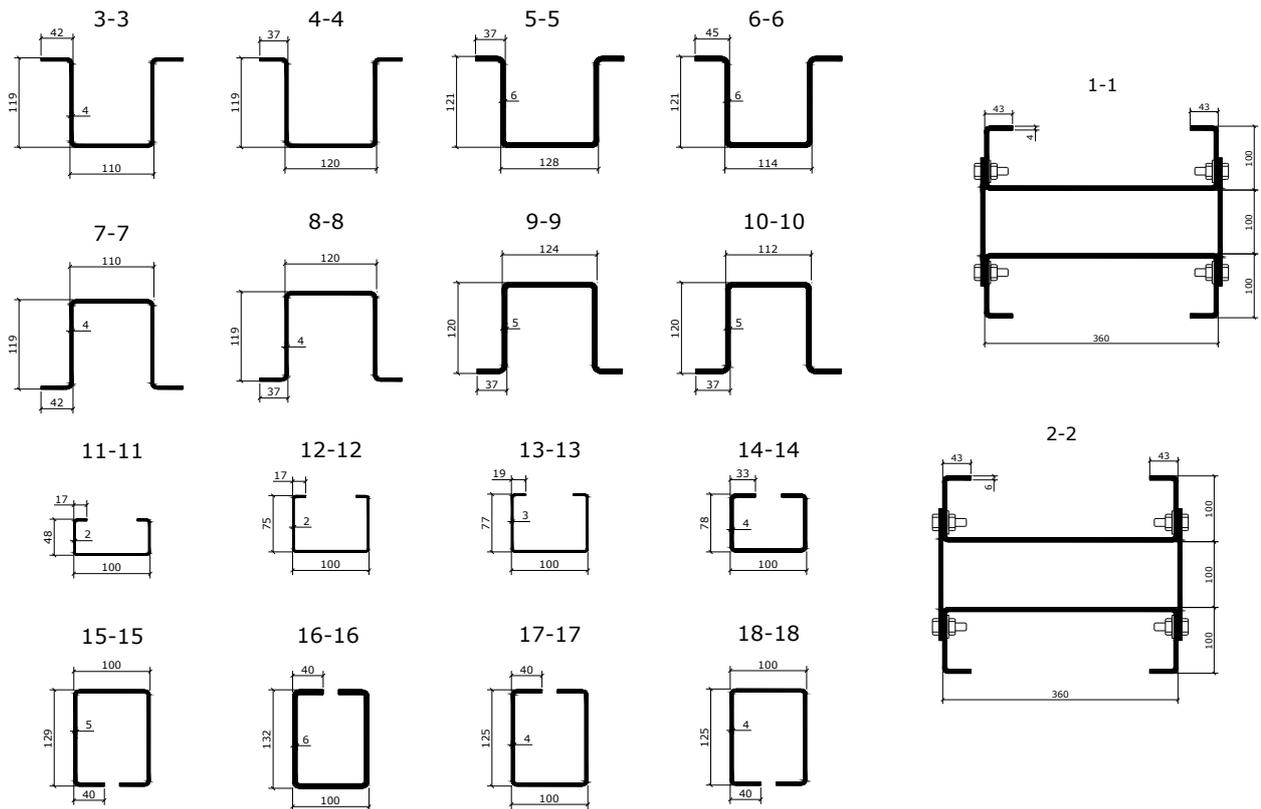


Рисунок 10. Типы и размеры поперечных сечений несущих элементов решетчатого ригеля

Рисунок 11. Типы и размеры поперечных сечений колон каркаса

Основными несущими конструкциями здания служат двухпролетные поперечные рамы общим пролетом 48 м, шаг поперечных рам составляет 6 м (рис. 9). Ригели поперечных рам запроектированы в форме двускатных трапециевидных ферм. Высота зданий составляет 7,8 м – на уровне карнизного узла рамы, и 9,3 м – на уровне конькового узла.

Все несущие элементы поперечных рам зданий запроектированы из тонкостенных холодногнутых профилей С-образного и корытообразного сечений (рис. 10, 11). Кровельные прогоны в проекте здания приняты из Z-образных холодногнутых оцинкованных профилей высотой 150 мм, которые размещены с шагом в плане 1,5 м.

