

На правах рукописи



Смирнов Максим Олегович

**ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ХОЛОДНОГНУТЫХ
ПРОФИЛЕЙ С ФАКТИЧЕСКИ РЕДУЦИРОВАННЫМ
СЕЧЕНИЕМ**

Специальность 2.1.1. Строительные конструкции,
здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Белый Григорий Иванович

Официальные оппоненты: **Туснин Александр Романович**,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ
ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строитель-
ный университет», кафедра металлических
и деревянных конструкций, профессор;
Соловьев Алексей Витальевич,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет», кафедра метал-
лических и деревянных конструкций, заве-
дующий;

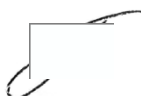
Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Петербургский государ-
ственный университет путей сообщения
Императора Александра I».**

Защита состоится «10» февраля 2022 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета **24.2.380.01** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория №220 главного корпуса). Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/smirnov-maksim-olegovich>

Автореферат разослан «21» декабря 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Попов Владимир Миревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК) получили значительное распространение на территории России. Они широко используются в строительстве малоэтажных жилых и общественных зданий, производственных и складских сооружений, опорах линий электропередач, покрытиях существующих и новых сооружений, дорожных конструкциях (рамные металлические опоры, каркасы защитных экранов, ограждения) и др. Тонкостенные холодногнутые профили, как элементы ЛСТК, изготавливаются методом холодного формообразования из углеродистой или низколегированной прокатной листовой стали на станках для холодной прокатки или с помощью гибочного прессы. Толщина таких элементов обычно составляет от 1 до 4 мм, что, при сравнении с горячекатаными профилями, обуславливает ряд преимуществ ЛСТК: легкость, высокая прочность и жесткость, простота изготовления и массовость производства, быстрый и легкий монтаж, экономия на транспортировке и погрузочно-разгрузочных работах.

Основным недостатком тонкостенных холодногнутых стальных элементов является склонность к потере местной устойчивости и формы сечения, которая происходит до достижения предельного состояния.

С появлением отечественных норм проектирования СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования» у рядового инженера появился инструмент для расчета конструкций подобного рода. Однако многие разделы СП базируются на соответствующих европейских нормах проектирования и требуют выполнения расчетов по достаточно трудоемким методикам, противоречащим некоторым основным принципам строительной механики, которые могут приводить к недоверенным результатам. Указанные факторы существенно затрудняют проектирование ЛСТК, что, в свою очередь, ограничивает их широкое применение.

Таким образом, совершенствование, уточнение и упрощение существующих методик расчета тонкостенных холодногнутых стальных стержневых элементов на прочность и общую устойчивость является одним из актуальных направлений исследований.

Степень разработанности темы исследования. Теоретические основы изучения пространственных деформаций и общей устойчивости ЛСТК базируются на технической теории тонкостенных стержней В. З. Власова и деформационной теории расчета упругих стержней Л. Н. Воробьева, Б. М. Броуде, Г. В. Воронцова. Обобщив эти исследования, Е. А. Бейлиным была получена система деформационных уравнений равновесия тонкостенных стержней открытого профиля по пространственно-деформированной схеме. Однако решение данной системы в замкнутом виде получить невозможно, что побуждало многих авторов к поиску различных приближенных решений. Среди них чис-

ленно-аналитический подход, предложенный Г. И. Белым, благодаря которому удалось достаточно точно получить решения задачи пространственной устойчивости с учетом как упругих, так и упругопластических деформаций. Позднее данный подход использовался и развивался в работах Н. Н. Родикова, С. Н. Пичугина, С. Н. Сергеева, П. А. Пяткина, В. Б. Мазура, И. В. Астахова, В. В. Михаськина, А. Ю. Кузнецова, А. В. Аскинази и других.

Как известно, основной особенностью работы тонкостенных холодногну-тых стержней является потеря местной устойчивости до достижения предельного состояния. Исследования в данном направлении в рамках теории жестких и гибких оболочек проводились В. З. Власовым, Ф. Блейхом, Б. М. Броуде и другими. Однако наибольший вклад в развитие инженерной методики расчета внесли Т. Карман и Д. Винтер. Предложенная ими модель «эффективной ширины» является основой определения степени влияния потери местной устойчивости в существующих европейских и отечественных нормативных документах. Другой немаловажной особенностью работы ЛСТК является потеря устойчивости формы сечения, при которой происходит нарушение первоначальной геометрии профиля. Основной вклад в исследование этого явления внесли С. Тимошенко и Д. Гир, которые предложили способ определения критического напряжения потери устойчивости формы, заложенный в действующие зарубежные и отечественные нормы.

В разные годы исследование работы тонкостенных холодногну-тых стальных элементов активно велось за рубежом. Среди иностранных исследователей стоит выделить Б. Шафера, К. Расмунсена, Г. Д. Хенкока, Д. Янга, Р. Лабуба, Т. Пекоза и других. В основном они были посвящены поиску наиболее рациональных форм профилей, изучению влияния упрочнения и остаточных напряжений при гибке, а также созданию собственных расчетных методик. Данным вопросом также занимались и в России. Среди отечественных авторов стоит выделить Г. И. Белого, И. И. Ведякова, А. Ю. Кузнецова, И. В. Астахова, Э. Л. Айрумяна, А. Р. Туснина, В. В. Зверева и других.

Следует также отметить, что появление свода правил СП 260.1325800.2016, который по сути является адаптацией европейских норм, также положительно сказалось на распространении легких стальных тонкостенных конструкций на территории России. Однако, трудоемкость и сложность представленных методик расчета, которые к тому же отличаются от исторически сложившихся в отечественном проектировании подходов, их несоответствие фактической работе элементов ЛСТК, а также серьезные временные затраты для расчета тонкостенных холодногну-тых профилей методом конечных элементов, побуждают развивать альтернативные более быстрые и точные методы расчета.

В настоящей диссертации на основе обратного численно-аналитического метода решения деформационных задач Г.И. Белого предлагается методика расчета элементов ЛСТК на прочность и общую устойчивость по фактической редукации сечения.

Цель исследования – разработка метода расчета тонкостенных холодногнутых стальных элементов на прочность и общую устойчивость при общем характере загрузки с учетом фактической редукиции поперечного сечения.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Разработка программы, позволяющей определять фактическую редукицию поперечного сечения легких стальных тонкостенных элементов, которая возникает в следствии потери местной устойчивости и формы сечения.

2. Разработка методики и программы для расчета тонкостенных холодногнутых стальных элементов на прочность при действии нескольких силовых факторов с учетом фактической редукиции сечения.

3. Анализ влияния редукиции сечения на прочность при общем случае загрузки стержневых элементов, составленных из холодногнутого профилей.

4. Сравнение предлагаемой методики расчета на прочность с результатами расчета по действующим европейским и отечественным нормам проектирования.

5. Разработка методики и программы расчета на общую устойчивость элементов ЛСТК по изгибной, изгибно-крутильной и пространственной формам с учетом фактической редукиции поперечного сечения.

6. Сравнение предлагаемой методики расчета на общую устойчивость с расчетами по европейским и отечественным нормативным документам.

7. Сравнение результатов расчета на прочность и общую устойчивость по предложенным методикам с экспериментальными исследованиями, а также с методом конечных элементов.

8. Разработка инженерной методики расчета тонкостенных холодногнутого стальных элементов, испытывающих сжатие с двухосными эксцентриситетами на прочность и общую устойчивость.

Объект исследования – тонкостенный стержень, составленный из холодногнутого стальных профилей различной формы.

Предмет исследования – влияние фактической редукиции на прочность и общую устойчивость.

Область исследования соответствует требованиям Паспорта научной специальности ВАК – 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения, пункт 3 «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований вновь возводимых, восстанавливаемых и усиливаемых строительных конструкций наиболее полно учитывающих специфику воздействий на них, свойства материалов, специфику конструктивных решений и другие особенности».

Научная новизна исследования.

