

Конечноэлементное моделирование перфорированных стоек открытого сечения из холодногнутых профилей

*Магистрант Д.С. Шатов**,

ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Доля построек из легких тонкостенных стальных профилей (ЛСТК) в России растет с каждым годом, однако нормативная база и качество расчетов остаются на невысоком уровне. Отечественных норм на проектирование тонкостенных конструкций нет, а большой объем ручных расчетов зачастую отпугивает российских конструкторов от применения зарубежных Еврокодов. Решение этих проблем позволило бы еще быстрее развиваться сфере легких металлических конструкций.

Применение тонкостенных холодногнутых профилей в строительстве дает снижение расхода металла. Их использование в элементах конструкций позволяет сэкономить 10-12% металла и значительно снизить трудоемкость изготовления и монтажа. Растет и доля таких профилей из высокопрочной стали. Высокопрочные стали обычно имеют маленькую или вообще не имеют площадки текучести [1], и их пластичность довольно низкая, что существенно отличает их от обычной стали. Широкое применение получил хорошо себя зарекомендовавший профиль с просечками – термопрофиль [2], использование которого позволяет избежать наличия мостика холода в конструкции.

Проведенный анализ отечественных исследований [3,4,5] показал, что в настоящее время идет активная научная работа по разработке и усовершенствованию методик расчета, внедрению новых идей и положений, их автоматизации. Одним из таких направлений является рассмотрение метода конечных элементов в качестве помощника для проведения расчетов.

Принцип действия метода конечных элементов применительно к оболочечным схемам следующая. Модель разбивается на узлы и конечные элементы, при этом каждый узел имеет 6 степеней свободы. Вся нагрузка также сводится к шести компонентам для каждого узла, соответствующим шести степеням свободы; составляется матрица жесткости; разрешается глобальная система дифференциальных уравнений, результатом чего являются перемещения по 6 направлениям для каждого узла. После этого происходит переход к эквивалентным напряжениям в каждой точке элемента-пластины по четвертой теории прочности.

Большой вклад в развитие теории тонкостенных конечных элементов (ТКЭ) внес А.Р. Туснин. Возможно применение тонкостенных конечных стержневых элементов, учитывающих не только чистое, но и стесненное кручение при совпадении и несовпадении центров тяжести и изгиба, наличии или отсутствии эксцентриситетов в узлах элементов [6]. Кроме трех линейных и трех угловых степеней свободы в каждом узле, учитываемых при расчете обычных стержневых систем, для конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля учитывается седьмая степень свободы узла – деформация сечения [7]. Таким образом, ТКЭ с узлами в начале и конце имеет 14 степеней свободы.

Также возможно применение обычных стержневых конечных элементов. С учетом того, что теория тонкостенных стержней открытого профиля требует введения седьмой степени свободы, следует обратиться к работе А.В. Перельмутера и А.И. Сливкера [8,9]. Специальный прием позволяет обойти эти затруднения и вводить в каждый из узлов расчетной схемы не более 6 степеней свободы. Этот прием основан на построении специальной модели – «бистержневой модели тонкостенного стержня». Именно это обстоятельство и позволяет выполнять расчет тонкостенного стержня, оставаясь в рамках ограничений стандартного программного обеспечения, оперирующего конечными элементами с твердотельными узлами.

Но помимо тонкостенных конечных стержневых и стержневых элементов есть и оболочечные элементы. В расчетной практике применяется моделирование тонкостенного стержня набором оболочечных конечных элементов, с помощью которого можно учесть практически все особенности работы такого сооружения. Детальная расчетная модель позволяет корректно учесть возможность потери местной и общей устойчивости.

Из современников следует обратить внимание на работы исследователей: И.В. Астахов [10], Г.И. Белый [11], Ю. Ченг и, Б.В. Шафер (США, AISI) [12], К. Расмуссен (Австралия) [13], Г.Д. Хэнкок (Австралия) [14], которые занимались и продолжают заниматься вопросами напряженно-деформированного состояния и устойчивости тонкостенных перфорированных конструкций.

Статья посвящена исследованию работы тонкостенных профилей с применением методов численного анализа. Рассматривается решение задач деформирования профилей постоянной жесткости под действием сжатия.

Целью работы является дальнейшее развитие теоретической и практической составляющей численных методов для решения задач линейного и нелинейного деформирования тонкостенных профилей при различных граничных условиях. Решены задачи экспериментально-теоретического исследования с разработкой практических методов расчета на пространственную устойчивость элементов конструкций из гнутых тонкостенных профилей с учетом возможной потери устойчивости. В целях сравнения и подтверждения достоверности полученных решений приведены результаты экспериментов [15] тех же задач, выполненных в Дортмундском техническом университете в 2009 году под руководством профессора Дитера Унгермана.

