

УДК 69.07

UDC 69.07

КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЖЕСТКИХ ВСТАВОК ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОФОРМОВАННЫХ СТАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ**MFE MODELLING OF BEHAVE OF STIFFENERS FOR THIN WALLED STEEL PROFILES**

Смазнов Денис Николаевич
аспирант
Санкт-петербургский политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

Smaznov Denis Nicolaevich
post-graduate student
St. Petersburg State Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

В статье рассмотрено влияние элементов (жестких вставок) тонкостенных профилей на несущую способность, с применением методов численного анализа. Решаются задачи линейного деформирования. Проведено исследование по выбору оптимальных параметров жестких вставок профилей. Исследовано влияние расположения жестких вставок и их количество на величину критических нагрузок

Influence of stiffeners of thin-walled profiles on capacity is considered in this article with application of MFE methods. Problems of linear deformation are solved. Research for choice of optimum parameters of stiffeners is solved. Influence of location of stiffeners and their quantity are investigated for determine the critical loadings

Ключевые слова: КРИТИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА, УГОЛ ЗАКРУЧИВАНИЯ, ТОКОСТЕННЫЕ ХОЛОДНОГНУТЫЕ ПРОФИЛИ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЖЕСТКИЕ ВСТАВКИ

Keywords: ULTIMATE LOAD, DISTORSIONAL ANGLE, THIN-WALLED STEEL PROFILES, MODELLING, STIFFENERS

Развитие промышленного и гражданского строительства ставит задачи расчета тонкостенных конструкций, сочетающих в себе легкость с высокой прочностью [1], что и обуславливает их широкое использование. Повышенные требования к прочности и надежности при уменьшении материалоемкости создают сложные проблемы анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) и устойчивости тонкостенных конструкций. В связи с этим одной из главных задач является совершенствование методов расчета и проектирования профилей сложной формы с различными отверстиями и жесткими вставками.

Теоретические основы уже вполне разработаны, и трудно ожидать принципиально новых открытий. Расчет тонкостенных систем методами теории оболочек сложен и далеко не всегда оправдан. Теории расчета тонкостенных стержней, созданные и развитые целым рядом ученых, упрощают задачу, но возникают проблемы при расчете сложных несимметричных систем. Весьма эффективным оказывается использование

численных методов. Необходимость разработки практической методики расчета совершенно очевидна.

Решение этих вопросов в последнее время стало возможным благодаря широкому использованию средств вычислительной техники. Было получено много новых результатов, касающихся разработки алгоритмов решения задач по расчету тонкостенных профилей численными методами на ЭВМ. Одним из универсальных методов является метод конечных элементов (МКЭ). МКЭ является синтезом энергетических методов, представлений о конечных разностях и структурном моделировании при помощи вычислительных машин.

Методика численного расчета разработана Постновым В.А. [2]. Предложен конечный элемент тонкостенного стержня открытого профиля для численного расчета. Деформация в общей и местной системе координат считается одинаковой.

Возможно применение тонкостенных конечных элементов, предложенных Тусниным А.Р. [3], учитывающих не только чистое, но и стесненное кручение при совпадении и несовпадении центров тяжести и изгиба, наличии или отсутствии эксцентриситетов в узлах элемента.

Наиболее рационально для расчета сложных пространственных конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля использовать стержневые тонкостенные конечные элементы. 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 [4,5] где приводится описание так называемой бистержневой модели и показана зависимость угла закручивания с мерой деформации. Показана методика, которая позволяет обойти эти затруднения.

Помимо тонкостенных конечных и стержневых элементов есть и оболочечные элементы. В расчетной практике иногда оказывается недостаточным уровень детализации профилей в виде стержневых моделей

и особенно в тех случаях, когда необходимо учесть возможность искажения формы поперечного сечения или другие тонкие эффекты. Тогда 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.