1. Разработана программа, позволяющая определять фактическую редукицию поперечного сечения легких стальных тонкостенных элементов, которая возникает в следствии потери местной устойчивости и формы сечения.

2. Разработана методика и программа для расчета тонкостенных холодногнутого стальных элементов на прочность при действии нескольких силовых факторов и учетом фактической редукиции сечения.

3. Получены результаты исследования влияния редукции сечения на прочность элементов ЛСТК при различных напряженных состояниях и геометрических соотношениях.

4. Произведено сравнение предложенной методики расчета на прочность с расчетами по европейским и отечественным нормативным документам.

5. Разработана методика и программа расчета на устойчивость элементов ЛСТК по изгибной, изгибно-крутильной и пространственной формам при общем характере загрузки с учетом фактической редукции сечения.

6. Выполнено сравнение предлагаемой методики расчета на общую устойчивость с расчетами по европейским и отечественным нормативным документам.

7. Произведено сравнение результатов расчета на прочность и общую устойчивость по предложенным методикам с экспериментальными исследованиями, а также с методом конечных элементов.

8. Разработана инженерная методика расчета на прочность и общую устойчивость элементов ЛСТК при внецентренном сжатии с двухосными эксцентриситетами, учитывающая фактическую редуцию сечения.

Теоретическая значимость работы. Предложенные программы и методики расчета позволяют на несколько порядков ускорить процесс решения задач прочности и общей устойчивости элементов ЛСТК, а также получать достоверные результаты с большей точностью и значительно меньшими трудозатратами, чем по действующему СП 260.1325800.2016.

Практическая значимость работы. Инженерная методика, разработанная на основе предложенных алгоритмов, не является адаптацией европейских норм, а соответствует традиционным для отечественного проектирования концепциям, которые, в частности, заложены в СП 16.13330.2017.

Разработанные методики, программы и алгоритмы позволяют получать результаты в безразмерных параметрах в табличном или графическом виде, что дает возможность интегрировать их в существующие программные расчетно-графические комплексы.

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационного исследования являются положения технической теории тонкостенных стержней открытого профиля и деформационной теории расчета упругих стержней, метод «эффективной ширины», теория упругой устойчивости, обратный численно-аналитический метод.

Положения, выносимые на защиту:

- автоматизированный алгоритм определения фактической редукции сечения по СП 260.1325800.2016 и EN 1993-1-3-2006 при совместном действии и взаимном влиянии всех действующих усилий;

- обратная численная методика расчета на прочность тонкостенных хольднугнутых стальных стержней при действии сжатия с двухосными эксцентриситетами и учетом фактической редукции сечения;

- обратная численно-аналитическая методика расчета на устойчивость по изгибной, изгибно-крутильной и пространственной формам стержневых элементов ЛСТК с учетом фактической редукции сечения;
- инженерная методика расчета на общую устойчивость элементов ЛСТК при действии продольной силы с двухосными концевыми эксцентриситетами;
- результаты исследования прочности и устойчивости элементов ЛСТК в зависимости от относительных эксцентриситетов, а также условных гибкостей, геометрических параметров и формы сечения;
- сравнение результатов расчета на прочность и общую устойчивость по предложенным методикам с экспериментальными исследованиями, а также с методом конечных элементов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- использованием при определении редукции метода «эффективной ширины», принятом в действующих европейских и отечественных нормах;
- применением технической и деформационной теории расчета тонкостенных стержней открытого профиля при постановке задач исследования;
- верификацией результатов аналитических расчетов с данными натуральных испытаний отечественных и зарубежных авторов;
- верификацией теоретических результатов с данными численных расчетов методом конечных элементов в программе ANSYS.

Апробация работы.

Основные выводы и результаты диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских конференциях: Международная научно-практическая конференция «Строительные конструкции здания и сооружения. От науки до инноваций», посвященная 90-летию кафедр деревянных, железобетонных и каменных, и металлических конструкций, Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 10-11 июня 2021 г.; 75-я научная конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета «Архитектура – строительство – транспорт», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 19-20 ноября 2019 г.; 74-я научная конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета, Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 3-5 октября 2018 г.; 72-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 3-5 апреля 2019 г.; 73-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 8-10 апреля 2020 г.; 74-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 5-9 апреля 2021 г.

Публикации. Материалы диссертационного исследования опубликованы в 4 печатных работах общим объемом 4,18 п.л., лично автором – 2,72 п.л., в т. ч. 4 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

Внедрение результатов работы. Результаты исследований в практической области подтверждаются: справкой о внедрении в практическую работу ООО «ЦНИИ ПроектСтальКонструкция».

Теоретические положения и полученные результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «СПбГАСУ» при выполнении выпускных квалификационных работ, дипломных проектов и магистерских диссертаций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы – 156 страниц машинописного текста, включая 25 таблиц, 53 рисунка и 77 формул. Список литературы содержит 171 наименование, в том числе 73 – на иностранных языках.

Во введении сформулирована проблема и обоснована актуальность исследования прочности и общей устойчивости элементов ЛСТК, указана степень разработанности проблемы, поставлены цели и задачи проводимых исследований, приведена научная новизна, сформулирована теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе «Анализ исследований несущей способности тонкостенных холодногнутых стальных элементов» приведены общие сведения и область применения тонкостенных холодногнутых элементов, описаны особенности их работы. Проведен анализ исследований пространственной устойчивости и влияния потери местной устойчивости и формы сечения на работу элементов ЛСТК. Раскрыты особенности расчета легких стальных тонкостенных элементов на прочность и общую устойчивость по действующим нормам проектирования, на основании которых сделаны выводы об актуальности темы исследования.

Во второй главе «Исследование прочности стержней ЛСТК при общем случае загрузки» на основе предпосылок из нормативной литературы предложена методика определения фактической редукиции сечения тонкостенных холодногнутых элементов при совместном действии нескольких силовых факторов. Изложены прямой и обратные методы расчета элементов ЛСТК на прочность с учетом действительной работы элемента и его фактической редукиции. Проведен сравнительный анализ точности и эффективности методов, на основе которого предложена инженерная методика расчета элементов ЛСТК на прочность при общем характере загрузки. Выполнено сравнение результатов расчета по предложенной методике с EN 1993-1-3-2006 (СП 260.1325800.2016).

В третьей главе «Исследование общей устойчивости стержневых элементов ЛСТК» приведена Обратная численно-аналитическая методика расчета стержневых элементов ЛСТК на устойчивость, а также предложен программный алгоритм для определения коэффициентов потери общей устойчивости ЛСТК обратным методом. Выполнен сравнительный анализ результатов расчета по предложенной методике с МКЭ и EN 1993-1-3-2006 (СП 260.1325800.2016). Предложена инженерная методика расчета ЛСТК на общую устойчивость с учетом фактической редукции.

В четвертой главе «Сравнительный анализ предлагаемой численно-аналитической методики с экспериментальными результатами зарубежных и отечественных исследователей» проведен анализ результатов сравнения численно-аналитической методики расчета на прочность и общую устойчивость с натурными испытаниями, на основании которых сделан вывод о достоверности предлагаемых методик.

В заключении изложены основные итоги и выводы по результатам диссертационной работы, а также перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Автоматизированный алгоритм определения фактической редукции сечения по СП 260.1325800.2016 и EN 1993-1-3-2006 при совместном действии и взаимном влиянии всех действующих усилий

Предложенный автоматизированный алгоритм определения фактической редукции сечения тонкостенных холодногнутых элементов при совместном действии сжатия с изгибом в двух плоскостях базируется на методике определения редукции в отдельных пластинках из EN 1993-1-3-2006. Он позволяет определять редуцию при любом характере распределения напряжений по сечению профиля, тем самым отображая фактически выключающиеся из работы участки сечения. Таким образом, у инженера появляется возможность отказаться от принципа наложения в задачах прочности и устойчивости, учитывая действительную работу элемента.

