

Несущая способность сжатых стальных тонкостенных элементов сплошного и перфорированного сечения из холодногнутого С-профиля

Старший преподаватель Т.В. Назмеева,
ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет»*

Ключевые слова: холодногнутый профиль; испытательный стенд; несущая способность; потеря устойчивости; тонкостенный элемент; численное моделирование

На данный момент в России наблюдается устойчивый спрос на легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК) [1]. Однако отсутствие нормативных документов по проектированию ЛСТК с учетом российских особенностей приводит к тому, что на практике ЛСТК применяются на основе рекомендаций фирм-производителей холодногнутого профиля. Таким образом, несущая способность тонкостенных конструкций используется не полностью, что приводит к необоснованному удорожанию зданий и сооружений из ЛСТК и, как следствие, сдерживает широкое применение данных эффективных конструкций.

Малый вес несущего стального каркаса (в пределах 20–25 кг/м²), быстрая окупаемость и высокая энергоэффективность зданий из ЛСТК делают их востребованными и в жилом малоэтажном строительстве, и в строительстве зданий промышленного и общественного назначения. Благодаря своим конструктивным особенностям ЛСТК способны решить главные проблемы реконструкции зданий: снизить нагрузку на стены и фундаменты, вести работы в условиях тесной городской застройки без применения тяжелой грузоподъемной техники и остановки технологического процесса в здании. ЛСТК применяются и при возведении так называемых «пассивных домов».

В европейских нормах [2], созданных на основе широких экспериментальных исследований, отражены различные особенности поведения тонкостенных элементов на основе холодногнутого профиля. В российских строительных нормах расчет тонкостенных элементов не систематизирован, поэтому для развития собственных национальных стандартов по ЛСТК требуется проведение большого количества комплексных исследований.

Автором статьи осуществляются численные и экспериментальные исследования несущей способности стоек различной длины из холодногнутого С-профиля сплошного и перфорированного сечения с целью получения достоверной методики их расчета.

Для проведения экспериментальных исследований автором статьи были разработаны методика проведения испытаний и испытательные стендовые комплексы С-12 (1200 мм / 20 т) и В-50 (2200 мм / 50 т). В ходе численного моделирования было получено в геометрически нелинейной постановке численное решение задачи устойчивости тонкостенного элемента из С-образного профиля в программном комплексе PLM Femap 10.1 Nastran.

Обзор литературы

ЛСТК – это конструкции на основе холодногнутого стального тонкостенного оцинкованного профиля толщиной до 3 мм. Профиль имеет открытое или закрытое сечение различной формы (С-образной, Z-образной и т. д.) в связи с тем, что несущая способность элементов из холодногнутого тонкостенного профилей зависит не только от площади сечения элементов, но и от их конструктивных особенностей.

Конструктивная система здания на основе ЛСТК представляет собой стержневую систему в виде стального каркаса из холодногнутого профилей с наружной обшивкой из плит. При креплении обшивки к стойкам каркаса создается сборный строительный элемент – панель.

Широкое внедрение в строительство холодногнутого профиля обуславливает использование в расчетах легких конструкций расчетной схемы тонкостенного стержня, который может рассматриваться не только как брус, но и как оболочка и обнаруживает свойства, существенно отличающие его от обычных стержней. Так, в частности, к нему не всегда применим

принцип Сен-Венана, для него характерна деформация сечения, открытые холодногнутые профили весьма чувствительны к кручению.

Особенность работы сжатых тонкостенных стержней заключается в том, что потеря несущей способности может наступить как в результате потери общей устойчивости, так и в результате потери местной устойчивости элемента. Потеря общей устойчивости тонкостенного стержня может иметь три формы: изгибную, крутильную и изгибно-крутильную – в зависимости от вида сечения, длины стержня, способа закрепления и т. п.

Все существующие теории поведения тонкостенных элементов носят феноменологический характер, т. е. основаны на описании наиболее изученных экспериментальных явлений. Основную ценность для тонкостенных конструкций представляют техническая теория расчета тонкостенных стержней на основе гипотезы жесткого контура, предложенная В.З. Власовым [3] на основе работ С.П. Тимошенко, и теория закритической несущей способности, полученная в результате многочисленных экспериментальных исследований пластинок и балок (работы Т. Кармана, Дж. Винтера, Ф. Блейха).

Теорию стесненного кручения тонкостенных стержней открытого профиля развивали А.А. Уманский, Г. Вагнер, Ф. Блейх, и другие ученые. Экспериментальные исследования многих авторов показали, что в большинстве случаев экстремальной формой потери устойчивости тонкостенных стержней является крутильная или изгибно-крутильная форма. Это связано с отклонением от закона плоских сечений при кручении тонкостенных стержней, сопровождаемым изгибом отдельных элементов [4].