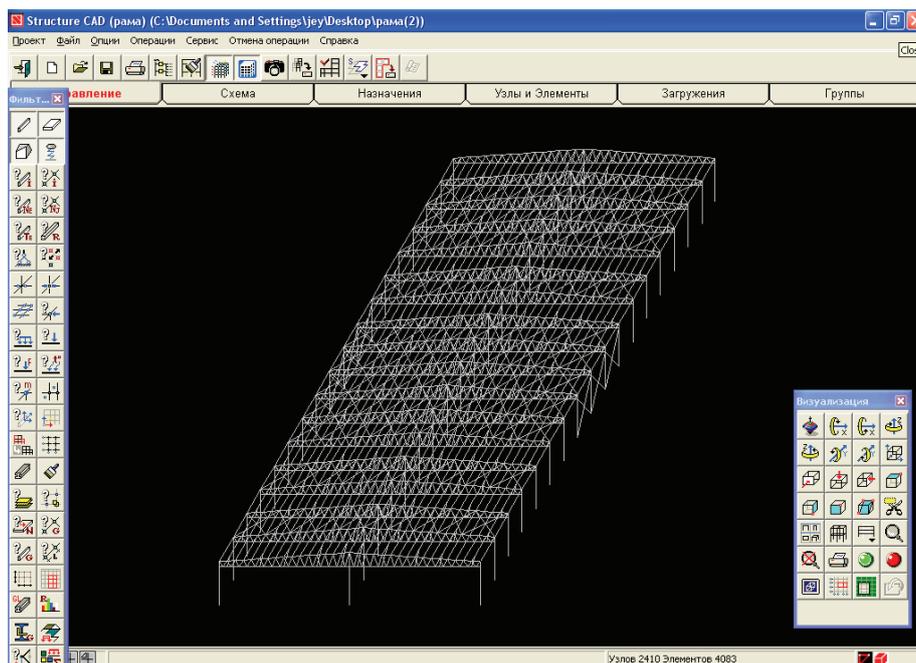


Рисунок 12. Трехмерная конечно-элементная модель каркаса здания

Юрченко В.В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей в среде «SCAD Office»

Анализ напряженно-деформированного состояния каркаса здания из тонкостенных холодногнутых профилей выполнялся при помощи программы SCAD [10] с использованием трехмерной конечно-элементной модели (рис. 12).

Расчетная схема сквозного ригеля поперечной рамы каркаса здания была принята с неразрезными поясами и элементами решетки, которые шарнирно примыкают к узлам верхнего и нижнего пояса фермы (рис. 13).