Представленный алгоритм реализован в табличном виде в программной среде Visual Basic с использованием повсеместно распространенной программы Microsoft Excel, т.е. доступной практически каждому инженеру.

Для определения напряженного состояния в каждой точке сечения при любом сочетании силовых факторов в алгоритме предлагается универсальный подход в безразмерных параметрах:

$$\bar{\sigma} = \varphi \left(1 + m_x \frac{y}{y_*} + m_y \frac{x}{x_*} \right), \quad (1)$$

где $\varphi = N/R_y A = (1 + m_x + m_y)^{-1}$ – предельный параметр усилий; m_x, m_y – относительные эксцентриситеты приложения продольной силы; x^*, y^* – координаты наиболее напряженных точек сечения.

Имея геометрические размеры профиля, а также зная его тип, можно определить координаты характерных точек, составляющих сечение и построить его расчетную схему по срединной линии (см. рис. 1 а-г).

Применение в алгоритме формулы (1) позволяет вычислять относительные напряжения в каждой точке сечения, заменяя сжатие с изгибом в двух плоскостях на внецентренное сжатие силой N с относительными эксцентриситетами m_x, m_y . Затем, опираясь на рекомендации EN 1993-1-5-2006, в зависимости от способа закрепления по относительным напряжениям вычисляется редуция в каждой пластинке, составляющей профиль. Учет потери устойчивости формы сечения, основываясь на EN 1993-1-3-2006, достигается путем рассмотрения напряженного состояния в каждом участке сечения, имеющем краевые отгибы, и пропорциональном уменьшении толщины только для тех участков, в которых имеются сжимающие напряжения. Вычислив все характеристики каждой элементарной пластинки, можно определить положение главных осей редуцированного сечения, площадь, моменты инерции и другие геометрические характеристики, необходимы для расчетов, а также автоматизировано построить схему фактически редуцированного сечения (см. рис. 1 д, е).

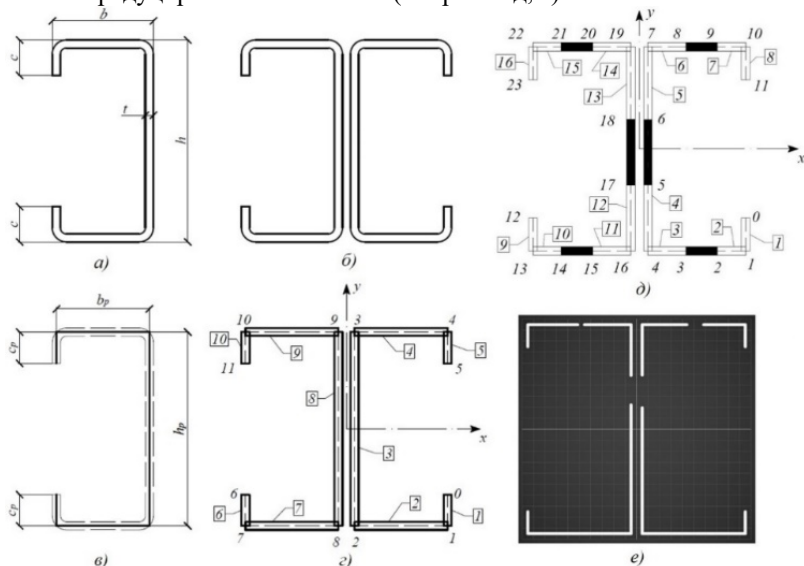


Рис. 1. а) геометрические размеры профиля; б) эскиз рассматриваемого сечения; в) геометрические размеры срединной линии профиля; г) расчетная схема профиля; д) общая схема участков возможного редуцирования; е) схема редуцированного сечения при заданных в примере относительных эксцентриситетах ($m_x=2, m_y=0,5$)

2. Обратная численная методика расчета на прочность тонкостенных холодногнутых стальных стержней при действии сжатия с двухосными эксцентриситетами и учетом фактической редукции сечения

При расчете ЛСТК на прочность редуцированное сечение заменяется на нередуцированное с догружением фиктивной силой, компенсирующей ослабление (см. рис. 2). Такой подход подразумевает определение геометрических характеристик ослабленного сечения относительно главных осей нередуцированного сечения, что существенно упрощает построение инженерной методики расчета.

Рассмотрим стержневой элемент ЛСТК, имеющий произвольное моносимметричное сечение, в котором действует продольная сила N совместно с изгибающими моментами M_x и M_y (см.рис. 2 а). Для обобщения методики расчет будем вести в безразмерных величинах, поэтому введем коэффициент продольной силы $\varphi = N / R_y A$. Тогда изгибающие моменты выразим через относительные эксцентриситеты m_x и m_y .

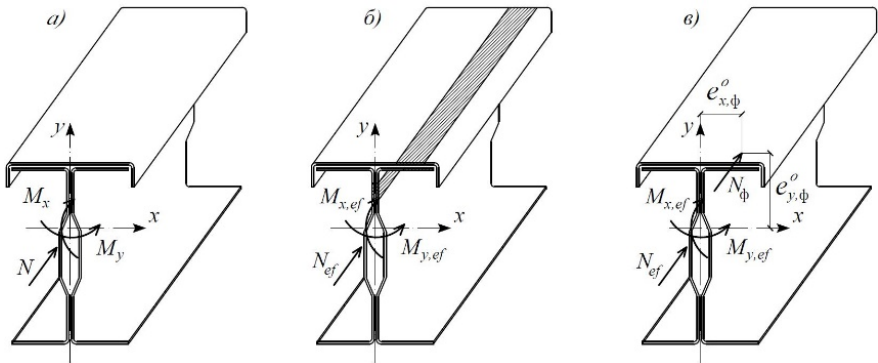


Рис. 2. Схемы загрузки стержня: а) полное сечение; б) редуцированное сечения (редукция показана штриховкой); в) полное сечение с догружением фиктивным усилием N_ϕ , компенсирующим ослабление

В результате предельное напряженное состояние для полного сечения при $\bar{\sigma}_{max} = \sigma_{max} / R_y = 1$ можно получить из выражения:

$$\bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{y}) = (1 + m_x + m_y)^{-1} (1 + m_x \cdot \bar{y} + m_y \cdot \bar{x}). \quad (2)$$

Используя уравнение (2), вычислим величину условного напряжения в характерных точках сечения, затем, определим участки, которые выключаются из работы в следствии потери местной устойчивости или формы сечения (т.е. редукцию сечения). Затем, основываясь на алгоритме «Сечение» Белого Г. И. применительно к редукции, вычислим фактический коэффициент продольной силы φ_{ef} , и его относительные эксцентриситеты:

$$\varphi_{ef} = (1 + m_x + m_y)^{-1} \cdot C_1; \quad m_{x,ef} = C_2 / C_1; \quad m_{y,ef} = C_3 / C_1, \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \bar{A}_{ef} - m_x \frac{\rho_x}{y_*} \bar{y}_c - m_y \frac{\rho_y}{x_*} \bar{x}_c; \\ \text{где } C_2 &= -\bar{y}_c + m_x \frac{\rho_x}{y_*} \bar{i}_{x,ef}^2 - m_y \frac{\rho_y}{x_*} \bar{i}_{xy,ef}^2; \\ C_3 &= -\bar{x}_c - m_x \frac{\rho_x}{y_*} \bar{i}_{xy,ef}^2 + m_y \frac{\rho_y}{x_*} \bar{i}_{y,ef}^2. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В (4) обозначено $\bar{A}_{ef} = 1 - \bar{A}_0$; $\bar{A}_0 = \sum_{k=1}^{n_0} \Delta \bar{A}_{ko}$; $\bar{y}_c = \sum_{k=1}^{n_0} \tilde{y}_{ko} \cdot \Delta \bar{A}_{ko}$;

$$\bar{x}_c = \sum_{k=1}^{n_0} \tilde{x}_{ko} \cdot \Delta \bar{A}_{ko}; \quad \bar{i}_{x,ef}^2 = I_x / (\rho_x^2 \cdot A) - \bar{i}_{x,oc}^2; \quad \bar{i}_{y,ef}^2 = I_y / (\rho_y^2 \cdot A) - \bar{i}_{y,oc}^2;$$

$$\bar{i}_{x,oc}^2 = \sum_{k=1}^{n_0} \tilde{y}_{ko}^2 \cdot \Delta \bar{A}_{ko}; \quad \bar{i}_{xy,ef}^2 = \sum_{k=1}^{n_0} \tilde{x}_{ko} \cdot \tilde{y}_{ko} \cdot \Delta \bar{A}_{ko}; \quad \bar{i}_{y,oc}^2 = \sum_{k=1}^{n_0} \tilde{x}_{ko}^2 \cdot \Delta \bar{A}_{ko}; \quad \tilde{x}_{ko} = x_{ko} / \rho_y;$$

$\tilde{y}_{ko} = y_{ko} / \rho_x$; n_0 – число площадок ослабления; $\Delta \bar{A}_{ko} = \Delta A_{ko} / A$; ΔA_{ko} – площадка ослабления с координатами x_{ko} , y_{ko} .