Явлением потери местной устойчивости стенок, подвергнутых осевому сжатию, занимались П. Бижляр, Э. Стоуэлл, К. Либов и Э. Лундквист, С. Ван дер Маас, Ф. Блейх. Проблемами закритической несущей способности пластинок занимались Т. Карман, Э. Шехлер, Л. Доннел. В своей работе А.С. Вольмир [5] описывает явление редукиции сечения. Проблемы закритической несущей способности тонкостенных опор и балок рассматривали Дж. Хеймерль, А. Чилвер, Р. Нидхем, Дж. Винтер, Я. Брудка, З. Терешковский и др.

Влияние особенностей изготовления холодногнутого профиля на несущую способность тонкостенных конструкций было рассмотрено в работах И.С. Тришевского [6], в многочисленных исследованиях ЦНИИПСК им. Мельникова и т. д.

В настоящее время теория поведения тонкостенного профиля вполне проработана. Основное внимание в научно-исследовательской работе по ЛСТК уделяется прикладным исследованиям поведения различных видов конструкций, выполненных из тонкостенного профиля (стоек, ферм, прогонов и т. д.) с целью разработки достоверных методик их расчета и проектирования. Прикладные исследования обуславливают применение численного моделирования.

Следует отметить работы Э.Л. Айрумяна [7], Г.И. Белого [8], И.В. Астахова [9], работы сотрудников ЦНИИПСК им. Мельникова, узконаправленные исследования в вузах России [10–16]. Проблемами численного моделирования занимаются В.И. Сливкер [17], А.Р. Туснин [18], В.В. Лалин [19], В.А. Рыбаков [20], А.В. Осокин [21].

Современные зарубежные исследователи уделяют достаточное внимание проблемам тонкостенных элементов [22–23]. Значительный вклад в теорию поведения холодногнутого профиля внес американский ученый Б. Шафер и его последователи [24–25]. Д. Унгерманн (Германия) [26], Р. Ландольфо (Италия) [27], М. А. Брэдфорд (Австралия), В.В. Юрченко (Украина) [28] и другие ученые занимаются исследованиями напряженно-деформированного состояния и устойчивости тонкостенных элементов и конструкций.

Постановка задачи

Для стоек панелей стального каркаса в зданиях на основе технологии ЛСТК используется С-образный холодногнутый профиль. По мнению ряда авторов, это наиболее рациональная форма профиля для работы на сжатие, обладающая более высокой прочностью и устойчивостью по сравнению с другими видами профиля, например, швеллерным. Для создания внутренних стен применяется С-профиль сплошного сечения, для наружных – С-профиль перфорированного сечения. По технологическим требованиям стойки в панелях изготавливаются и составного сечения. Толщина панели назначается исходя из обеспечения требований тепло- и звукоизоляции, поэтому для стоек применяется С-профиль высотой сечения 150 и 200 мм, толщина профиля – 1,5 и 2 мм.

Назмеева Т.В. Несущая способность сжатых стальных тонкостенных элементов сплошного и перфорированного сечения из холодногнутого С-профиля

Следует отметить американского исследователя Дж. Винтера [29], который в начале XX века провел испытания более 150 изгибаемых балок с различными характеристиками. Дж. Винтер исследовал также большое количество стальных стоек с целью, прежде всего, проверить формулы для совместно работающей ширины балок. Хаймерль, Хертель также проводили исследования стоек из алюминиевого профиля.

Большое количество исследований холодногнутого профиля проводится численными методами, но достаточные натурные испытания стальных длинных стоек из С-образного холодногнутого профиля сплошного и перфорированного сечения на сжатие не проводились. Представляется также интересной и малоизученной совместная работа стоек составного сечения из холодногнутого профиля – исследование по этой теме было выполнено Э.Л. Айрумяном и Г.И. Белым. Проведение подобных исследований только численными методами в силу различных обстоятельств (граничные условия закрепления, начальные несовершенства и т. д.) весьма затруднительно – требуется проведение натурных испытаний с целью разработки достоверной методики их расчета.

Описание исследования

Автором проведены два этапа экспериментальных исследований несущей способности стоек из холодногнутого тонкостенного С-профиля: первый этап – натурные испытания одиночных стоек; второй – натурные испытания стоек составного сечения.

В ходе первого этапа проводились две основные серии испытаний одиночных стоек различной длины: первая серия – испытания коротких стоек длиной 1,25 м; вторая – натурные испытания длинных стоек длиной 2,2 м. Во второй серии было испытано 40 стоек (5 стоек на каждый вид сечения) из С-профиля сплошного и перфорированного сечения высотой 150 и 200 мм с номинальной толщиной сечения 1,5 и 2,0 мм. Просечки перфорированного профиля были получены путем вдавливания. Длина стойки 2,2 м соответствует наименьшей длине стойки в несущем каркасе здания, сечения высотой 150 и 200 мм соответствуют наиболее применяемым сечениям в несущем каркасе здания из условия обеспечения требуемых теплотехнических и звукоизоляционных свойств.