Следует отметить, что в прошлые десятилетия было издано довольно много зарубежных отчетов о научно-исследовательской работе для подобного рода задач. Основные направления исследования в данной области – это развитие математического аппарата, который позволяет комплексно оценить НДС и развитие общей теории проектирования, которая связывает упругие деформации с приложенной нагрузкой. На данный момент работа [6] является самым последним и наиболее полным обобщением зарубежных исследований по всем вопросам, связанным с изучением тонкостенных профилей.

Проведенный анализ зарубежных [7,8,9] и отечественных исследований [10] показал, что вопросы практического расчета тонкостенных холодноформованных профилей освещены довольно неполно. В зарубежных публикациях этому вопросу уделено большое внимание, тем не менее, нет существенных рекомендаций по повышению несущей способности профилей без установки поперечных планок и выполнения составных сечений. Следует также отметить, что фактические разрушающие усилия в конструкциях с гибкими профилями будут ниже, чем теоретические расчетные, определенные при условии применения обычной расчетной модели профилей.

Все вышеизложенное говорит об **актуальности** рассматриваемой проблемы. Необходимо разработать и рекомендовать конструктивные мероприятия, которые позволят эффективно увеличить несущую

способность профиля, предотвратить возможную местную потерю устойчивости и депланацию путем постановки жестких вставок в стенках и полках профилей.

Статья посвящена исследованию работы элементов (жестких вставок) тонкостенных профилей, с применением методов численного анализа. Решаются задачи линейного деформирования. Проведено исследование по выбору оптимальных параметров жестких вставок профилей. Исследовано влияние расположения жестких вставок и их количества на величину критических нагрузок.

Целью является дальнейшее развитие практической составляющей численных методов [11] для решения задач линейного деформирования тонкостенных профилей. В работе разработаны практические методы расчета на пространственную устойчивость элементов конструкций из гнутых тонкостенных профилей с учетом возможной потери устойчивости.

Научную новизну работы составляют заключения и выводы о влиянии формы сечения и размеров на пространственную устойчивость. Представлены результаты в виде графиков, которые могут быть использованы для проверки пространственной устойчивости элементов конструкций из гнутых профилей.

Достоверность результатов основывается на удовлетворительном согласовании теоретических и экспериментальных результатов. Теоретической и методической основой исследования послужили работы отечественных и зарубежных ученых [12,13,14,15,16,17].

В результате проведенных численных исследований определена **практическая ценность**: установлено влияние критической разрушающей нагрузки на перемещения и угол закручивания. Использование полученных результатов при новых расчетах позволяет

придавать форму поперечного сечения, отличную от существующих, которая позволит повысить несущую способность.

Основное положение работы - это рекомендации и методики по конечно-элементному моделированию процесса и результаты с практической составляющей при проектировании или усилении существующих холодноформованных профилей.

Для учета влияния депланации конечного элемента, предполагается, что деформации контура изменяются линейно вдоль каждого полигонального сегмента профиля. Во внимание не принимаются работа конструкции при воздействии осевых силовых факторов, изгиба и кручения. Условно профиль делится на несколько жестких частей, соединенных между собой в узле. Каждой части, выделенной из поперечного узлового элемента, соответствует своя форма депланации. Для каждой части контура u_{C1} , z_{C1} представляют собой координаты центра депланации, μ_1 – коэффициент угла поворота относительно начальной части. $\mu_1\theta_{x1}$ определяет угол поворота, вызванного депланацией. Например, если рассматривается открытый профиль без разветвления, и правая часть считается исходной, начальной частью, θ_{x1} определяет угол поворота всех материальных точек расположенных справа от узла соединения, тогда как $\mu_1\theta_{x1}$ определяет поворот всех материальных точек, расположенных в левой части.

Расчет от действия поперечных сил и крутящего момента производится путем дискретизации конечного элемента. Таким образом, обеспечена независимость деформаций растяжения-сжатия, изгиба и кручения при расчете внутренних усилий.

Аналитическое решение [10] сравнивается с результатами расчета численными методами оболочечных элементов. Коэффициент Пуассона взят равным нулю при моделировании, цель данного предположения - подтвердить работоспособность теории.