Используя (3), определяются фактические усилия, которые может воспринять редуцированное сечение стержня. Тогда расчет на прочность, учитывающий фактическую редуцию сечения, можно представить в виде:

$$\frac{1}{\gamma_c R_y \varphi_{loc}} \left(\frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} y_* + \frac{M_y}{I_y} x_* \right) \leq 1, \quad (5)$$

$$\text{где } \varphi_{loc} = \varphi_{ef} (1 + m_{x,ef} + m_{y,ef}) < 1, \quad (6)$$

φ_{loc} – коэффициент потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения, определяемый при общем случае загрузки продольной силой N и изгибающими в двух плоскостях моментами M_x и M_y , соотношения которых определяются по безразмерным параметрам (3).

Таким образом, задавая характером распределения напряжения в полном сечении стержня путем регулирования относительных эксцентриситетов m_x и m_y с последующим установлением φ по $\sigma_{max}=1$, определяется фактическая редуция в сечении и соответствующий ей параметр загрузки φ_{ef} с относительными эксцентриситетами $m_{x,ef}$ и $m_{y,ef}$. Такой подход позволяет получить обширную выборку коэффициентов потери местной устойчивости φ_{loc} для расчетов на прочность без выполнения итерационных процессов. Решения, представленные в безразмерных параметрах, позволяют распространить полученные результаты на обширный спектр разновидностей поперечных сечений и, используя инструменты программирования, получать коэффициенты в табличном виде.

3. Обратная численно-аналитическая методика расчета на устойчивость по изгибной, изгибно-крутильной и пространственной формам стержневых элементов ЛСТК с учетом фактической редукции сечения

Рассмотрим стержневой элемент с моносимметричным сечением, который выделен из конструкции по расчетной длине $l_{ef,x}$ или $l_{ef,y}$ (см. рис. 3 а, где $l_{ef,x}$ и $l_{ef,y}$ совмещены в общую длину l) и загружен продольной силой с равными концевыми двухосными эксцентриситетами e_x^o и e_y^o .

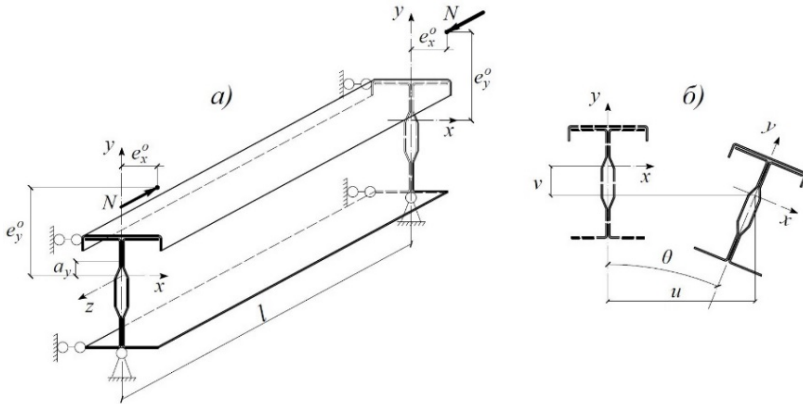


Рис. 3. Расчетная схема тонкостенного стержня:
а) схема загрузки; б) схема деформирования.

Аналитическое решение задачи устойчивости основано на деформационной теории упругих стержней открытого профиля, обобщенной Е.А. Бейлиным, уравнение которой применительно к поставленной задаче имеет вид:

$$EI_x v'' + N \cdot v = -N \cdot e_{y,v}^o; \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} EI_y u'' + N \cdot [u + \theta \cdot (e_{y,u}^o - a_y)] &= -N \cdot e_x^o; \\ EI_\omega \theta^{IV} - GI_k \theta'' + N \cdot (e_{y,u}^o - a_y) \cdot u'' + N \cdot (i_A^2 + 2\beta_y e_{y,u}^o) \cdot \theta'' &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где I_k – момент инерции чистого кручения; I_x, I_y, I_ω – осевые и секториальный моменты инерции сечения; $i_A^2 = i_p^2 + a_y^2$; i_p – полярный радиус инерции; a_y – центр изгиба; $\beta_y = (2I_y)^{-1} \int_A (x^2 + y^2) \cdot y dA - a_y$.

Уравнение (7) соответствует изгибной форме потери устойчивости, а система (8) – изгибно-крутильной. Согласно СП 16.13330.2017 в первом случае $e_{y,v}^o$ принимается по максимальному моменту, а во втором $e_{y,u}^o$ – по наибольшему моменту в средней трети длины стержня.

Решение уравнения (7) может быть получено с высокой точностью при использовании известной приближенной формулы:

$$v(z) = v^0(z) \left(1 - \frac{N}{N_{cr,x}}\right)^{-1}, \quad (9)$$

где $v^0(z)$ – перемещение, полученное расчётом по недеформированной схеме; $N_{cr,x}$ – критическая сила при изгибе относительно оси x .

Решение системы уравнений (8) при симметричном нагружении стержня продольной силой с равными концевыми двухосными эксцентриситетами $e_{y,u}^0$ и e_x^0 представим также приближенными зависимостями, полученными Г. И. Белым и Е. А. Бейлиным:

$$u(z) = u^0(z)\eta; \quad \theta(z) = \theta^0(z)\eta; \quad \eta = \left[\left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_{cr,1}}\right) \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_{cr,2}}\right) \right]^{-1}, \quad (10)$$

где $u^0(z)$ и $\theta^0(z)$ – перемещение из плоскости симметрии (рис. 3 б) и угол закручивания сечения, полученные расчётом по недеформированной схеме; $\Phi = N/(R_y A)$; $\Phi_{cr,1} = N_{cr,1}/(R_y A)$; $\Phi_{cr,2} = N_{cr,2}/(R_y A)$ – коэффициенты критических сил $N_{cr,1}$ и $N_{cr,2}$, полученные путем решения бифуркационной задачи устойчивости (системы уравнений (8) при $e_x^0 = 0$).