Для проведения испытаний был использован холодногнутый профиль производства ООО «Нординкрафт-Сенсор» (г. Череповец): ПС-150-1,5, ПС-150-2,0, ПС-200-1,5, ПС-200-2,0, ТС-150-1,5, ТС-150-2,0, ТС-200-1,5, ТС-200-2,0. Для изучения несущей способности стоек профили были изготовлены из стали 08пс по ГОСТ 14918-80 ОАО «Северсталь» (г. Череповец). Испытания были проведены на базе испытательного центра ФБГОУ ВПО «Череповецкий государственный университет».

Для проведения экспериментальных исследований автором статьи в соавторстве с аспирантом А.А. Осолодкиным были разработаны и смонтированы два испытательных стендовых комплекса С-12 (1200мм/20т) и В-50 (2200мм/50т) для испытания образцов различной длины (рис. 1). Стендовое оборудование выполнено с учетом специфики поведения тонкостенных конструкций в реальных условиях, применяется соответствующее закрепление испытуемых образцов и схема приложения нагрузки. Данное оборудование не имеет аналогов в России.

Следует отметить, что в настоящее время в России отсутствуют методики проведения испытаний по ЛСТК, поэтому для проведения экспериментальных исследований тонкостенных элементов из холодногнутого С-профиля на сжатие автором статьи была разработана методика с учетом требований Еврокода и рекомендаций Э.Л. Айрумяна, специалиста ЦНИИПСК им. Мельникова.

В разработанной методике представлены основные составляющие экспериментального исследования: выбор соответствующих моделей в зависимости от цели испытания; выбор способов и средств приложения силовых нагрузок; выбор способов и средств измерения деформаций и перемещений при испытаниях; проведение подготовительных операций, связанных с изготовлением моделей и стендов; проведение численного моделирования; непосредственно экспериментальные исследования; подготовка мероприятий по технике безопасности; обработка экспериментальных данных.



С-12 (1200 мм/20 т)



В-50 (2200мм/50 т)

Рисунок 1. Испытательные стенды

Основной частью программы испытаний является описание объекта испытаний. В качестве объектов испытаний могут выступать один или несколько элементов конструкции, часть конструкции, отдельные узлы или конструкция в целом в зависимости от выбранной методики испытаний [30]. Основное требование к экспериментальным объектам – они должны повторять основные параметры конструкции (площадь поперечного сечения, характер опирания и т. д.).

Работа стоек предполагает работу на устойчивость. Особенность работы сжатых тонкостенных профилей заключается в том, что потеря несущей способности может наступить как в результате потери общей устойчивости элемента, так и в результате потери местной устойчивости. Как правило, потеря местной устойчивости в сжатой зоне сечения происходит на ранних стадиях нагружения, при уровне напряжений, который существенно ниже расчетных значений. Но это не означает достижение профилем предельного состояния, сечение в целом остается работоспособным, имеет достаточный запас по несущей способности и может воспринимать внешнюю нагрузку. Потеря местной устойчивости учитывается использованием геометрических характеристик эффективного сечения, рассчитанных на основе значений эффективной ширины. Это закреплено в европейских нормах EN 1993-1-3:2009; EN 1993-1-5:2006, но в российских строительных нормах расчет тонкостенных элементов с учетом редуцированной площади сечения не имеет единой расчетной методики [31].

При центральной сжатии коротких стержней, для которых не существует опасности потери устойчивости, сопротивление их зависит от площади поперечного сечения и не зависит от формы сечения. Потеря местной устойчивости коротких тонкостенных элементов из холодногнутого профиля, как правило, связана с потерей устойчивости формы сечения, то есть искажением поперечного сечения, что способствует потере несущей способности раньше наступления потери общей устойчивости. Поэтому конструктивные особенности холодногнутого профиля оказывают значительное влияние на несущую способность тонкостенных элементов. В связи с этим С-образный профиль, имеющий краевые отгибы, обладает преимуществом по устойчивости и несущей способности. Наличие ребер жесткости в Сигма-профиле также повышает несущую способность элемента.