Потеря устойчивости консоли тонкостенного открытого профиля (четыре многоугольных сегмента, см. рис. 1b) и кручение исключается в зажатом конце. К свободному концу приложена нагрузка разнонаправленного характера с величиной 100Н (рис. 1a); $G=84\text{GPa}$; $E=210\text{GPa}$.

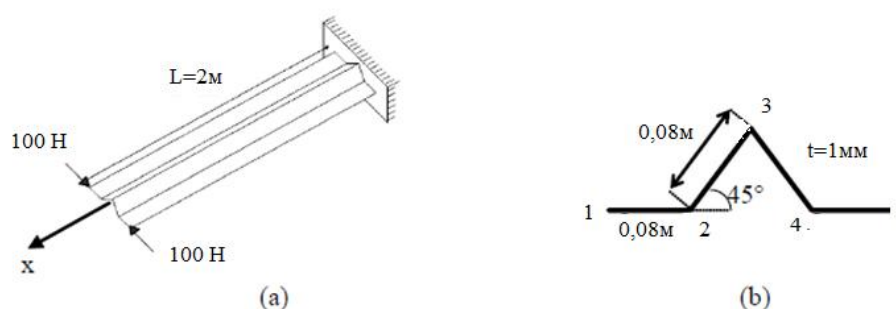


Рис. 1. Консольная балка с приложенной нагрузкой.

Этот профиль представляет простой случай моносимметрического профиля с одним видом возможной депланации. Депланация профиля состоит во вращении двух частей (левой: 1-2-3 и правой: 3-4-5) отделенных в точке 3. Так как две части симметричны относительно вертикальной оси, проходящей через точку 3, то углы поворота должны иметь равное значение и противоположный знак ($\mu = -1$).

Центры депланации, как ожидается, будут расположены на горизонтальной оси, проходящей через точку 3. Для однородной депланации, без дополнительного местного изгиба пластины (распределение бимоментов вдоль длины; поворот невозможен одним концом), вычисленное местоположение близко к вычислениям Власова [10] для произвольной нагрузки и граничных условий, так как значение касательного напряжения при потере устойчивости принимается равным нулю.

Однако в нашем случае местоположение центра депланации зависит от места приложения произвольной нагрузки и граничных условий, но он всегда расположен на горизонтальной оси, проходящей через узел 3.

Распределение момента вдоль контура профиля представлено на рисунке 2а. Нагрузка создает бимомент $M = -11.32\text{Нм}$.

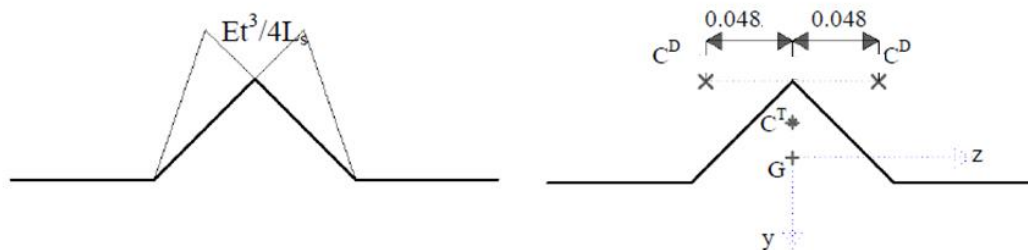


Рис. 2 (а): Эффект жесткой вставки. (б): Положение центра депланации.

Произведено сравнение результатов расчета конечного элемента (рис. 3) с аналитическими вычислениями.

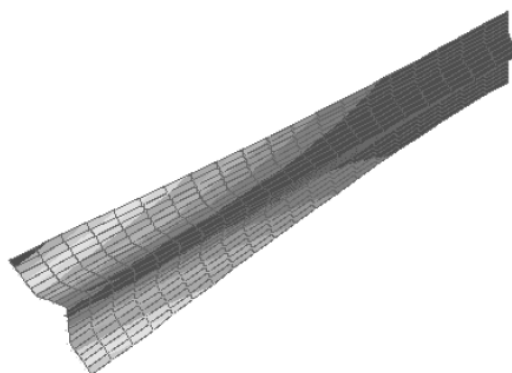


Рис. 3. Оболочечный конечный элемент.