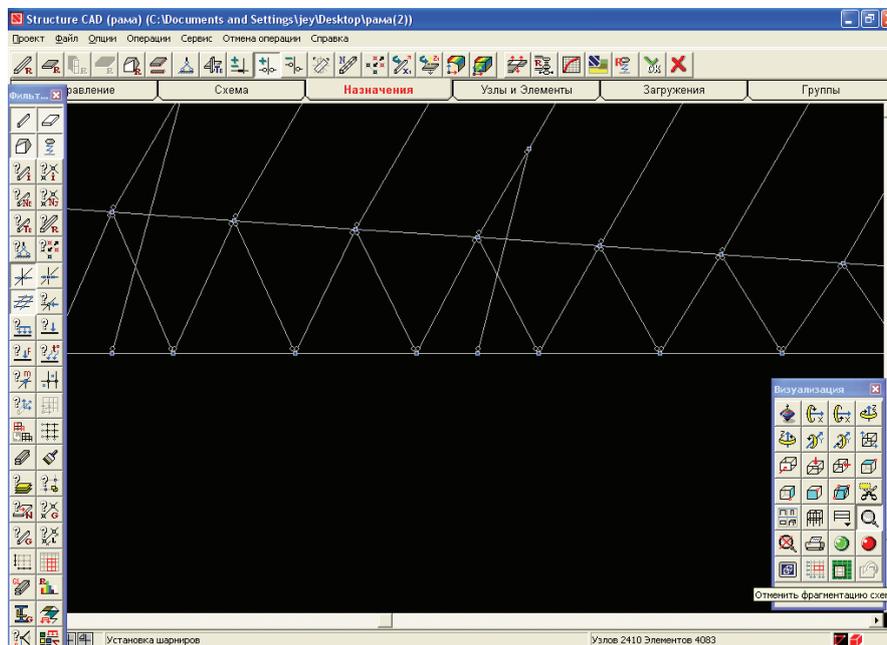


Рисунок 13. Расчетная схема решетчатого ригеля поперечных рам каркаса

Следует отметить, что использование тонкостенных холодногнутых профилей в качестве стеновых и кровельных прогонов за рубежом является общепризнанным стандартом. При этом, максимальная эффективность таких профилей при пролетах до 10 м достигается за счет их проектирования по неразрезной схеме, что конструктивно осуществляется сопряжением прогонов по длине при помощи нахлесточного соединения на болтах. Нахлест прогонов осуществляется в местах крепления прогонов к ригелям поперечных рам, т.е. в расчетных сечениях, где возникают наибольшие изгибающие моменты.

Для моделирования опирания неразрезных прогонов шарнирно сверху на верхний пояс фермы, удобно воспользоваться объединением перемещений опорных узлов прогонов и соответствующих узлов верхнего пояса ферм (рис. 14, 15).

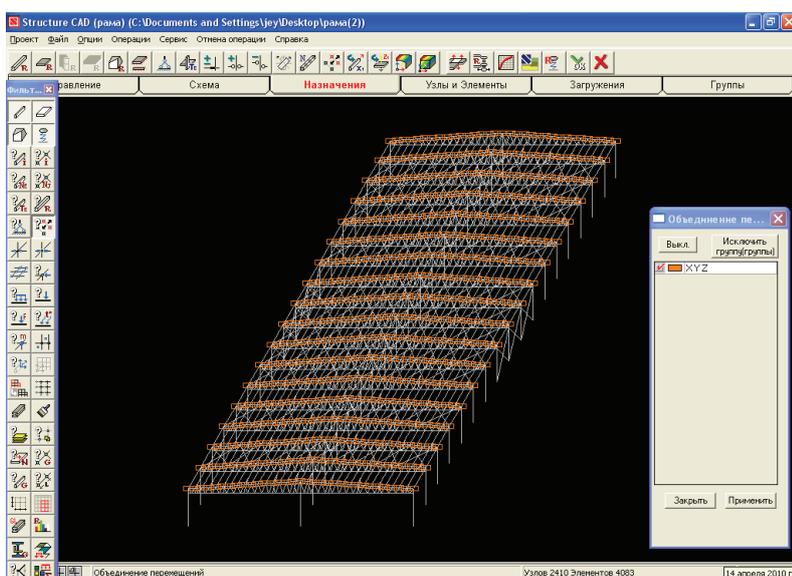


Рисунок 14. Трехмерная конечно-элементная модель каркаса здания с использованием объединений перемещений в опорных узлах прогонов покрытия и в узлах верхнего пояса решетчатых ригелей

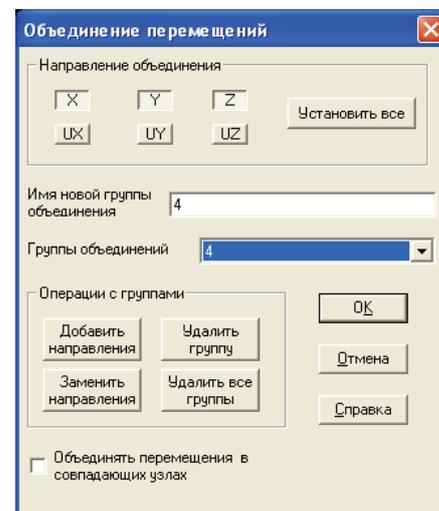


Рисунок 15. Параметры объединения перемещений

Пространственная жесткость и геометрическая неизменяемость каркаса здания обеспечивается устройством по длине здания жестких блоков, создаваемых путем раскрепления двух соседних рам между собой системой связей. Горизонтальные связи по верхним поясам ферм приняты крестовыми, с гибкими раскосами и жесткими распорками, функцию которых выполняют прогоны покрытия. Вертикальные связи между фермами устроены с шагом 4,5 и 6,0 м и конструктивно оформлены в виде подкосов, идущих от прогонов покрытия к нижнему поясу ферм (рис. 16).