С увеличением длины стоек основную опасность представляет потеря общей устойчивости, поэтому при изучении поведения сжатых стоек большую роль играет длина испытуемых образцов. Чем больше длина, тем более интересной, с исследовательской точки зрения, представляется работа данного образца. В связи с этим и было разработано два испытательных стенда различной грузоподъемности для испытания стоек различной длины. Работу тонкостенных элементов на устойчивость трудно оценить на малых моделях, поскольку сложно в малой модели имитировать

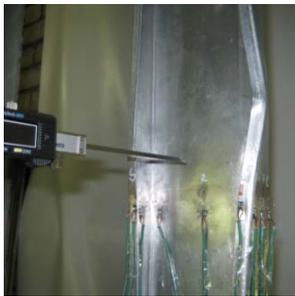
Назмеева Т.В. Несущая способность сжатых стальных тонкостенных элементов сплошного и перфорированного сечения из холодногнутого С-профиля

те особенности натурной конструкции, которые оказывают в ряде случаев существенное влияние на величину критических усилий.

Исследования устойчивости проводят, как правило, до разрушения с целью изучения закритической работы и определения резервов несущей способности при измерении напряженно-деформированного состояния системы, поэтому исследования целесообразно проводить на специальных испытательных установках – стендах. В ходе испытания на стендах объекты подвергаются действию нагрузок, сопоставимых или превышающих нагрузки в реальных условиях [32]. Преимуществом испытаний на стенде является возможность оценки реакции объекта на специфические условия (предельные значения нагрузки, определенный тип и величина нагрузки) при прочих фиксированных параметрах, что позволяет выявить скрытые конструктивные недостатки или резервы несущей способности конструкции. Стенд, как правило, представляет собой жесткую раму, на которую опирается модель. Принципиальное отличие стенда от других видов испытательных машин (пресс, разрывные машины и т. д.) состоит в размере и форме испытуемого образца. Проводить испытания длинных тонкостенных элементов на сжатие в обычных прессах представляется затруднительным, так как пресс не обеспечивает плавной подачи нагрузки и соответствующей высоты для установки образцов.

В связи с особенностью работы тонкостенных стоек в данных испытаниях нагрузка подавалась снизу при помощи гидравлических домкратов, величина нагрузки контролировалась цилиндрическим тензодатчиком сжатия. Нагрузки прикладывались небольшими порциями, после каждого этапа нагружения выполнялось измерение деформаций при помощи методов тензометрии и перемещений специальным методом. В таблице 1 представлены результаты испытаний короткой и длинной стоек. На рисунке 2 представлен график полученных перемещений.

Таблица 1. Результаты экспериментального исследования

Наименование	Длина 1,25 м Сплошное сечение ПС-150-2,0 Стенд С-12	Длина 2,2 м Сплошное сечение ПС-150-2,0 Стенд В-50	Длина 2,2 м Перфорированное сечение ТС-150-2,0 Стенд В-50
Участок образца			
Образец после проведения испытаний			

В данной работе применялись тензорезисторы и измерительное оборудование японской фирмы «Токуо Sokki Kenkyujo Co., Ltd.». Данные тензорезисторы имеют базу от 1 до 120 мм, диапазон рабочих температур от -20°C до $+80^{\circ}\text{C}$, предназначены для установки на металл, дерево, бетон, стекло и т. д.; разработаны для различных исследований и подходят для изучения закритической работы оцинкованных профилей. Для работы с датчиками и измерительным оборудованием автором статьи получен соответствующий сертификат обучения.

Во избежание погрешностей, связанных с релаксацией материала, отсчеты с измерительных приборов снимались достаточно быстро. В ходе проведения экспериментов в помещении выдерживалась комфортная температура для адекватной работы измерительного оборудования. После проведения экспериментов была проведена обработка результатов измерений с учетом нелинейной работы материала.

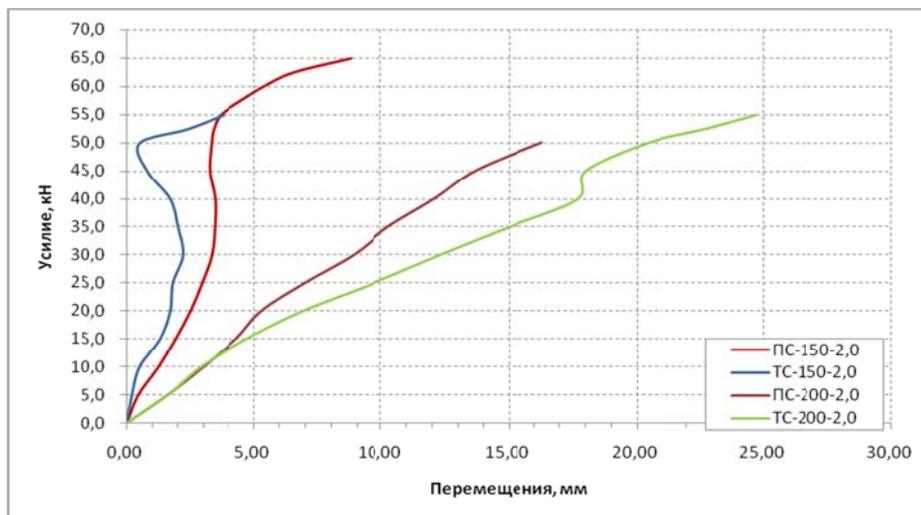


Рисунок 2. Наибольшие перемещения стенки стойки, мм от нагрузки, кН

С целью проверки экспериментальных исследований было выполнено численное моделирование работы тонкостенных элементов в программном комплексе PLM Femap 10.1 Nastran. Было получено в геометрически нелинейной постановке численное решение задачи устойчивости тонкостенного элемента из С-образного профиля.