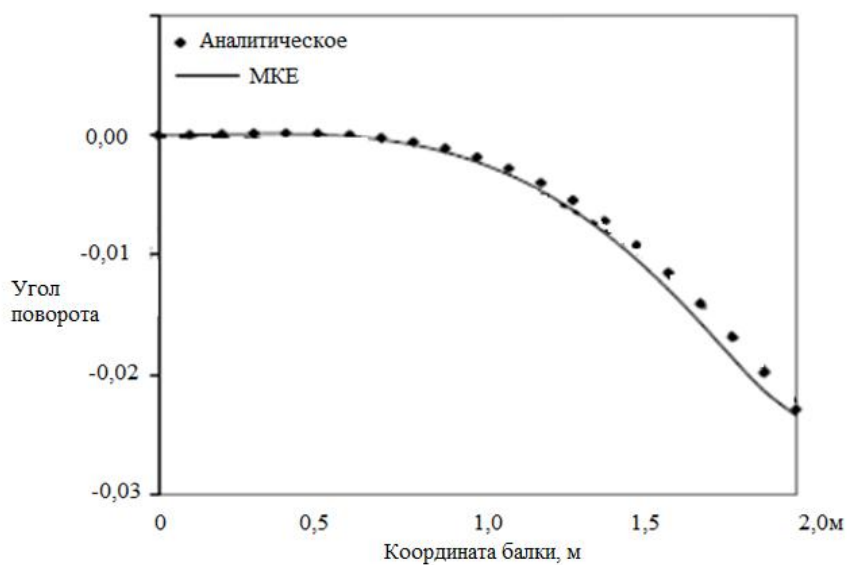


Рис. 4. Угол поворота оси x при депланации.

Представлена диаграмма угла поворота при деформации вдоль продольной оси (угол поворота правой части профиля). Для оболочечных элементов угол поворота вычислен как среднее значение поворотов всех узлов, принадлежащих правой части ($s = 0.16-0.32$ м). Различия между оболочечной моделью (с 20 элементами) и аналитическим решением для максимального угла поворота равны 4.88 %. Важно отметить, что предположение о повороте жестких частей друг относительно друга по теории, соблюдается лишь частично при анализе оболочечной модели.

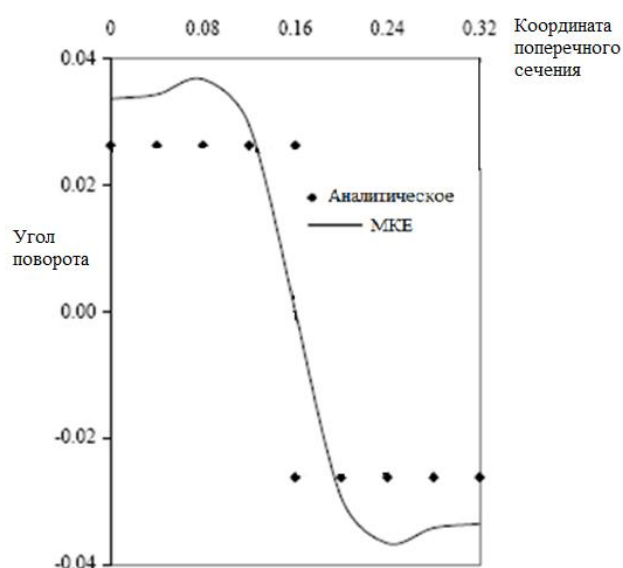


Рис. 5. Угол поворота вдоль контура, координата $x = 2$ м.