Для моделирования гибких элементов связей удобно воспользоваться односторонними двухузловыми связями, которые работают только на растяжение и отключаются при сжатии (рис. 17).

Для определения типов жесткости стержневой системы из тонкостенных холодногнутых профилей использовалась программа ТОНУС [10], предназначенная для формирования тонкостенных сечений и расчета их геометрических характеристик. Программа ТОНУС позволяет рассматривать произвольные (в том числе открыто-замкнутые) профили. Модель тонкостенного поперечного сечений в этом сателлите формируется из полосок путем задания их толщины и определения положения их срединной линии (рис. 18).

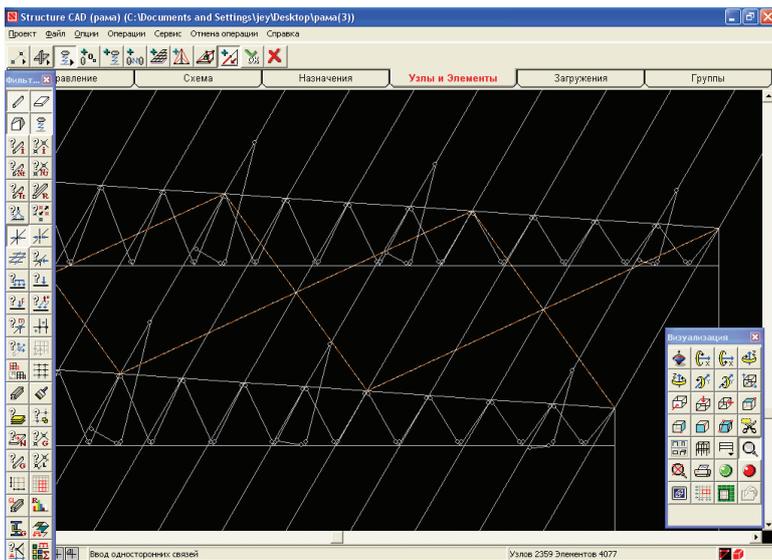


Рисунок 16. Трехмерная конечно-элементная модель каркаса здания с односторонними связями

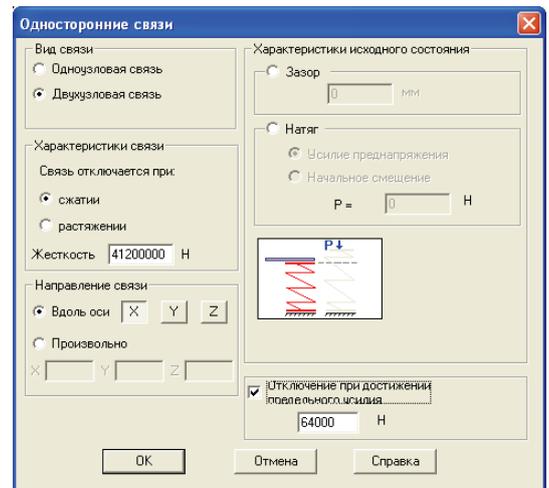


Рисунок 17. Параметры односторонних связей

Для созданного пользователем тонкостенного сечения вычисляются все его геометрические характеристики (рис. 19). При этом, для вычисления координат центра изгиба и секториального момента инерции методом конечных разностей (методом сеток) решается дифференциальное уравнение Лапласа на области сечения с краевыми условиями на границе, зависящими от того, является ли тот или иной участок границы частью внешнего контура или принадлежит внутреннему отверстию.

Необходимо отметить, что геометрические характеристики сечения вычисляются всегда как для сплошностенчатого сечения (т.е. податливость соединительных решеток или планок не учитывается).