Для создания конечно-элементной модели целой стойки были использованы треугольные и четырехугольные конечные элементы типа plate комплекса Nastran. Сгущение сетки в местах отгибов и погибей производилось вручную. Дискретная конечно-элементная модель целой стойки исследовалась с помощью шагового нагружения и итерационного процесса Ньютона–Рафсона [33]. Модуль упругости и коэффициент Пуассона принимались как для стали ($E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0,3$). Были использованы соответствующие диаграммы растяжения стали. Результаты приведены на рисунке 3.

Геометрически нелинейный расчет был выполнен, чтобы увидеть закритическое поведение стойки. В данной постановке задача показала практически полную сходимость с результатами экспериментальных исследований.

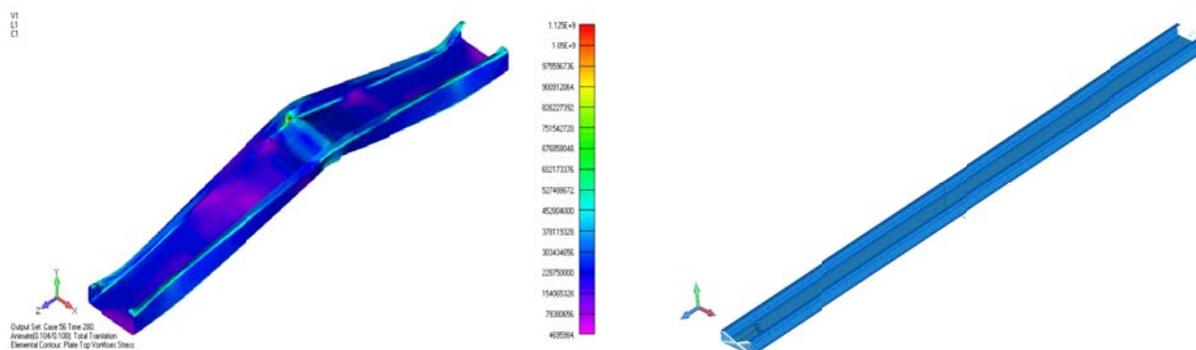


Рисунок 3. Результаты численного моделирования в PLM Femap 10.1 Nastran

Заключение

В ходе работы были выполнены экспериментальные и численные исследования тонкостенных элементов из холодногнутого стального оцинкованного С-профиля.

Анализ результатов показал, что короткие стойки во время испытаний испытывают ярко выраженную потерю местной устойчивости при ранней стадии нагружения, но сохраняют работоспособность. У длинных стоек начинают появляться горизонтальные перемещения оси уже на начальном этапе нагружения, при нагрузке более 35 кН они начинают резко расти, стойка приобретает изогнутую форму, потеря несущей способности происходит в результате общей потери устойчивости.

Экспериментальные исследования показали, что потеря общей устойчивости стоек из холодногнутого С-профиля сплошного сечения происходит по изгибно-крутильной форме, а перфорированного сечения – по изгибной. Просечки в данном случае работают в качестве ребер жесткости сечения. При проведении натурных испытаний наблюдалась потеря формы сечения (distortional) стоек.

Численные исследования показали, что механические свойства стали, из которой изготовлен профиль, не оказывают влияния на несущую способность профиля. На несущую способность профиля и форму потери устойчивости влияет высота сечения профиля h и его толщина t , а точнее, соотношение h/t . Профиль с высотой сечения 150 мм испытывает меньшие перемещения стенки при больших нагрузках, чем профиль с высотой сечения 200 мм.

В дальнейшем будет продолжена обработка результатов исследования с целью получения соответствующих зависимостей для разработки методики расчета тонкостенных элементов на сжатие.

Результаты экспериментально-теоретических исследований и предложенные коэффициенты и зависимости будут использованы при разработке стандартов организации (СТО) НП МАЛСС по проектированию зданий и надстроек на основе каркаса из ЛСТК и реконструкции покрытий с применением технологии ЛСТК.