Рисунок 5 показывает, что при теоретическом исследовании угол поворота однороден в каждой части (левой: 0- 0,16м; правой: 0,16-0,32м), тогда как, для результатов оболочечного моделирования, он медленно изменяется вдоль каждого участка и резко понижается в области линии соединения частей ($s = 0,16$ м). В обоих случаях он имеет противоположный знак в левой и правой части вследствие симметрии профиля.

Результаты численного расчета элемента по сравнению с аналитическими вычислениями для распределения нормальных напряжений имеют полное совпадение и в статье не приводятся. Важно

отметить распределение касательных напряжений.

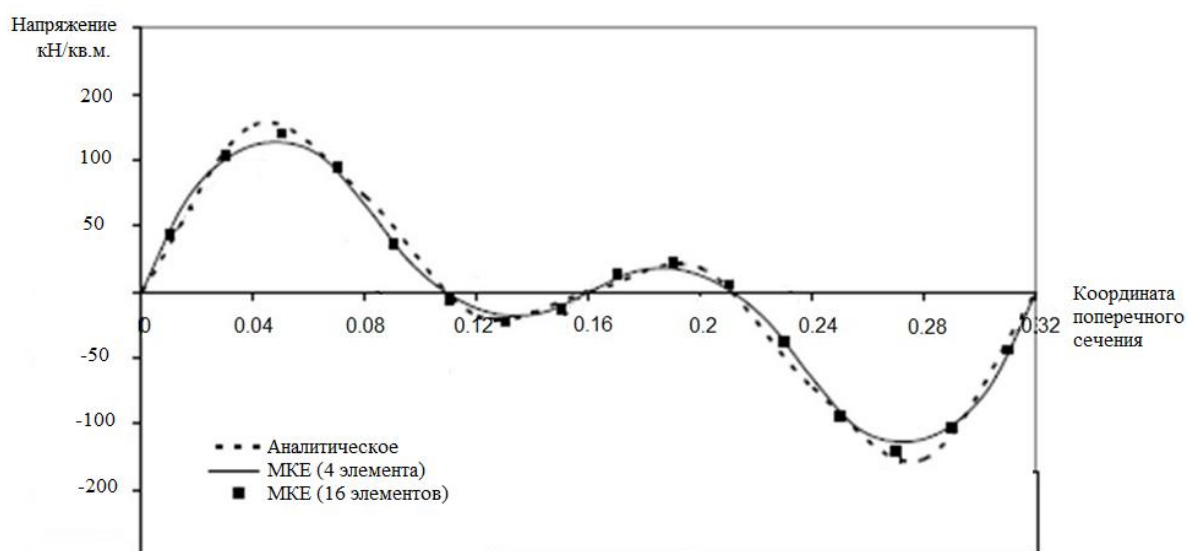


Рис. 6 Касательные напряжения τ_{xs}

Центры депланации были назначены без учета напряжений от деформаций сдвига. В теории касательные напряжения получают из нормальных напряжений с помощью уравнения равновесия. По теории Власова, они не могут быть вычислены из уравнений кинематики с использованием закона Гука, так как в этом случае они обращаются в ноль.

Однако, для данного случая предположение, что касательные напряжения в середине стенки равны нулю не выполняется. Касательные напряжения рассчитываются из закона Гука для каждого сегмента профиля.

Рисунок 6 показывает распределение касательных напряжений по контуру в точке с координатой $x=1,5$ м и местоположение центров депланации. Так как касательные напряжения имеют параболическую форму распределения, результаты с разбиением на 4 конечных элемента нужно уточнить, путем разбиения на конечное число узловых элементов (16 поперечных сегментов). Разница в значениях угла поворота и нормальных напряжений оказывается очень малой для назначенных и рассчитанных положений центров депланации.

Тонкостенный профиль при проектировании представляется как

сумма отдельных пластинчатых элементов. Например, стенка и полка профиля рассматриваются независимо как отдельно закрепленные пластины. Полка и стенки в расчете принимаются укрепленными ребрами жесткости, если они действительно соединены с другими элементами (полка, отгиб, стенка).