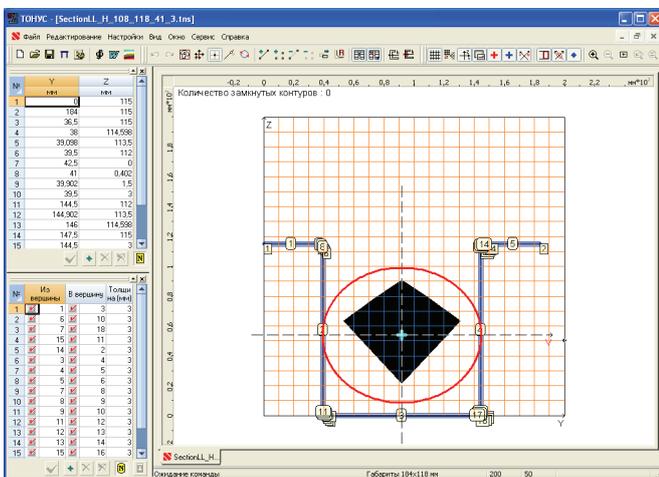


Рисунок 18. Главное окно программы ТОНУС с моделью тонкостенного поперечного сечения

Геометрические характеристики			
Параметр	Значение	Единицы измерен	
A	8,4	см ²	
A _{y,u}	4,44	см ²	
A _{v,z}	3,96	см ²	
α	-90	град	
I _y	68,865	см ⁴	
I _z	144,149	см ⁴	
I _t	0,252	см ⁴	
I _w	1619,702	см ⁶	
I _y	2,863	см	
I _z	4,143	см	
W _{u+}	28,83	см ³	
W _{u-}	28,83	см ³	
W _{v+}	14,749	см ³	
W _{v-}	22,722	см ³	

Рисунок 19. Результаты работы программы ТОНУС

Понятно, что вычисление геометрических характеристик сечений не является самоцелью. Результаты расчета программы ТОНУС в дальнейшем используются в качестве исходных данных при определении типов жесткости стержневых элементов пространственной модели каркаса здания. При этом, описание типов жесткости может быть выполнено как с помощью численного описания характеристик жесткости, так и с использованием импорта рабочих файлов программы ТОНУС с данными пользовательских сечений (рис. 20).

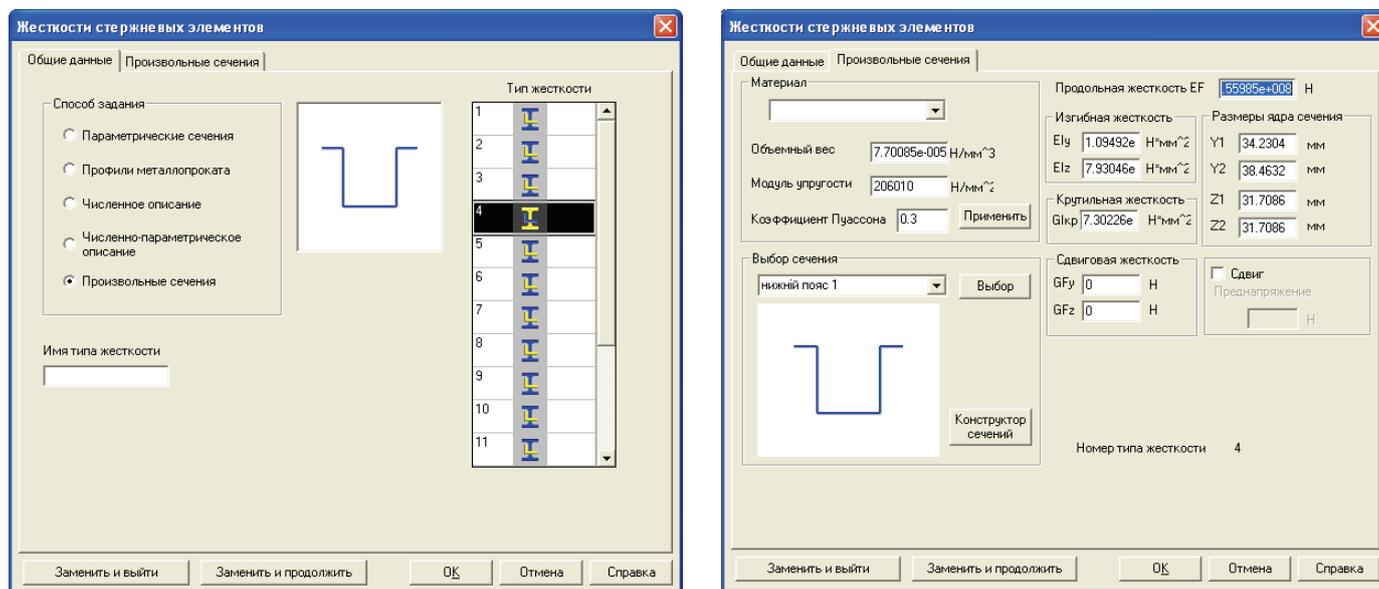


Рисунок 20. Описание типов жесткости конструкции с использованием импорта рабочих файлов программы ТОНУС с данными пользовательских сечений