Литература

1. Жмарин Е.Н. Международная ассоциация легкого стального строительства // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. №2. С. 27–30.
2. Eurocode 3: Design of steel structures. EN 1993-1-3: 2004 Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. CEN. European Committee for Standardisation. 2004.
3. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. М.: Стройиздат, 1940. 275 с.
4. Бычков Д.В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций. М.: Госстройиздат, 1962. 475 с.
5. Вольмир А.С. Гибкие пластинки и оболочки. М.: Гос. изд. техн.-теор. лит., 1956. 419 с.
6. Тришевский И.С., Донец Г.В., Мирошниченко В.И. [и др.] Производство и применение гнутых профилей проката: (Технология, оборудование, сортамент, методы расчета, области применения, эффективность): Справочник. Под ред. И.С. Тришевского. М.: «Металлургия», 1975. 535 с.
7. Айрумян Э.Л., Белый Г.И. Исследования работы стальной фермы из холодногнутого профилей с учетом их местной и общей устойчивости // Промышленное и гражданское строительство. 2010. №5. С. 41–44.
8. Белый Г.И., Астахов И.В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из стальных холодногнутого профилей // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2006. №9. С. 21–25.
9. Астахов И. В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутого профилей: Автореф. дисс. канд. техн.наук. СПб, 2006. 24 с.
10. Ватин Н.И., Рыбаков В.А. Расчет металлоконструкций – седьмая степень свободы // СтройПРОФИЛЬ. 2007. № 2(56). С. 60–63.
11. Катранов И.Г. Несущая способность винтовых и заклепочных соединений стальных тонкостенных конструкций: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Москва, 2011. 22 с.

Назмеева Т.В. Несущая способность сжатых стальных тонкостенных элементов сплошного и перфорированного сечения из холодногнутого С-профиля

12. Куражова В.Г., Назмеева Т.В. Виды узловых соединений в легких стальных тонкостенных конструкциях // Инженерно-строительный журнал. 2011. №3(21). С. 47–52.
13. Лапшин А.А., Жданова С.А. Определение редуцированной площади поперечного сечения тонкостенного гнутого профиля // Приволжский научный журнал. 2012. №4. С. 41–46.
14. Лещенко А.П., Евтушенко С.И., Текутов Е.Г. Экспериментальные исследования устойчивости тонкостенных стержней // Вестник ВолгГАСУ. Строительство и архитектура. 2009. №16(35). С. 24–27.
15. Марченко Т.В., Банников Д.О. Сопоставительный анализ форм потери устойчивости тонкостенных стержневых элементов // Металлические конструкции. 2009. №3(15). С. 178–188.
16. Семенов А.С. Ферма из холодногнутого профиля повышенной жесткости с болтовыми соединениями: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Воронеж, 2009. 21 с.
17. Сливкер В.И. Строительная механика. Вариационные основы. Учебное пособие. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2005. 736 с.
18. Tusnir A.R. Finite element for numeric analysis of structures of thin-walled open profile bars // Metal Constructions. 2009. Vol. 15. No.1. Pp. 73–78.
19. Лалин В.В., Рыбаков В.А. Конечные элементы для расчета ограждающих конструкций из тонкостенных профилей // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8. С. 69–80.
20. Рыбаков В.А. Применение полусдвиговой теории В.И. Сливкера для анализа напряженно-деформированного состояния систем тонкостенных стержней: Автореф. дисс. канд. техн. наук. СПб, 2012. 21 с.
21. Осокин А.В. Развитие метода конечных элементов для расчета систем, включающих тонкостенные стержни открытого профиля: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Москва, 2010. 26 с.
22. Basaglia C., Camotim D., Silvestre N. Post-buckling analysis of thin-walled steel frames using generalised beam theory (GBT) // Thin-Walled Structures. 2013. Vol. 62. Pp. 229–242
23. Chou S.M., Rhodes J. Review and compilation of experimental results on thin-walled structure // Computers & Structures. 1997. Vol. 65. No.1. Pp. 47–67.
24. Li Z., Schafer B.W. Application of the finite strip method in cold-formed steel member design // Journal of Constructional Steel Research. 2010. Vol. 66. No.8–9. Pp. 971–980
25. Schafer B.W., Li Z., Moen C.D. Computational modeling of cold-formed steel // Thin-Walled Structures. 2010. Vol. 48. No.10–11. Pp. 752–762.
26. Brune B., Ungermann D. Coupled instabilities of cold-formed steel members in minor axis bending // 5th International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures, CIMS 2008. Sydney, Australia, 23–25 June, 2008. 9 p.
27. Ghersi A., Landolfo R., Mazzolani F. M. Design of Metallic Cold-formed Thin-walled Members. London: Spon press, 2002. 174 p.
28. Юрченко В.В. Разработка аналитических зависимостей для оценки значений критических сил потери местной устойчивости и потери устойчивости формы сечения тонкостенных стержней открытого профиля // Металлические конструкции. 2012. №3. Т. 18. С. 185–196.
29. Winter G. Light gage (thin walled) steel structures for buildings in the USA // IV Congress International Association for Bridge and Structural Engineering. Cambridge, 1952.
30. Кузнецов В.В., Беленя Е.И., Стрелецкий Н.Н. [и др.] Развитие металлических конструкций: Работы школы Н.С. Стрелецкого. Под ред. В.В. Кузнецова. М.: Стройиздат, 1987. 576 с.
31. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* М., 2011.
32. Лужин О.В., Злочевский А.Б., Горбунов И.А., Волохов В.А. Обследование и испытание сооружений: Учеб. для вузов. Под ред. О.В. Лузина. М.: Стройиздат, 1987. 263 с.
33. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. М.: ДМК, 2003. 448 с.