Испытуемые стойки применяются в качестве несущих элементов каркаса стеллажей и имеют перфорацию по всей высоте профиля для крепления с горизонтальными балками. В тесте постепенно прикладывалась сжимающая нагрузка, приложенная сверху по оси профиля, достигая значения в 93 кН. Посередине высоты стойки были закреплены четыре датчика для измерения деформаций. Два датчика на стенке профиля, два – на полках. По результатам испытаний были составлены таблицы и графики, отражающие перемещения четырех точек поперечного сечения посередине высоты стойки в зависимости от прикладываемой нагрузки. По этим данным хорошо видно, какой элемент претерпевает наибольшие деформации и выходит из устойчивости. Во всех тестах стойки теряли устойчивость из-за резкого выключения из работы обеих полок, которые выгибались наружу и имели перемещение по горизонтали для одной из полок с 3 мм до -26 мм.

В работе рассматривается перфорированный профиль длиной 1600 мм, толщиной металла 2,6 мм, размеры поперечного сечения указаны на рис. 1. В программе расчета методом конечных элементов была построена оболочечная модель профиля, смоделированы отверстия и приложена нагрузка, равная критической силе, полученной в ходе эксперимента. При применении оболочечных моделей для расчета на устойчивость необходимо делать несколько расчетов с разными размерностями сеток, сетка должна быть достаточно мелкой, количество получаемых форм потери устойчивости должно быть более 1.

С помощью метода конечных элементов расчет сводится к рассмотрению трех составляющих:

- распределение напряжений по высоте профиля;
- деформации;
- форма потери устойчивости.

В работах зарубежных ученых показано [16,17], что распределение напряжений при расчете МКЭ хорошо сочетается с результатами испытаний. Анализ напряженного состояния и распределения напряжений позволил охарактеризовать взаимосвязь величины перемещений точек профиля и нагрузки наружного контура. Получено, что уровень напряжений на наружном контуре не превышает 10 %, а на внутреннем контуре составляет 25%. Следовательно, наружный контур разгружается за счет действия торцевых сил, внутренний нагружается дополнительно.

Обычно в тонкостенных стальных профилях имеет место одна из четырех основных форм потери устойчивости: местная, потеря устойчивости формы поперечного сечения, общая и крутильная. Возникновение одной из форм зависит от длины, однако указанные формы могут возникнуть и одновременно. В открытых П-образных профилях вероятнее всего произойдет местная или общая потеря устойчивости или возникнет их одновременное проявление, крутильная потеря устойчивости маловероятна. Но для элементов, изготовленных из очень тонкого стального листа (толщиной менее 1 мм), может возникнуть крутильная форма потери устойчивости, которая будет являться причиной отказа работы сооружения.

При рассмотрении задачи устойчивости центрально сжатых стоек было установлено, что когда сжимающая сила достигает некоторого значения, первоначально прямолинейная форма равновесия становится неустойчивой. Наряду с прямолинейной формой равновесия становятся возможными и бесчисленные изгибные формы равновесия: изгиб происходит в плоскости наименьшей жесткости. Полученная в работе изгибно-крутильная форма потери устойчивости представлена на рис. 2.

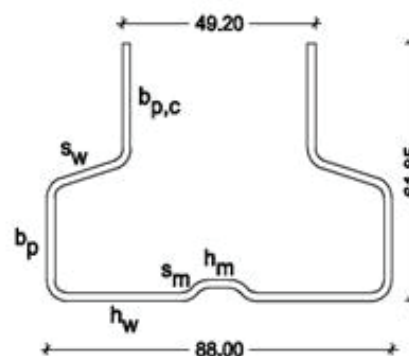
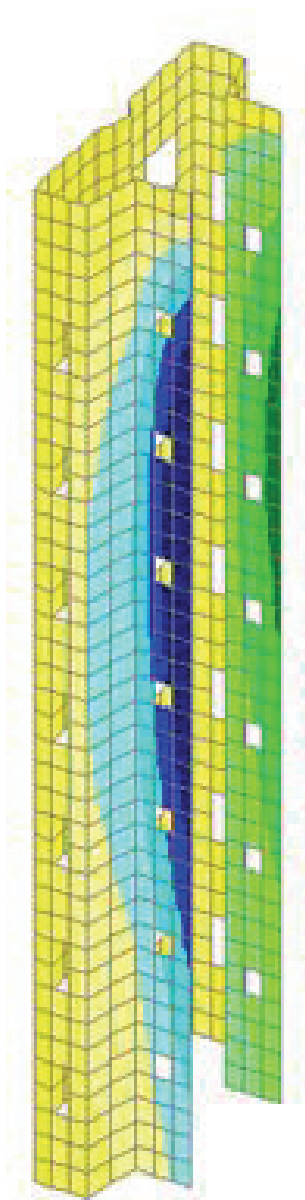


Рисунок 1. Поперечное сечение профиля



**Рисунок 2. Форма
потеря устойчивости**



**Рисунок 3. Деформации
профиля**

В работе были рассмотрены деформации элементов профиля. Исследование предельных возможностей позволило получить функциональную зависимость критической деформации от величины нагрузки с достаточной для практического применения точностью и учетом физико-механических явлений, сопровождающих пластическую деформацию. Из характера деформации в процессе нагружения видно, что возникла некоторая равновесная форма деформаций, которая, однако, имела локальный характер.