Статический анализ конечно-элементной модели каркаса здания возвращает набор значений внутренних усилий, действующих в расчетных сечениях несущих элементов каркаса. На базе информации о значениях внутренних усилий в программе ТОНУС определяются нормальные напряжения, и строится поле нормальных напряжений (рис. 21).

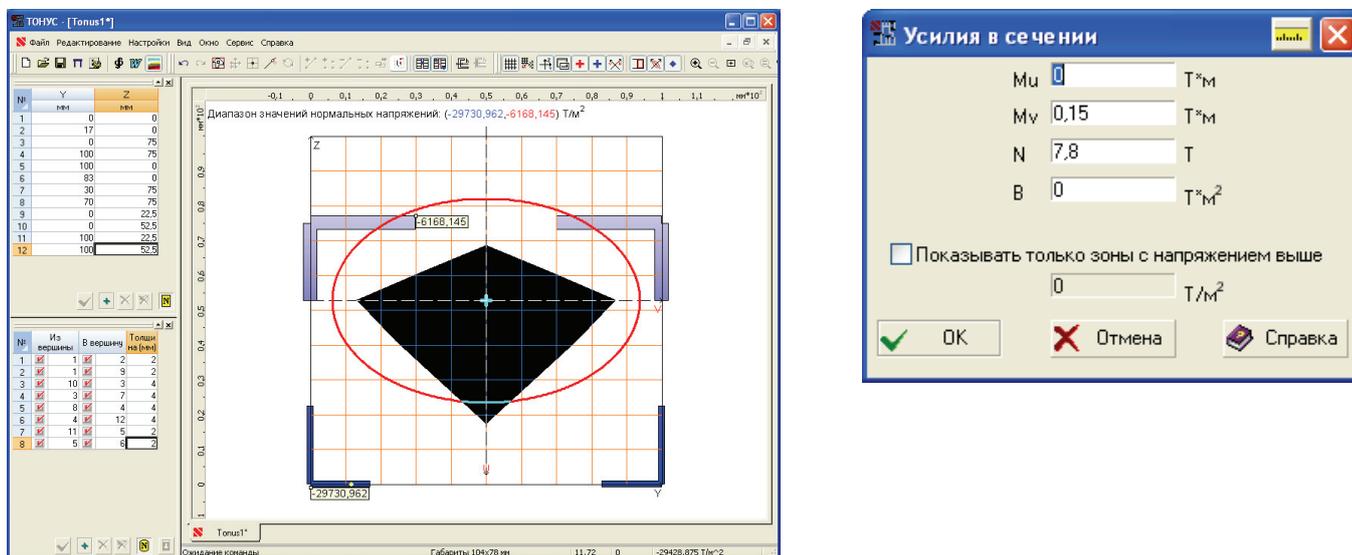


Рисунок 21. Вычисление поля нормальных напряжений для эффективного поперечного сечения тонкостенного стержня

Выводы

Итак, в работе показано, что широкое использование конструкций из тонкостенных холодногнутох профилей отечественного производства задерживается, прежде всего, вследствие несовершенства нормативной базы и недостаточного отечественного опыта экономического и надежного проектирования таких конструкций.

Уделено внимание вопросу статического анализа и определения внутренних усилий в элементах конструкции из тонкостенных холодногнутох стержней открытого профиля при учете стесненного кручения.

Юрченко В.В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутох профилей в среде «SCAD Office»

Приведены исследования по проблеме устойчивости несущих элементов из тонкостенных холодногнутых профилей, а также их закритической работы (после потери местной устойчивости сжатых элементов сечения и после потери устойчивости формы поперечного сечения).

В качестве примера приведен расчет каркаса здания из тонкостенных холодногнутых профилей типового здания склада компании Llentabhallen Sp.z.o.o. в среде «SCAD Office», в котором представлены особенности конечно-элементного моделирования таких каркасов, а также их поверочных расчетов.