**Татьяна Вильсовна Назмеева, г. Череповец, Россия*

Тел. моб.: +7(921)5451545; эл. почта: naztv@mail.ru

© Назмеева Т.В., 2013

doi: 10.5862/MCE.40.5

Bearing capacity of compressed continuous and perforated thin-walled steel members of C-shaped cold-formed profiles

T.V. Nazmeeva,

Cherepovets State University, Cherepovets, Russia
+7(921)545-15-45; naztv@mail.ru

Key words

cold-formed profile; test bed; bearing capacity; local buckling; thin-walled members; numerical simulation

Abstract

Nowadays there is steady rising demand for thin-walled light-weight steel structures. But the shortage of relevant standards on their design and use taking into account Russian conditions leads to the current situation when thin-walled light-weight steel structures are used according to the recommended guidelines of thin-walled structures' producers.

The author performed numerical and experimental investigations on general stability and bearing capacity of members of different length which are made of C-shaped profile and C-shaped perforated profile. The main aim of the investigations was to receive a reliable engineering methodology of their calculation. The author developed the testing methodology and designed two test beds C-12 (1200mm/20t) and B-50 (2200mm/50t) to perform the experimental investigation. Numerical solution for stability of thin-walled member made of C-shaped profile was received during the numerical simulation done in PLM Femap 10.1 Nastran.

Subsequently the processing of research results will be continued in order to get the corresponding dependences for development of method for calculating thin-walled members under compression.

References

1. Zhmarin E.N. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2012. No.2. Pp. 27–30. (rus)
2. *Eurocode 3: Design of steel structures. EN 1993-1-3: 2004 Part 1–3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*. CEN. European Committee for Standardisation. 2004.
3. Vlasov V.Z. *Tonkostennyye uprugiyе sterzhni* [Thin-walled elastic bars]. Moscow: Fizmatgiz, 1959. 595 p. (rus)
4. Bychkov D.V. *Stroitel'naya mekhanika sterzhnevyykh tonkostennykh konstruktsiy* [Structural mechanics of bar thin-walled systems]. Moscow: Gosstroyizdat, 1962. 476 p. (rus)
5. Volmir A.S. *Gibkiye plastinki i obolochki* [Flexible plates and shells]. Moscow: Gos. izd. tekhn.-teor. lit, 1956. 419 p. (rus)
6. Trishevskiy I.S., Donets G.V., Miroshnichenko V.I. *Proizvodstvo i primeneniye gnutyykh profiley prokata. Spravochnik* [Production and application of roll-formed section. Handbook]. Edited by I.S. Trishevskiy. Moscow: Metallurgiya, 1975. 536 p. (rus)
7. Ayrumyan Eduard L., Belyi G. I. *Industrial and Civil Engineering*. 2010. No.5. Pp. 41–44.(rus)
8. Belyi G.I., Astakhov I.V. *Montazhnyye i spetsialnyye raboty v stroitelstve*. 2006. No. 9. Pp. 21–25. (rus)
9. Astakhov I. V. *Prostranstvennaya ustoychivost elementov konstruktsiy iz kholodnognutyykh profiley* [Spatial stability of structural members from cold-formed profiles]. Abstract of a PhD thesis. Saint-Petersburg, 2006. 24 p. (rus)
10. Vatin N. I., Rybakov V.A. *StroyProfil*. 2007. No.2(56). Pp. 60–53. (rus)
11. Katranov I.G. *Nesushchaya sposobnost vintovykh i zaklepochnyykh soedineniy stalnykh tonkostennykh konstruktsiy* [Bearing capacity of screw and riveted joint]. Abstract of a PhD thesis. Moscow, 2011. 22 p. (rus)
12. Kurazhova V. G., Nazmeeva T. V. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No.3(21). Pp.47–52. (rus)
13. Lapshin A. A., Zhdanova S. A. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal*. 2012. No.4. Pp. 41–46. (rus)