Используя решения (9) и (10), представим в безразмерных параметрах напряженные состояния в наиболее нагруженном среднем нередуцированном сечении при деформировании стержня по следующим формам:

- изгибной $\bar{\sigma}(\bar{y}) = \varphi_{ex} \left(1 + m_{x,v}^0 \cdot \bar{y} \cdot K_{d,xv}\right), \quad (11)$

$$\text{где } K_{d,xv} = 1 + \frac{\varphi_{ex} \bar{\lambda}_x^2}{\pi^2} \left(1 - \frac{\varphi_{ex} \bar{\lambda}_x^2}{\pi^2}\right)^{-1}; \quad (12)$$

- изгибно-крутильной $\bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{y}) = \varphi_{yc} \left(1 + m_{x,u}^0 \cdot \bar{y} + m_y^0 \cdot \bar{x} \cdot K_{d,y}\right), \quad (13)$

$$K_{d,y} = 1 + \frac{\pi^2}{8} \left(1 - \frac{a_y}{e_{y,u}^0}\right)^{-1} \left\{ \left(1 - \frac{a_y}{e_{y,u}^0} \cdot \frac{\varphi \cdot \bar{\lambda}_y^2}{\pi^2}\right) \left[\left(1 - \frac{\varphi_{yc}}{\Phi_{cr1}}\right) \left(1 - \frac{\varphi_{yc}}{\Phi_{cr2}}\right) \right]^{-1} - 1 \right\}; \quad (14)$$

- пространственной $\bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{y}) = \varphi_{пр} \left(1 + m_{x,u}^0 \cdot \bar{y} \cdot K_{d,xu} + m_y^0 \cdot \bar{x} \cdot K_{d,yu}\right), \quad (15)$

где $K_{d,xu}$ и $K_{d,yu}$ деформационные коэффициенты, которые определяются по (12) и (14) соответственно с заменой: φ_{ex} и φ_{yc} на $\varphi_{пр}$; $\bar{\lambda}_x$ на $\bar{\lambda}_{xu} = \bar{\lambda}_y \cdot i_y / i_x$. В (11),

(12), (13) и (14) обозначено: $\bar{\lambda}_x = l_{ef,x}/i_x \sqrt{R_y/E}$, $\bar{\lambda}_y = l_{ef,y}/i_y \sqrt{R_y/E}$ – условные гибкости стержня; $m_{x,v}^o = e_{y,v}^o/\rho_x$, $m_{x,u}^o = e_{y,u}^o/\rho_x$, $m_y^o = e_x^o/\rho_y$ – относительные эксцентриситеты; ρ_x, ρ_y – ядровые расстояния.

Полученные решения (11), (13) и (15) можно распространить на стержни с редуцированным сечением путем замены его на нередуцированное с компенсирующим догрузением фиктивной силой. Последнюю можно определить с помощью алгоритма «Сечение», вычисляя редукцию, например, по EN 1993-1-3-2006.

Используя разработанную методику расчета на прочность, рассмотрим пространственно-деформированное состояние стержня, в наиболее нагруженном сечении которого действует продольная сила с деформационными относительными эксцентриситетами $m_{x,u}$ и m_y . Тогда напряженное состояние при таком загрузении принимает вид:

$$\bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{\varepsilon}(\bar{x}, \bar{y}) = \varphi_{пр} \left((1 + m_{x,u} \cdot \bar{y} + m_y \cdot \bar{x}) \right); \quad (16)$$

$$\text{где } \varphi_{пр} = (1 + m_{x,u} + m_y)^{-1}. \quad (17)$$

Вычисляем геометрические параметры эффективного сечения относительно главных осей полного сечения. Далее, пользуясь алгоритмом «Сечение» определяем:

- коэффициент потери устойчивости, характеризующий действующую силу φ_{ef}

$$\varphi_{пр,ef} = \varphi_{пр} \left(\bar{A}_{ef} - m_{x,u} \frac{\rho_x}{y_*} \bar{y}_c - m_y \frac{\rho_y}{x_*} \bar{x}_c \right); \quad (18)$$

- параметр фиктивной силы $\varphi_{ф}$, компенсирующий редукцию, и относительные эксцентриситеты ее действия

$$\varphi_{пр,ф} = \varphi_{пр} \cdot C_{1ф}; \quad m_{xф}^o = C_{2ф}/C_{1ф}; \quad m_{yф}^o = C_{3ф}/C_{1ф}, \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{1ф} &= \bar{A}_o + m_{x,u} \frac{\rho_x}{y_*} \bar{y}_c + m_y \frac{\rho_y}{x_*} \bar{x}_c; \\ \text{где } C_{2ф} &= \bar{y}_c + m_{x,u} \frac{\rho_x}{y_*} \bar{i}_{x,oc}^{-2} + m_y \frac{\rho_y}{x_*} \bar{i}_{xy,ef}^{-2}; \\ C_{3ф} &= \bar{x}_c + m_{x,u} \frac{\rho_x}{y_*} \bar{i}_{xy,ef}^{-2} + m_y \frac{\rho_y}{x_*} \bar{i}_{y,oc}^{-2}. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Редукция сечения принимается постоянной по длине стержня, в связи с этим фиктивную силу φ_{Φ} также будем принимать постоянной по длине стержня и действующей с концевыми эксцентриситетами $e_{y\Phi}^0 = m_{x\Phi}^0 \cdot \rho_x$, $e_{x\Phi}^0 = m_{y\Phi}^0 \cdot \rho_y$ относительно главных осей полного сечения.

Используя обратный численно-аналитический метод расчета Г.И. Белого, представим напряженное состояние в наиболее нагруженном сечении пространственно-деформируемого стержня при совместном действии сил с $\varphi_{пр,ef}$ и φ_{Φ} :

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{y}) = & \varphi_{пр,ef} \left(1 + m_{xu,ef}^0 \cdot \bar{y} \cdot K_{d,xu} + m_{y,ef}^0 \cdot \bar{x} \cdot K_{d,yu} \right) + \\ & + \varphi_{пр,\Phi} \left(1 + m_{x,\Phi}^0 \cdot \bar{y} \cdot K_{d,xu} + m_{y,\Phi}^0 \cdot \bar{x} \cdot K_{d,yu} \right) = 1. \end{aligned} \quad (21)$$

Сопоставляя выражения (16) и (21) можно получить выражения для концевых относительных эксцентриситетов $m_{xu,ef}^0$ и $m_{y,ef}^0$.

4. Инженерная методика расчета на общую устойчивость элементов ЛСТК при действии продольной силы с двухосными концевыми эксцентриситетами

Для удобства построения инженерной методики расчета на общую устойчивость введем коэффициент потери местной устойчивости и формы сечения $\varphi_{loc} = \varphi_{ef} / \varphi$. При этом коэффициенты φ_{ef} и φ для различных форм потери устойчивости могут быть получены по (21) при $\bar{x} = \bar{y} = 1$ для редуцированного ($\varphi_{\Phi} \neq 0$) и нередуцированного ($\varphi_{\Phi} = 0$) сечений соответственно. Тогда проверка общей устойчивости сводится к виду:

$$\frac{N}{\gamma_c \cdot R_y \cdot A \cdot \varphi \cdot \varphi_{loc}} \leq 1, \quad (22)$$

5. Результаты исследования прочности и устойчивости элементов ЛСТК в зависимости от относительных эксцентриситетов, а также условий гибкости, геометрических параметров и формы сечения

Прочность

Для сравнения результатов, полученных по разработанной методике, с СП 260.1325800.2016 (EN 1993-1-3-2006) используем спаренные сечения, составленные из С-образных профилей Double Channel 190x90x20x2 и Double Channel 270x50x20x2. Эти сечения (см. рис. 4, 5) имеют краевые отгибы, поэтому есть возможность исследовать влияние на прочность не только потери местной устойчивости (см. пробелы сечений), но и потери формы сечения (более тонкие участки). В работе используется именно С-образные сечения, т. к. они имеют краевые отгибы, а значит есть возможность исследовать не только потерю местной устойчивости, но и потерю формы сечения.

На рис. 6, 7 иллюстрируются зависимости ϕ_{loc} (сплошные линии) и ϕ^{EN}_{loc} (пунктирные линии), а также безразмерный параметр фактического редуцированного сечения A_{ef} (штрих-пунктирные линии), от $m_{x,ef}$ при фиксированных значениях $m_{y,ef}$.

Из графиков видно, что результаты расчетов по EN 1993-1-3-2006 СП (260.1325800.2016) могут приводить как к занижению (см. рис. 6 б, в), так и к завышению (см. рис. 6 а, 7) несущей способности в зависимости от типа сечения и соотношения относительных эксцентриситетов m_x и m_y . Разница может составлять до 12% как в большую, так и в меньшую сторону.