Относительно локальных равновесных форм деформаций следует заметить, что для профилей другого типа в процессе нагружения возможно достижение таких форм равновесия, при которых предельная нагрузка может иметь большее значение, чем ранее достигнутая. Характер перемещений представлен на рис. 3. В работе выявлено, что наличие тонкой стенки профиля способствует увеличению депланации и потери устойчивости. Следует отметить, что для «толстого» сечения депланация не является определяющим фактором.

Выполнена серия расчетов, позволяющая найти критическую нагрузку. Сравнение результатов численного метода с экспериментальным показало расхождение на 10,2%. Критическая нагрузка МКЭ для стоек длиной 1600 мм составила 121 кН, экспериментальная – 108,6 кН.

В заключение можно сделать следующие выводы.

Обычно считается, что если предварительное описание элементов, взаимосвязи между усилиями, деформациями и перемещениями в узлах выполнены точно, а затем так же точно составлены условия сопряжения элементов, то метод дает точные результаты. Однако сделать это удастся не всегда, что приводит к решению задач с тем или иным приближением.

В этом случае точность решения повышается с увеличением числа элементов. Очень важным является также обоснованный выбор типа элемента, характер сетки разбиения, учитывающий особенности рассматриваемой конструкции, наличие концентраторов напряжений, включений, подкреплений и т.п.

Конечноэлементные исследования дают правдоподобные результаты и показывают ожидаемую тенденцию. Форма деформации и распределения напряжений согласуются с экспериментальными данными. Экспериментальные исследования показали, что в среднем разрушающее усилие было меньше, чем теоретическое, которое было определено при рассмотрении деформаций стойки. Некоторое расхождение с результатами расчета объясняется тем, что в программе МКЭ геометрические характеристики сечения вычислены точно, а при эксперименте имеются начальные дефекты профилей.

Литература

1. Смазнов Д. Н. Устойчивость при сжатии составных колонн, выполненных из профилей из высокопрочной стали // Инженерно-строительный журнал. 2009. №3(5). С. 42-49.
2. Ватин Н. И., Попова Е. Н. Термопрофиль в легких стальных строительных конструкциях. СПб, 2006. 63 с.
3. Колесов А. И., Лапшин А. А., Валов А. В. Современные методы исследования тонкостенных стальных конструкций // Приволжский научный журнал. 2007. № 1. С. 28-33.
4. Кретинин А. Н., Крылов И. И. Особенности работы тонкостенной балки из гнутых оцинкованных профилей // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2008. № 6. С. 1-11.
5. Юрченко В. В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутох профилей в среде «SCAD Office» // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 8. С. 38-46.
6. Туснин А. Р. Численный расчет конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля. М. : Изд-во АСВ, 2009. 143 с.
7. Ватин Н. И., Рыбаков В. А. Расчет металлоконструкций: седьмая степень свободы // СтройПРОФИЛЬ. 2007. №2(56). С. 60-53.
8. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М. : ДМК Пресс, 2002. 618 с.
9. Сливкер В. И. Строительная механика. М. : Изд-во АСВ, 2005. 736 с.
10. Астахов И. В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутох профилей. Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. СПб, 2006. 123 с.
11. Белый Г. И. Расчет упругопластических тонкостенных стержней попространственно-деформируемой схеме // Строительная механика сооружений: Межвуз. темат. сб. тр; ЛИСИ. №42. 1983. С. 40-48.
12. Cheng Y., Schafer B.W. Simulation of cold-formed steel beams in local and distortional buckling with applications to the direct strength method // Journal of Constructional Steel Research. Volume 63, Issue 5. 2007. P. 581-590.
13. Rasmussen K. J. R. Experimental investigation of local-overall interaction buckling of stainless steel lipped channel columns // Journal of Constructional Steel Research. Volume 65, Issues 8-9. 2009. P. 1677-1684.
14. Hancock G. J. Compression tests of high strength cold-formed steel channels with buckling interaction // Journal of Constructional Steel Research. Volume 65, Issue 2. 2009. P. 278-289.
15. Bertelsbeck M. S. Experimentelle und analytische untersuchung von kaltgeformten. sigma-profilen unter druckbeanspruchung. Diplomarbeit. Dortmund, 2009. 269 p.
16. Eccher G., Rasmussen K.J.R., Zandonini R. Elastic buckling analysis of perforated thin-walled structures by the isoparametric spline finite strip method // Thin-walled Structures. Vol. 46. 2008. P. 165-191.
17. Spoto T., Turner J. Bracing of cold-formed steel structures: A design guide. Prepared under contract to American Society of Civil Engineers-Structural Engineering Institute (ASCE-SEI), 2005. 149 pages.