Представленные ниже исследования показывают разницу при деформации для стенок или полок с одним или двумя ребрами жесткости. На практике при проектировании обычно используются открытые симметричные профили, например, П-образного сечения. Представленные пластины могли бы быть частью П-образной секции.

Рассмотрена плита с шириной 200 мм и толщиной 1 мм. «V» образное ребро жесткости расположено по середине плиты, его размеры варьируются от 1 до 14 мм при фиксированной ширине 10 мм.

Рисунок 7 показывает минимальное значение напряжения при деформации в зависимости от размеров ребра жесткости. Как можно видеть на рисунках, деформация является доминирующей при условии, что ребро жесткости меньше 10 мм для плиты 1 мм. Для плиты 2 мм деформация является доминирующей во всех случаях независимо от размеров ребра жесткости. Таким образом, жесткая вставка повышает несущую способность в два раза при соотношении высоты к ширине вставки от 0,5 до 1,0. Т.е. достигается существенное повышение несущей способности при незначительном увеличении металлоемкости.

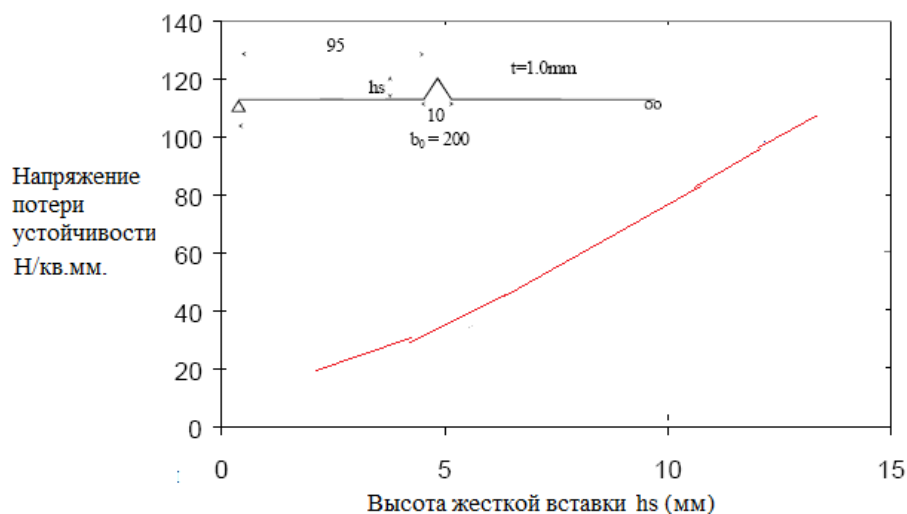


Рис. 7. Зависимость напряжения потери устойчивости от величины жесткой вставки

Когда по длине расположены симметрично два ребра жесткости, значение напряжения для депланации в зависимости от расположения вставок от края плиты представлено на рисунке 8. Таким образом, две жесткие вставки повышает несущую способность в 1,5 раза при соотношении расстояния от края до первой вставки к ширине между вставками равным 0,25. Т.е. достигается существенное повышение несущей способности при незначительном увеличении металлоемкости.