Там же представлена эффективная относительная площадь фактически редуцированного сечения $A_{ef} = A_{ef} / A$, от относительных эксцентриситетов m_x и m_y . Сопоставляя графики A_{ef} и ϕ_{loc} на рис. 6, можно увидеть, что при относительно больших A_{ef} редукция весьма существенно снижает несущую способность. Это относится к ситуациям, когда потеря местной устойчивости происходит преимущественно в наиболее нагруженных широких полках (см. редуцированные сечения на рис. 4, б и 4, в) и, наоборот, (рис. 7) в сечении, где потеря местной устойчивости в значительной степени происходит в менее нагруженной вытянутой стенке (см. рис. 5, б и 5, в), работа редуцированного сечения более эффективна.

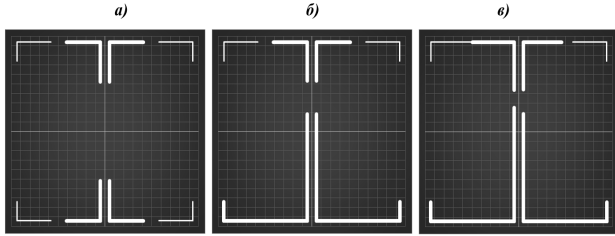


Рис. 4. Фактически редуцированное сечение Double Channel 190x90x20x2 при а) $m_x=0, m_y=0$; б) $m_x=3, m_y=0$; в) $m_x=2, m_y=1$

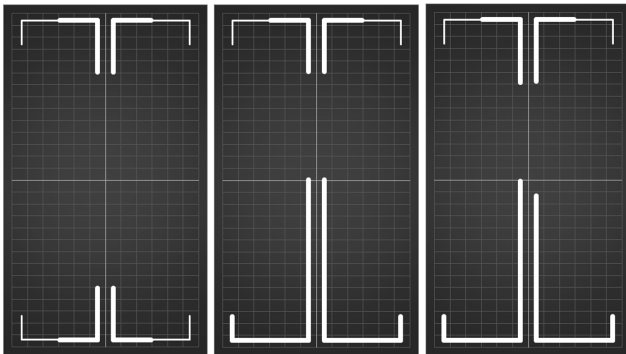


Рис.5. Фактически редуцированное сечение Double Channel 270x50x20x2 при а) $m_x=0, m_y=0$; б) $m_x=3, m_y=0$; в) $m_x=2, m_y=1$

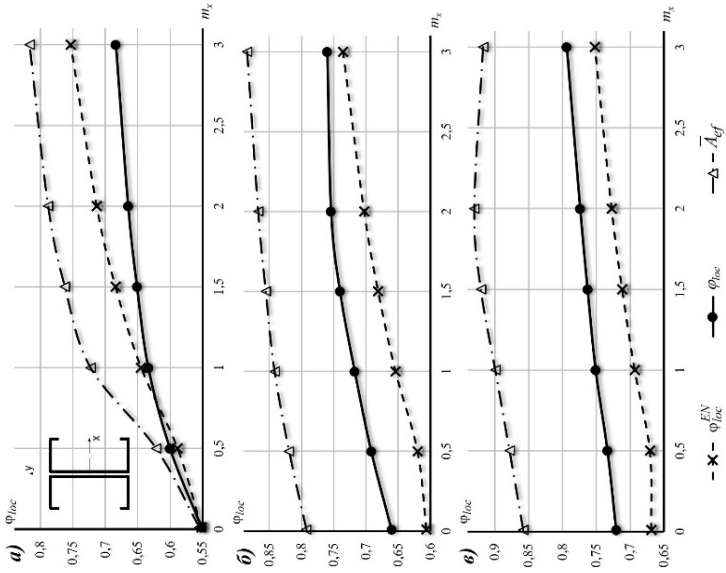


Рис. 6. Графики зависимости φ_{loc}^{EN} , φ_{loc} , \bar{A}_{ef} от $m_{x,ef}$ для Double Channel 190x90x20x2 при $m_{y,ef}$ равном а) 0; б) 1; в) 2

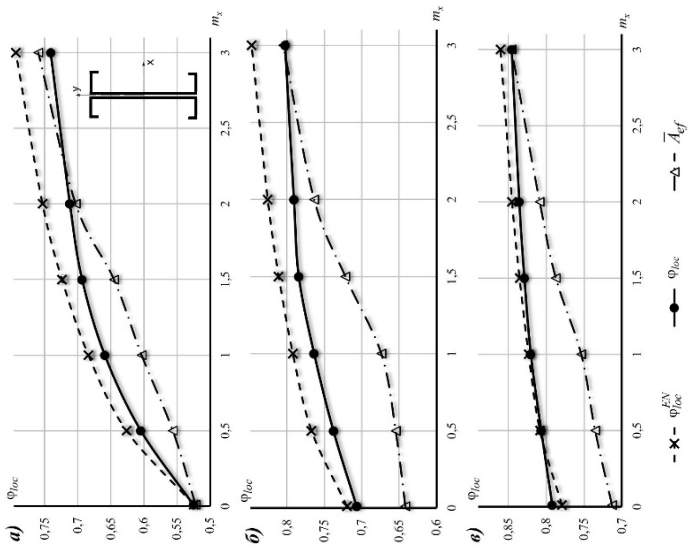


Рис. 7. Графики ависимости φ_{loc}^{EN} , φ_{loc} , \bar{A}_{ef} от $m_{x,ef}$ для Double Channel 270x50x20x2 при $m_{y,ef}$ равном а) 0; б) 1; в) 2

Устойчивость

Сравнение проведем на примерах расчета стержней в безразмерных параметрах, составленных из спаренных «С»-образных профилей Double Channel 190x90x20x2.

На рис. 8 показаны зависимости коэффициентов пространственной устойчивости от относительных эксцентриситетов в плоскости большей жесткости m_x ($I_x > I_y$) с учетом случайного эксцентриситета в другой плоскости $m_{y,сл} = e_{x,сл} / \rho_y$ ($e_{x,сл} = l/750 + i_y/20$) при фиксированных значениях гибкости $\bar{\lambda}_y$. Сплошные линии соответствуют – $\varphi_{пр,ef}$, пунктирные – МКЭ по программе Ansys – $\varphi^{МКЭ}_{пр,ef}$, штрихпунктирные – нормативному по EN 1993-1-3-2006 – $\varphi^{EN}_{пр,ef}$.

Сопоставляя графики $\varphi_{пр,ef}$ и $\varphi^{МКЭ}_{пр,ef}$ можно констатировать, что они достаточно хорошо согласуются, расхождения этих результатов при $\bar{\lambda}_y = 1, 2, 3$ составляют от 1% до 10%. Большие из них относятся к малым эксцентриситетам, что связано с переходом от центрального сжатия, при котором достигается максимальная симметричная редукция, к сжатию с двухосным изгибом, вызывающем значительно меньшую и несимметричную редукцию. При относительно большой гибкости $\bar{\lambda}_y = 5$ (см. графики рис. 8 г) результаты расчета по МКЭ – $\varphi^{МКЭ}_{пр,ef}$ в зависимости от m_x превышают соответствующие значения $\varphi_{пр,ef}$ на 10,4%...15,33%.

Это можно объяснить тем, что при случайном эксцентриситете $m_{y,сл}$ в плоскости большей гибкости $\bar{\lambda}_y = 5$, когда $m_x = 0, 1 \dots 6$, влияние пространственных перемещений на устойчивость возрастает в несколько раз по сравнению с гибкостью $\bar{\lambda}_y \leq 3$.