Nazmeeva T.V. Bearing capacity of compressed continuous and perforated thin-walled steel members of C-shaped cold-formed profiles

14. Leshchenko A. P., Evtushenko S. I., Tekutov E. G. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2009. No.16 (35). Pp. 24–27 (rus)
15. Marchenko T. V., Bannikov D. O. *Metallicheskiye konstruksii*. 2009. Pp. 178–188 (rus)
16. Semenov A.S. *Ferma iz kholodnognutykh profiley povyshennoy zhestkosti s boltovymi soedineniyami* [Reinforced cold-bent section farm with bolt joint]. Abstract of a PhD thesis. Voronezh, 2009. 21 c. (rus)
17. Slivker V.I. *Stroitel'naya mekhanika. Variatsionnye osnovy. Uchebnoe posobie* [Structural mechanics. Variation basis. Tutorial]. Moscow: ASV, 2005. 736 p. (rus)
18. Tusnin A. R. Finite element for numeric analysis of structures of thin-walled open profile bars. *Metal Constructions*. 2009. Vol. 15. No.1. Pp. 73–78. (ukr)
19. Lalin V. V., Rybakov V. A. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No.8(21). Pp. 69–98. (rus)
20. Rybakov V.A. *Primeneniye polusdvigovoy teorii V.I. Slivkera dlya analiza napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sistem tonkostennykh sterzhnei* [Application of half-shearing theory of V.I. Slivker for analysis of deflected mode of thin-walled bars]. Abstract of a PhD thesis. Saint-Petersburg, 2012. 21 p. (rus)
21. Osokin A.V. *Razvitiye metoda konechnykh elementov dlya rascheta sistem, vkluchayushchikh tonkostennyye sterzhni otkrytogo profilya* [Development of finite element method for calculation the systems, including thin-walled bars of open profile]. Abstract of a PhD thesis. Moscow, 2010. 26 p. (rus)
22. Basaglia C., Camotim D., Silvestre N. Post-buckling analysis of thin-walled steel frames using generalised beam theory (GBT). *Thin-Walled Structures*. 2013. Vol. 62. Pp. 229–242.
23. Chou S.M., Rhodes J. Review and compilation of experimental results on thin-walled structure. *Computers & Structures*. 1997. Vol. 65. No.1. Pp. 47–67.
24. Li Z., Schafer B.W. Application of the finite strip method in cold-formed steel member design. *Journal of Constructional Steel Research*. 2010. Vol. 66. No.8–9. Pp. 971–980.
25. Schafer B.W., Li Z., Moen C.D. Computational modeling of cold-formed steel. *Thin-Walled Structures*. 2010. Vol. 48. No.10–11. Pp. 752–762.
26. Brune B., Ungermann D. Coupled instabilities of cold-formed steel members in minor axis bending. 5th *International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures, CIMS2008*. Sydney, Australia, 23-25 June, 2008. 9 p.
27. Gherzi A., Landolfo R., Mazzolani F. M. *Design of Metallic Cold-formed Thin-walled Members*. London: Spon Press, 2002. 174 p.
28. Yurchenko V. V. *Metallicheskiye konstruksii*. 2012. Vol. 18. No.3. Pp. 185–196. (rus)
29. Winter G. Light gage (thin walled) steel structures for buildings in the USA. Preliminary Publication. *IV Congress International Assotiation for Bridge and Structural Engineering*. Cambridge, 1952.
30. Kuznetsov V.V., Beleniya E.I., Streletskiy N.N. [et al.] *Razvitiye metallicheskich konstruksiy: Raboty shkoly N.S. Streletskogo* [Development of metal structures: Works of N.S. Streletskiy school]. Edited by V.V. Kuznetsov. Moscow: Stroyizdat, 1987. 576 p. (rus)
31. *SP 16.13330.2011 Stalnyye konstruksii. Aktualizirovannaiya redaktsiya SNiP II-23-81** [Set of rules 16.13330.2011. Steel stuctures. Actualized edition of building code II-23-81*]. Moscow, 2011. (rus)
32. Luzhin O.V., Zlochevskiy A.B., Gorbunov I.A., Volokhov V.A. *Obsledovaniye i ispytaniye sooruzheniy: Ucheb. dlya vuzov* [Investigation and test of structures. Tutorial for higher school]. Edited by O.V. Luzhin. Moscow: Stroyizdat, 1987. 263 p. (rus)
33. Shimkovich D.G. *Raschet konstruksiy v MSC/NASTRAN for Windows* [Structural calculations in MSC/NASTRAN for Windows]. Moscow: DMK, 2003. 448 p. (rus)

Full text of this article in English: pp. 44–51