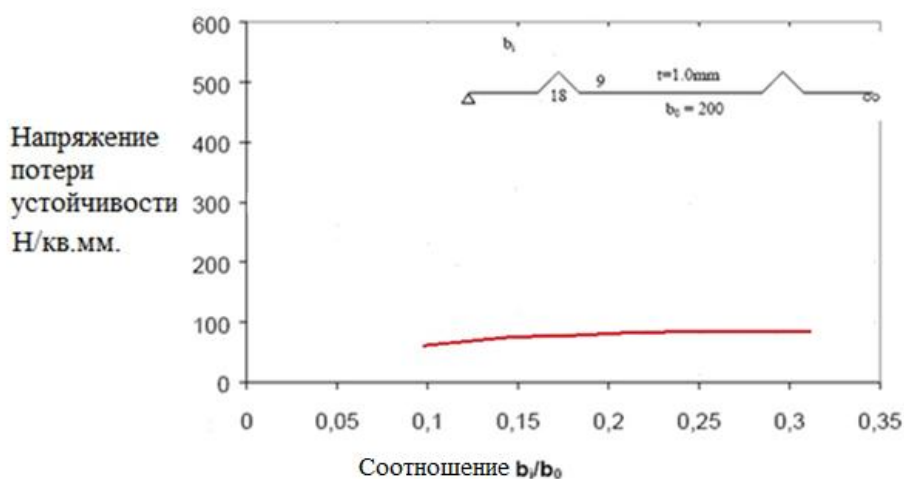


Рис. 8. Зависимость напряжения потери устойчивости от величины жесткой вставки

Выводы

Некоторое расхождение с результатами аналитического расчета объясняется тем, что в программе МКЭ геометрические характеристики сечения вычислены точно, а при аналитическом расчете приближенно. Для сравнения результатов представлены углы закручивания, величина деформации и критическая нагрузка. Сравнение результатов свидетельствует об их незначительных расхождениях.

1. Разработан алгоритм численного расчета на пространственную устойчивость элементов конструкций с учетом влияния расположения и размеров вставок.

2. Анализ влияния формы сечения показал, что применение профилей отличных от П-образного, может повышать несущую способность.

3. Даны практические рекомендации для конструирования новых типов поперечных сечений с рациональным расположением жестких вставок.

Литература

1. Ватин Н.И., Кузьменко Д.В. Ограждающая конструкция «нулевой толщины» – термопанель // Инженерно-строительный журнал. 2008. №1. С. 13-21.
2. Постнов В.А. Численные методы расчета судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1974. 344 с.
3. Туснин А.Р. Расчет и проектирование конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д.т.н.: Спец. 05.23.01. М., 2004. 37 с.
4. Вычислительный комплекс SCAD / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко. и др... М.: Изд-во АСВ, 2007. 592 с.
5. Сливкер В.И. Строительная механика. М.: Изд-во АСВ, 2005. 736 с.
6. Wei-Wen Yu, Roger A. LaBoube Cold-Formed Steel Design, ISBN: 978-0-470-46245-4, Hardcover, 512 pages. October 2010.
7. Cheng Yu and Benjamin W. Schafer. Distortional buckling of cold-formed steel members in bending. Final report, AISI, Baltimore, January 2005.
8. Katy Saadé. Finite Element Modeling of Shear in Thin Walled Beams with a Single Warping Function: Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de docteur, Université libre de bruxelles, 2004-2005.
9. Mttias Clarin. Local buckling and residual stresses. Department of Civil and

- Environmental Engineering, 2004, ISSN: I402-1757.
10. Власов В.З. Избранные труды, Т. 2.. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 507 с.
 11. Смазнов Д.Н. Устойчивость при сжатии составных колонн, выполненных из профилей из высокопрочной стали // Инженерно-строительный журнал. 2009. №3. С. 42-49.
 12. Астахов И.В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутых профилей: Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. СПб, 2006. 123 с.
 13. Айрумян Э.Л. Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутых стальных оцинкованных профилей производства ООО конструкций «БалтПрофиль». М.: Изд-во ЦНИИСК, 2004. 69с.
 14. Юрченко В.В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей в среде SCAD Office // Инженерно-строительный журнал. 2010. №8. С.38-46.
 15. Недвига П.Н., Рыбаков В.А. Эмпирические методы оценки несущей способности стальных тонкостенных просечно-перфорированных балок и балок со сплошной стенкой // Инженерно-строительный журнал. 2009. №8(10). С. 27-30.
 16. Белый Г.И. Расчет упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформируемой схеме // Строительная механика сооружений: Межвуз. темат. сб. тр; ЛИСИ. №42. Л., 1983. С. 40-48.
 17. Ватин Н. И., Попова Е. Н. Термопрофиль в легких стальных строительных конструкциях. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006. 63 с.