Сопоставляя $\varphi_{пр,ef}$ (на рис. 8 см. сплошные линии) с результатами $\varphi^{EN}_{пр,ef}$ (штрихпунктирные линии), полученными по EN 1993-1-3-2006, видно, что последние по мере увеличения гибкости $\bar{\lambda}_y$ существенно занижают пространственную устойчивость. Результаты расчета достаточно хорошо согласуются только при «центральном» сжатии (сжатии с случайными эксцентриситетами $m_x \leq 0,35$, $m_{y,сл}$), а также при любых значениях m_x стержней малой гибкости $\bar{\lambda}_y \leq 1$, когда влияние пространственных перемещений на устойчивость является незначительным. Во всех остальных случаях с ростом $\bar{\lambda}_y$ и m_x занижения устойчивости по EN 1993-1-3-2006 увеличивается от 15% до 53%. Это объясняется тем, что в общем решении задачи пространственной устойчивости по EN 1993-1-3-2006 применен принцип наложения.

Влияние редукции сечения на пространственную устойчивость продемонстрируем на тех же примерах зависимостью $\varphi_{loc} = \varphi_{пр,ef} / \varphi_{пр}$ от относительного эксцентриситета m_x при $m_{y,сл}$ и гибкости $\bar{\lambda}_y$ (см. рис. 9 и таблицу 1).

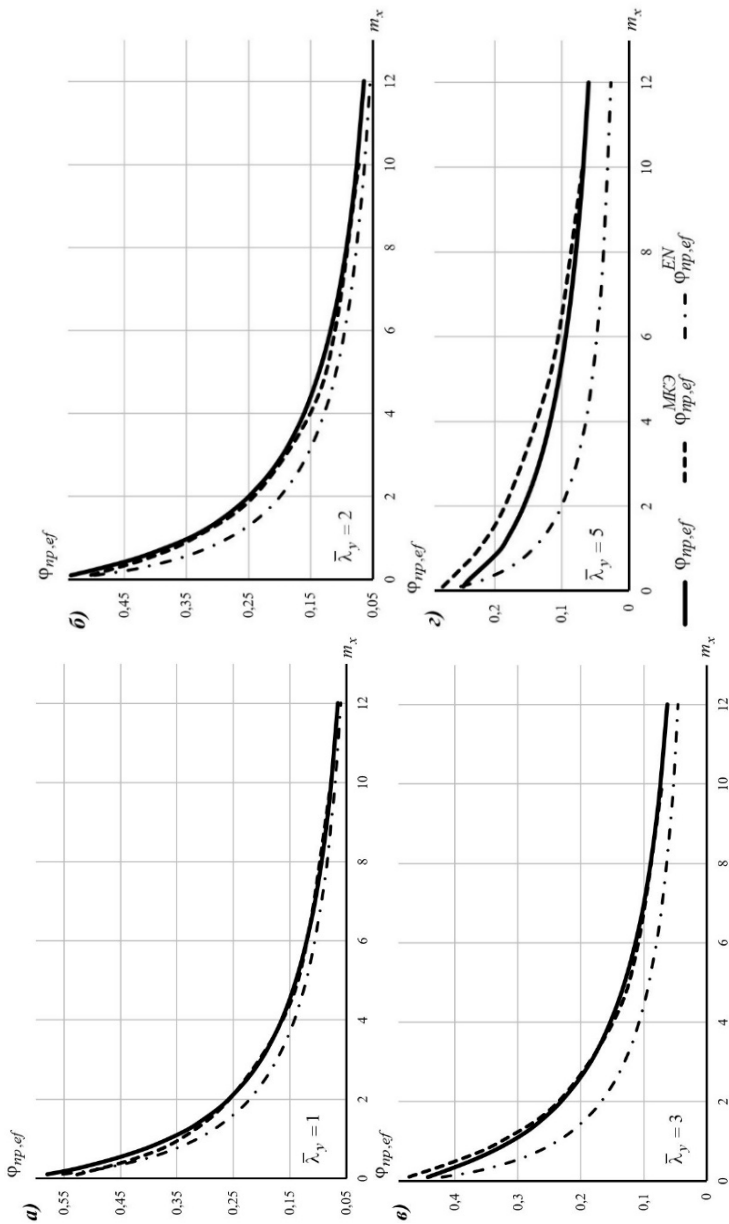


Рис. 8. Графики зависимости коэффициентов пространственной устойчивости от m_x при гибкости $\bar{\lambda}_y$ равной: а) 1; б) 2; в) 3; г) 5

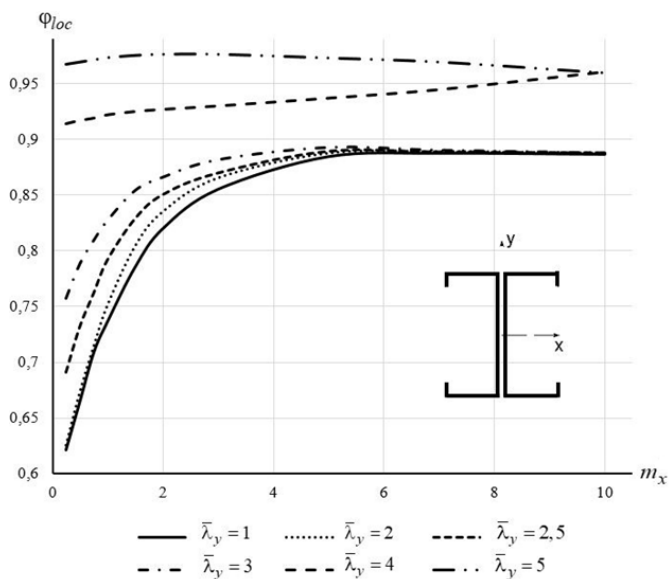


Рис. 9. Графики зависимости коэффициентов потери местной устойчивости при внецентренном сжатии Φ_{loc} от m_x при различных гибкостях $\bar{\lambda}_y$.

Таблица 1. Коэффициент Φ_{loc} для Double Channel 190x90x20x2

$\bar{\lambda}_y$	m_x^o с учетом $m_{y,сл}^o$								
	0,25	0,5	0,75	1	1,5	2	3	5	7
0,5	0,603	0,648	0,681	0,718	0,770	0,799	0,835	0,865	0,869
1	0,609	0,651	0,694	0,721	0,769	0,804	0,838	0,866	0,869
1,5	0,611	0,654	0,697	0,723	0,774	0,810	0,842	0,868	0,870
2	0,613	0,660	0,700	0,736	0,788	0,818	0,848	0,869	0,871
2,5	0,677	0,717	0,747	0,776	0,812	0,834	0,853	0,872	0,871
3	0,742	0,772	0,793	0,810	0,837	0,849	0,864	0,875	0,872
3,5	0,862	0,864	0,866	0,868	0,870	0,874	0,881	0,881	0,876
4	0,896	0,899	0,901	0,904	0,907	0,908	0,911	0,918	0,926
4,5	0,928	0,931	0,934	0,935	0,939	0,944	0,954	0,954	0,950
5	0,948	0,950	0,952	0,954	0,956	0,956	0,956	0,954	0,950

Видно, что редукция весьма существенно снижает устойчивость при относительно небольших эксцентриситетах m_x , и гибкостях $\bar{\lambda}_y$ $\varphi_{loc}=0,68\dots 0,8$. С увеличением этих параметров ее влияние снижается, а при $\bar{\lambda}_y \geq 4$ и $m_x \geq 2$ становится незначительным $\varphi_{loc} \geq 0,92$.

б. Сравнение результатов расчета на прочность и общую устойчивость по предложенным методикам с экспериментальными исследованиями, а также с методом конечных элементов

Для подтверждения достоверности предложенных методик проведен сравнительный анализ результатов расчетов с 3-мя экспериментальными исследованиями зарубежных и отечественных авторов, а также результатами расчетов методом конечных элементов.

Первое сравнение – с результатами испытаний коротких тонкостенных холодногнутых стальных стержней на прочность S. Torabian, B. Zheng, B. W. Schaffer (США, 2014 г.), подвергающихся внецентренному сжатию. Ввиду малой длины в элементах имело место развитие пластических деформаций.