**Дмитрий Сергеевич Шатов, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: + (911) 099-06-97; эл.почта: homeshat@mail.ru

Finite element modelling of open section perforated thin-walled studs made from thin-walled steel profiles

D. S. Shatov,

Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia
+ 7 (911) 099-06-97; e-mail: homeshat@mail.ru

Key words

thin-walled profile, stud, deformations, buckling, element, stress, load

Abstract

The share of constructions made from thin-walled steel profiles grows in Russia every year, however the standard base and quality of calculations remain at low level. However nowadays there is an active scientific work on designing and improving methods of calculations, introduction of new ideas and aspects and their automation.

The purpose of the work is the further development of a theoretical and practical component of numerical methods for the solution of problems of linear deformation of thin-walled profiles. Article is devoted to research of work of thin-walled profiles, applying methods of the numerical analysis. In the work deformations and forms of buckling of an open section perforated thin-walled stud, calculated by a method of finite elements are considered. The obtained data is compared with results of tests of the same profiles made in Dortmund technical university in 2009 under the direction of professor Diter Ungerman.

The research has shown that finite element method gives us probable results and shows an expected tendency. The difference in results is 10,2%.

References

- Smaznov D. N. *Magazine of Civil Engineering*. 2009. No. 3(5). p. 42-49. (rus)
- Vatin N. I., Popova E. N. *Termoprofil v legkikh stalnykh stroitelnykh konstruktsiyakh* [Thermoprofile in the light-gauge steel structures]. SPb, 2006. 63 p. (rus)
- Kolesov A. I., Lapshin A. A., Valov A. V. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal*. 2007. No. 1. p. 28-33. (rus)
- Kretinin A. N., Krylov I. I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo*. 2008. No. 6. p. 1-11. (rus)
- YUrchenko V. V. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 8. p. 38-46. (rus)
- Tusnin A. R. *Chislenny raschet konstruktsiy iz tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya* [Numerical calculation of structures made of open-section thin-walled bars]. Moscow : ASV, 2009. 143 p. (rus)
- Vatin N. I., Rybakov V. A. *StroyPROFIL*. 2007. No. 2(56). p. 60-53. (rus)
- Perelmuter A. V., Slivker V. I. *Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza* [Calculation models of erections and its analysis]. Moscow : DMK Press, 2002. 618 p. (rus)
- Slivker V. I. *Stroitel'naya mekhanika* [Structural mechanics]. Moscow : Izd-vo ASV, 2005. 736 p. (rus)
- Astakhov I. V. *Prostranstvennaya ustoychivost elementov konstruktsiy iz kholodnognutnykh profiley* [Spatial stability of structure elements made of light-gauge profiles]. Theses. Saint-Petersburg, 2006. 123 p. (rus)
- Belyy G. I. *Stroitel'naya mekhanika sooruzheniy: Mezhdvuzovskiy tematischeskiy sbornik trudov*. No. 42. 1983. p. 40-48. (rus)
- Cheng Y., Schafer B.W. Simulation of cold-formed steel beams in local and distortional buckling with applications to the direct strength method. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 63, No. 5. 2007. P. 581-590.
- Rasmussen K. J. R. Experimental investigation of local-overall interaction buckling of stainless steel lipped channel columns. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 65, No.s 8-9. 2009. P. 1677-1684.
- Hancock G. J. Compression tests of high strength cold-formed steel channels with buckling interaction. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 65, No. 2. 2009. P. 278-289.
- Bertelsbeck M. S. *Experimentelle und analytische untersuchung von kaltgeformten. sigma-profilen unter druckbeanspruchung*. Diplomarbeit. Dortmund, 2009. 269 p.
- Eccher G., Rasmussen K.J.R., Zandonini R. Elastic buckling analysis of perforated thin-Walled structures by the isoparametric spline finite strip method. *Thin-walled Structures*. Vol. 46. 2008. P. 165-191.
- Sputo T., Turner J. *Bracing of cold-formed steel structures: A design guide*. Prepared under contract to American Society of Civil Engineers-Structural Engineering Institute (ASCE-SEI), 2005. 149 pages.

Full text of this article in Russian: pp. 32-35