Литература

1. Айрумян Э. Л. Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутого стальных оцинкованных профилей производства ООО «Балтпрофиль» / ЦНИИПСК им. Мельникова. – М., 2004. – 64 с.
2. Айрумян Э. Л., Каменщиков Н.И. Рамные конструкции стального каркаса из оцинкованных гнутых профилей для одноэтажных зданий различного назначения // Мир строительства и недвижимости. – 2006. – №36. – С. 9-11.
3. Белов И. Д., Юрченко В. В. Разработка и внедрение эффективных конструкций зданий из тонкостенных холодногнутого профилей: современное состояние проблемы и программа исследований // Сборник научных работ (Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди), выпуск 20. – Ровно : НУВХП, 2010. – С. 364-369. (на украинском языке).
4. Белый Г. И. Расчет упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформируемой схеме // Межвуз. темат. сб. тр., № 42 (Строительная механика сооружений). – Л. : ЛИСИ, 1983. – С. 40-48.
5. Белый Г. И. О расчете упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформируемой схеме с учетом касательных напряжений деформаций сдвига // Межвуз. темат. сб. тр., № 32 (Металлические конструкции и испытания сооружений). – Л. : ЛИСИ, 1983. – С. 42-48.
6. Ватин Н. И., Попова Е. Н. Термопрофиль в легких стальных строительных конструкциях. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2006. – 63 с.
7. Ватин Н. И., Рыбаков В. А. Расчет металлоконструкций: седьмая степень свободы // СтройПРОФИЛЬ. – 2007. – № 2(56). – С. 60-53.
8. Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни. – М. : Физматгиз, 1959. – 595 с.
9. Джанелидзе Г. Ю., Пановко Я. Г. Статика упругих тонкостенных стержней. – М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 208 с.
10. Карпиловский В. С., Криксунов Э. З., Маляренко А. А., Перельмутер А. В., Перельмутер М. А. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD. – М. : Издательство АСВ, 2008. – 592 с.
11. Короткий С. В., Юрченко В. В. Определение критических сил для локальных форм упругого выпучивания центрально-сжатых тонкостенных стержней открытого профиля // Сборник тез студенческих докладов. Отв. за выпуск П. П. Лизунов. – Киев : КНУСА, 2009. – С. 164-166 (на украинском языке).
12. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – Киев : Сталь, 2002. – 600 с.
13. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы. Том 1. – М. : Издательство SCAD Soft, 2007. – 670 с.
14. Туснин О. Р. Конечный элемент для численного расчета конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля // Металлические конструкции. – 2009. – №1, т. 15. – С. 73-78. (на украинском языке)
15. Юрченко В. В. Проблема оптимального проектирования поперечных рам каркасов из тонкостенных холодногнутого профилей // Научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов КНУСА: тезы докладов. Ч.1. – Киев : КНУСА, 2009. – С. 44-46. (на украинском языке)
16. Dubina D., Ungureanu V., Szabo I. Codification of imperfections for advanced finite analysis of cold-formed steel members // Proceedings of the 3rd ICTWS, 2001. – Pp. 179-186.
17. ENV 1993-1-3 EuroCode 3: Design of steel structures. Part 1.3: General rules. Supplementary rules for cold formed thin gagemembers and sheeting. European Committee for Standardisation CEN. – Brussels, 1996.
18. Koiter, W.T., The effective width of flat plates for various longitudinal edge conditions at loads far beyond the buckling load, Rep. No. 5287, National Luchtvaart Laboratorium (The Netherlands).
19. Sarawit A. T., Kim Y., Bakker M. C. M., Peköz T. The finite element method for thin-walled members-applications // Proceedings of the 3rd ICTWS, 2001. – Pp. 437-448.
20. von Karman, T., Sechler, E.E., Donnell, L.H., The strength of thin plates in compression, Trans ASME. – 1932. – Vol. 54. – Pp. 53-57.

* Виталина Витальевна Юрченко, г. Киев, Украина

Тел. раб.: +38-044-244-96-65; эл. почта: vitalinay@rambler.ru

Юрченко В.В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутого профилей в среде «SCAD Office»