Образцы представляли из себя одиночные С-образные профили, по торцам которых приварены фланцы, позволяющие регулировать положение в установке для испытания и прижимать его к нагрузочным пластинам.

При внецентренном сжатии в плоскости большей жесткости результаты эксперимента достаточно хорошо согласуются с предложенной методикой (разница составляет не более 7%). Это связано с тем, что шарниры, передающие нагрузку с пресса на нагрузочные пластины, допускают поворот именно в этой плоскости.

В остальных случаях результаты расчета по предложенной методике демонстрируют запас несущей способности (от 6% до 18%) поскольку получены по фибровой текучести ($\bar{\sigma}_{max} = 1$) в то время, как испытываемые образцы разрушались при глубоких пластических деформациях. При этом численно-аналитическая методика предполагает, что редукция постоянна по длине стержня. Однако, испытываемые образцы теряют местную устойчивость лишь на определенных участках, как минимум из-за приварки торцов к фланцам.

Также авторами приводятся результаты сравнения экспериментов с Североамериканскими нормами AISI-S100-2012, которые показывают значительно меньшую несущую способность по отношению к предельной нагрузке при испытаниях (от 15 до 55%).

Второе сравнение – с результатами испытаний составных тонкостенных холодногнутых стальных стержней различной длины на пространственную

устойчивость С. Wang, Q. Guo, Z. Zhang, Y. Guo (Китай, 2019 г.), подвергающихся эксцентрическому сжатию, и результатами расчета методом конечных элементов в программе Ansys.

Образцы представляли из себя стержни из спаренных С-образных профилей, по торцам которых к поясам элементов самонарезающими винтами были прикреплены гнутые тонкостенные направляющие пластины.

Результаты сравнения численно-аналитической методики с испытаниями и МКЭ показывают достаточно хорошую сходимость (не более 4,79% и 5,81% соответственно). При этом, расчет в Ansys показывает несколько завышенные результаты по сравнению с теоретическими. Это объясняется тем, что, в отличие от МКЭ, в аналитической методике предполагается, что редукция постоянна по длине стержня.

Третье сравнение – с результатами испытаний составных тонкостенных холодногнутых стальных стержней различной длины на пространственную устойчивость А.Ю. Кузнецова (СПбГАСУ, 2013 г.), подверженных сжатию с фиксированными двухосными эксцентриситетами и результатами расчета методом конечных элементов в программе Ansys.

В исследовании рассматривались составные стержни из спаренных гнутых швеллеров, а также спаренных С-образных профилей различной гибкости. Для обеспечения шарнирного соединения в исследовании использовались ножевые шарниры, допускающие поворот в двух главных плоскостях элемента.

Результаты сравнения показали, что численные расчеты образцов методом конечных элементов достаточно хорошо согласуются с расчетом по предлагаемой методике. В 100% случаев МКЭ показывает несколько завышенные результаты по сравнению с обратной методикой расчета на общую устойчивость (от 1,1% до 7,5%). Это объясняется тем, что, в отличие от МКЭ, в аналитической методике предполагается, что редукция постоянна по длине стержня.

Сравнивая результаты численно-аналитического расчета с испытаниями, можно наблюдать, что также в 100% случаев предельные нагрузки при испытаниях выше, чем по предложенной методике (от 4,6% до 17,6%). Такое расхождение объясняется способом прикрепления испытуемых образцов к системе ножевых шарниров. Опорная конструкция, используемая в испытании, предполагает закрепление участков по торцам образцов на высоту 120 мм. В связи с этим, на данных участках не будет происходить образование волн выпучивания, что приводит к завышению несущей способности образцов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Предложена эффективная обратная численно-аналитическая методика, позволяющая выполнять расчеты на прочность и общую устойчивость при действии сжатия с двухосными эксцентриситетами с учетом потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения, обладающая достаточно высокой точностью и на несколько порядков большей скоростью получения результатов по сравнению с другими методами.

2. Разработана компьютерная программа, позволяющая автоматически определять фактические геометрические характеристики полного и редуцированного сечений тонкостенных стальных стержней при любом напряженном состоянии, в соответствии с действующими европейскими и отечественными нормативными документами (EN 1993-1-3-2006, EN 1993-1-5-2006, СП 260.1325800.2016).

3. Проведен сравнительный анализ разработанной обратной методики расчета на прочность ЛСТК с нормативными (EN 1993-1-3-2006, СП 260.1325800.2016). По результатам сравнения установлена неприменимость принципа наложения, использование которого при одновременном действии нескольких силовых факторов может приводить как к завышению, так и к занижению несущей способности.

4. Предложена инженерная методика расчета тонкостенных холодногнутых стержней на прочность при общем характере загрузки, согласно которой влияние потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения учитывается коэффициентом φ_{loc} , при этом нет необходимости производить трудоемкие вычисления эффективных геометрических характеристик (используются характеристики полного сечения), а расчет выполняется по формуле:

$$\text{муле: } \frac{1}{\gamma_c R_y \varphi_{loc}} \left(\frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} y_* + \frac{M_y}{I_y} x_* \right) \leq 1.$$

5. Разработан программный алгоритм, позволяющий автоматизировано получать коэффициенты потери местной устойчивости и формы сечения φ_{loc} при любом характере загрузки стержня. При этом способ представления данных в табличном виде соответствует концепциям, принятым в СП 16.13330.2017.

6. Проведен сравнительный анализ предлагаемой обратной численно-аналитической методики расчета ЛСТК на пространственную устойчивость с МКЭ в расчетном комплексе Ansys, показавший хорошую сходимость, что свидетельствует о достоверности разработанного метода.

7. Выполнено сравнение результатов расчета по разработанной обратной методике с действующими нормативными методами (EN 1993-1-3-2006, СП 260.1325800.2016), которое показало существенное занижение устойчивости в последних (до 50% при больших гибкостях).

8. Предложена инженерная методика расчета на общую устойчивость тонкостенных холодногнутых стержней в традиционной для понимания отечественных инженеров постановке с введением коэффициента учета потери местной и общей устойчивости φ_{loc} , позволяющая значительно увеличить точность и сократить время расчета. При этом расчет выполняется в соответствии с концепциями СП 16.13330.2017 по формуле: $N / (\gamma_c \cdot R_y \cdot A \cdot \varphi \cdot \varphi_{loc}) \leq 1$.

9. Разработан программный алгоритм, позволяющий автоматизировать процесс расчета согласно предлагаемой обратной методике на общую устойчивость ЛСТК, автоматически получать выборку коэффициентов потери местной устойчивости и формы сечения при расчете на общую устойчивость при различных значения условной гибкости и относительных эксцентриситетов в безразмерных величинах.

10. Произведен сравнительный анализ натуральных испытаний зарубежных и отечественных исследователей на прочность и общую устойчивость тонкостенных холодногнутых стальных стержней с предлагаемой обратной методикой, который показал, что разработанный метод демонстрирует более консервативные результаты. Однако запас несущей способности составляет от 1% до 18% (а при сравнении с МКЭ не более 7%). Что свидетельствует о достоверности предлагаемой обратной методики.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии и приравненные к ним:

1. Белый, Г. И., Смирнов, М.О. Совершенствование инженерной методики расчета на прочность стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 1 (78). С. 72–81.

2. Смирнов, М.О. Совершенствование методики определения редуцированных сечений стержней из холодногнутых профилей при однопараметрическом нагружении. // Вестник гражданских инженеров. 2020. №2(79). С 60–67.

3. Белый, Г. И., **Смирнов, М. О.** Влияние фактической редукии сечения на прочность и устойчивость стержневых элементов ЛСТК при общем случае загрузки // Промышленное и гражданское строительство. 2021. №3. с 57–68.

4. **Смирнов, М. О.** Совершенствование обратного численно-аналитического метода расчета ЛСТК на устойчивость при внецентренном сжатии. // Вестник гражданских инженеров. 2021. №1 (84) с 46–52.

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 28.34.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ 358.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.